

# Desenvolvimento de metodologia para correlação entre precipitação e a variação da concentração de sedimentos em suspensão no escoamento superficial urbano

*Development of methodology for correlation between precipitation and variation of concentration of suspended sediments in urban runoff*

Lucas Costa Lage de Assis<sup>1</sup> , Maurício Marcuz Buffo<sup>1</sup> , Alexandre Silveira<sup>1\*</sup> 

## RESUMO

Os ciclos hidrológicos e hidrossedimentológicos estão diretamente relacionados, sendo possível observar a influência do primeiro no segundo na alteração que a dinâmica dos sedimentos nos cursos hídricos sofre em razão da vazão (Q) e da precipitação. Diversas pesquisas buscam estudar a relação entre os dois ciclos e avaliar a influência das características hidrológicas nos parâmetros de qualidade de água, tais como os sedimentos em suspensão, como forma de identificar novos métodos e conhecimentos que auxiliem no tratamento de águas e no manejo das bacias hidrográficas. O presente trabalho teve como objetivos propor uma metodologia que permita relacionar os dados de precipitação com a concentração de sólidos suspensos ( $C_{ss}$ ), estudar o comportamento sazonal da  $C_{ss}$  e investigar a ocorrência de *Mass First Flush* (MFF) no escoamento superficial dos eventos avaliados. Um amostrador automático programado coletou amostras de escoamento superficial de 28 eventos de precipitação, que foram encaminhadas a laboratório para determinação da  $C_{ss}$ . Paralelamente, realizou-se o monitoramento pluviométrico na região da coleta e a medição da altura da lâmina d'água do escoamento para a determinação da Q. O método proposto no trabalho, que considera a precipitação nos sete dias anteriores ao evento, obteve coeficientes de determinação ( $R^2$ ) de 0,7394 e 0,8154 para os dados de concentração de sólidos suspensos de pico ( $C_{ss}^{pico}$ ) e de concentração média de sólidos suspensos ( $C_{ss}^{med}$ ), respectivamente. Observou-se que o fenômeno de MFF ocorreu na maior parte dos eventos estudados, evidenciando o transporte da maior parte dos sólidos no início do escoamento. Observou-se ainda, na análise de sazonalidade, que as características das estações do ano/quantidade de precipitação têm influência direta no transporte de  $C_{ss}$ .

**Palavras-chave:** ciclo hidrológico; ciclo hidrossedimentológico; primeira carga de lavagem.

## ABSTRACT

The hydrological and hydrosedimentological cycles are directly related, being possible to observe the influence of the first on the second in the alteration that the dynamics of the sediments in the water courses undergo due to the flow (Q) and precipitation (P). Several studies seek to study the relationship between the two cycles and evaluate the influence of hydrological characteristics on water quality parameters, such as suspended sediments, as a way to identify new methods and knowledge that assist in the treatment of waters and management of watersheds. The present work aimed to propose a methodology that allows relating precipitation data with the concentration of suspended solids ( $C_{ss}$ ), to study the seasonal behavior of the  $C_{ss}$  and to investigate the occurrence of Mass First Flush (MFF) in the surface flow of the evaluated events. A programmed automatic sampler collected runoff samples from 28 precipitation events, which were sent to the laboratory to determine the  $C_{ss}$ . At the same time, rainfall monitoring in the region of collection was carried out and the height of the flow water flow was measured to determine the flow. The method proposed in the study, which considers the precipitation in the seven days prior to the event, obtained coefficients of linear relationship with values of  $R^2 = 0.7394$  and  $R^2 = 0.8154$  for the peak ( $C_{ss}^{peak}$ ) and average ( $C_{ss}^{avg}$ ) suspended solids concentration data, respectively. It was observed that the MFF phenomenon occurred in most of the events studied, showing the transport of most solids at the beginning of the flow. In the seasonality analysis, it was found that the characteristics of the seasons have a direct influence on  $C_{ss}$  transport.

**Keywords:** water cycle; hydrosedimentological cycle; mass first flush.

<sup>1</sup>Universidade Federal de Alfenas - Alfenas (MG), Brasil.

\*Autor correspondente: alexandre.silveira@unifal-mg.edu.br

**Conflitos de interesse:** os autores declaram não haver conflitos de interesse.

**Financiamento:** Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG - APQ-01982-14); Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-Brasil (CAPE - 88881.030412/2013-01) e Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP - 0113.0455.00).

**Recebido:** 30/01/2020 - **Aceito:** 26/01/2021 - **Reg. ABES:** 20200029

## INTRODUÇÃO

O estudo do ciclo hidrológico mostra que a vazão (Q) de um curso hídrico é diretamente influenciada pela precipitação ocorrida em sua bacia hidrográfica e que o ciclo hidrossedimentológico sofre influência do ciclo hidrológico; por isso, pesquisas são realizadas a fim de investigar a relação desses dois ciclos e a influência da precipitação na concentração de sólidos suspensos.

Beeler e Mitchell (2017), por exemplo, realizaram um estudo no lago Whatcom, nos Estados Unidos da América, coletando dados de Q e amostras de água para a análise da concentração de sólidos suspensos ( $C_{ss}$ ) e de fósforo, fizeram a relação entre a Q e a  $C_{ss}$  e obtiveram valores significativos de correlação entre as variáveis na maioria dos riachos (com coeficientes tau de kendall variando de 0,442 a 0,668). Souza e Gastaldini (2014) avaliaram a qualidade da água em diferentes bacias hidrográficas no município de Santa Maria, no sul do Brasil, e observaram correlações entre a Q e a  $C_{ss}$  na bacia que estava em estado mais preservado. Garrido *et al.* (2018) desenvolveram um estudo na sub-bacia hidrográfica do rio Piranhas realizando medições hidrossedimentológicas com o objetivo de determinar as curvas-chave que representam as cargas de sedimentos em suspensão do rio e concluíram que a concentração de material transportado no rio Piranhas está diretamente relacionada com a quantidade de precipitações, e as curvas-chave de descarga sólida em suspensão e total apresentaram bons coeficientes de determinação ( $R^2$ ), tanto para o período seco (0,8123 e 0,8149) quanto para o período chuvoso (0,9030 e 0,9370).

Estudos identificaram que as estações do ano, em razão de suas características climáticas, tendem a influenciar o comportamento do ciclo hidrossedimentológico. Bezak, Šraj e Mikoš (2016) utilizaram dados de  $C_{ss}$  obtidos em estações de medição dos cursos hídricos ao longo de todo o território nacional da Eslovênia e identificaram que o valor máximo de  $C_{ss}$  ocorreu no verão e no outono, quando a precipitação é maior, enquanto os valores mínimos ocorreram no inverno. A influência da sazonalidade também foi observada por Kämriä *et al.* (2018), que, em um estudo no rio Vantaa, no sul da Finlândia, identificaram que a  $C_{ss}$  mensal ponderada apresentou valores mais altos durante o outono e o período de degelo da primavera, e a  $C_{ss}$  apresentou os picos mais altos durante o verão. He *et al.* (2019) realizaram um estudo no estuário do rio Yangtze, no sudeste da China, que buscou modelar as  $C_{ss}$  e a concentração de clorofila (Chla) com base nas imagens MODIS e descrever a influência das condições meteorológicas nas variáveis de qualidade da água. Nesse trabalho, foi identificado que os períodos chuvosos são os que apresentam maiores valores de  $C_{ss}$ . Zhang *et al.* (2017) realizaram um estudo no reservatório de Yügio, no nordeste de Tianjin, na China, em que coletaram amostras com frequência quinzenal entre os anos 2000 e 2011, e no qual foi observado que os valores de  $C_{ss}$  aumentaram de acordo com o aumento da precipitação no inverno.

Além da Q, a precipitação também tem sido utilizada como parâmetro para investigar a relação entre os ciclos hidrológicos e hidrossedimentológicos. O estudo realizado por He *et al.* (2019) buscou relacionar os valores acumulados de precipitação dos 15 dias anteriores com a  $C_{ss}$  utilizando o índice de correlação de Pearson e encontraram uma correlação significativa e positiva entre as duas variáveis (com coeficiente de correlação de Pearson variando entre 0,328 e 0,608). Pizarro *et al.* (2014) investigaram 19 diferentes bacias hidrográficas no sul do Chile a partir da precipitação média anual de cada bacia e das  $C_{ss}$  obtidas nas séries históricas, e concluíram que anos com mais precipitação estão associados a maiores  $C_{ss}$  e que as características da precipitação contribuem significativamente na dinâmica da carga de sedimentos em suspensão. Silva *et al.*

(2008) investigaram os impactos da precipitação na qualidade da água do rio Purus, no estado do Amazonas. As informações de qualidade de água foram obtidas por amostras feitas durante o período de 1998-2005 para diversas variáveis, e os resultados mostram que a precipitação parece ser o principal agente influenciador da qualidade da água, uma vez que o regime de chuva se correlaciona com as principais variáveis monitoradas, entre elas sólidos em suspensão. Hagemann e Gastaldini (2016) avaliaram diversos parâmetros de qualidade de água, entre eles sólidos em suspensão, na cidade de Santa Maria, no sul do Brasil, analisando a variação deles ao longo da precipitação. Foram coletadas amostras da água de chuva diretamente da atmosfera e após a passagem por telhado, e observaram que os valores de  $C_{ss}$  são maiores no início do escoamento, efeito da lavagem que ocorre nos primeiros milímetros da chuva, e que os parâmetros turbidez, sólidos totais, sólidos em suspensão e sólidos dissolvidos sofrem mais influência da precipitação. Righetto *et al.* (2017) monitoraram, entre julho e outubro de 2013, nove eventos de precipitação em uma bacia urbana da cidade de Natal, no nordeste do Brasil, e quantificaram a carga de poluente dos escoamentos superficiais gerados pelos eventos, para identificar a variação da qualidade da água ao longo da chuva. Identificaram que os eventos que resultaram em maior  $C_{ss}$  foram os que apresentaram maior intensidade de precipitação pluviométrica nos primeiros minutos dos eventos medidos.

Fenômenos naturais ou antrópicos podem interagir com os ciclos hidrológicos e hidrossedimentológicos e interferir na relação entre eles. Alguns estudos foram realizados em bacias menores, para que seja possível conhecer as interferências externas nos ciclos. Gong *et al.* (2016), por exemplo, realizaram um estudo em um campus universitário na cidade de Beijing, China, utilizando o programa computacional SWMM para simular a poluição urbana tendo como indicador a  $C_{ss}$  sob diferentes padrões de precipitação. Os resultados mostraram as influências não apenas das características da chuva, mas também da inundação da superfície na  $C_{ss}$ . Zuraini *et al.* (2018) investigaram a influência da característica da precipitação na  $C_{ss}$  do escoamento de águas pluviais de um campus universitário em Johor, Malásia, e observaram que a precipitação tem influência na  $C_{ss}$  ao longo do evento.

Com o objetivo de identificar a ocorrência do fenômeno da primeira descarga de lavagem (*Mass First Flush* (MFF)), Zhang *et al.* (2018) realizaram um estudo utilizando um simulador de chuva com o objetivo de identificar os efeitos da intensidade da precipitação e da declividade do solo na  $C_{ss}$  e na concentração de fósforo. Concluíram que a intensidade da chuva apresentou maior influência do que a declividade do solo na  $C_{ss}$  e que a  $C_{ss}$  apresentou maiores valores no início do escoamento superficial, efeito similar ao MFF, independentemente da declividade. Felice *et al.* (2018) utilizaram um simulador de chuva para avaliar o transporte de partículas em suspensão e dissolvidas no escoamento superficial sobre uma superfície impermeável em escala laboratorial. Observaram que o instante em que ocorre o pico do transporte de poluentes dissolvidos ou em suspensão é o mesmo quando a fonte de poluição está localizada próxima ao exutório. No entanto, quando a fonte está afastada do exutório, o transporte de poluentes dissolvidos é muito mais rápido do que o transporte das partículas em suspensão. No transporte de partículas em suspensão, só foi observado o efeito do MFF quando a fonte de poluição estava próxima ao exutório. No material dissolvido, foi observado o MFF em todas as situações. Girão *et al.* (2017) realizaram um estudo com o objetivo de modelar um sistema de drenagem em situação de inundação e o transporte de poluentes associados, utilizando a  $C_{ss}$  como parâmetro, e observou um pico de  $C_{ss}$  no início dos escoamentos simulados, caracterizando a ocorrência de MFF.

O presente trabalho teve como objetivo investigar o comportamento da  $C_{ss}$  no escoamento superficial urbano para que seja possível propor uma metodologia que permita correlacionar os dados de precipitação com a  $C_{ss}$ , estudar o comportamento sazonal da  $C_{ss}$  e investigar a ocorrência de MFF nos eventos estudados.

## METODOLOGIA

### Área de estudo

O presente estudo foi realizado no prédio do restaurante universitário da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL), *campus* Poços de Caldas, Minas Gerais. Foram coletadas amostras do escoamento superficial gerado no telhado metálico de uma edificação e na área impermeabilizada em seu entorno. O ponto de coleta foi a montante de um vertedor instalado na canaleta do edifício (1% de declividade).

A área de influência é de 311,26 m<sup>2</sup>, sendo 49,35 m<sup>2</sup> correspondentes ao piso de concreto e 261,91 m<sup>2</sup>, ao telhado metálico. A Figura 1 apresenta a área de influência.

### Materiais

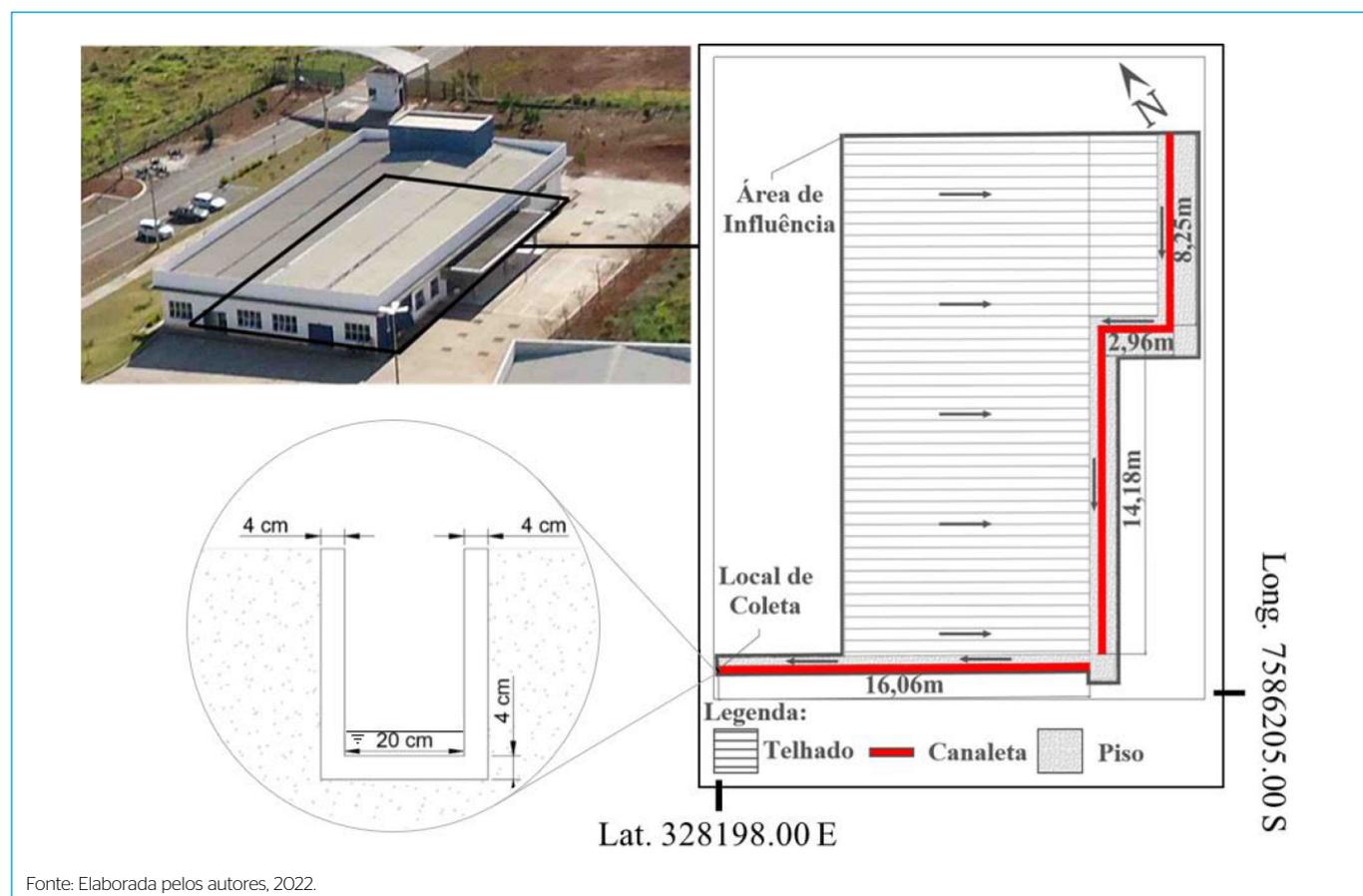
Um vertedor retangular com contração lateral foi instalado na canaleta para permitir a coleta das amostras de escoamento superficial. O vertedor é construído em acrílico e possui dimensões de 20 cm de largura, 4 cm de altura da soleira, com contração lateral de 4 cm em ambos os lados, como apresentou a Figura 1.

A coleta das amostras foi realizada pelo amostrador automático Teledyne ISCO 6712 F com um atuador de nível 1640 Teledyne ISCO acoplado para detectar a presença da água da chuva na canaleta. Em seguida, a amostra é succionada através de uma mangueira de vinil (plástico *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS)), com diâmetro de 3/8", que possui um filtro com corpo em polipropileno e aço inox nas extremidades para evitar a entrada de sólidos que possam entupir a mangueira. Após serem coletadas, as amostras seguem para o interior do amostrador com o auxílio de uma bomba peristáltica e são armazenadas em frascos apropriados. O amostrador 6712 F tem capacidade de coletar 24 amostras por evento e os frascos têm a capacidade de armazenar volume de até 1 L.

Neste estudo, foram utilizados uma bomba a vácuo Prismatec modelo 121 e filtros de fibra de vidro com porosidade de 1 µm e diâmetro de 47 mm para filtrar as amostras do escoamento superficial. Após a realização da filtragem, os filtros foram dispostos em cadinhos de porcelana e levados à estufa modelo SL-102 da Solab e pesados em uma balança analítica modelo FA2204B, para determinar a  $C_{ss}$ .

Um pluviômetro semiautomático Delta Ohm HD-2013-DB instalado no *campus* de Poços de Caldas da UNIFAL, nas coordenadas UTM lat. 328247.00 e long. 7586236.00 s, foi utilizado para monitorar a precipitação do local paralelamente à coleta das amostras.

Para a obtenção da carga hidráulica sobre o vertedor, utilizou-se um sensor de nível (sonda *levellogger* da marca Solinst, modelo 3001), possibilitando o cálculo da Q do escoamento superficial gerada pelos eventos de precipitação.



Fonte: Elaborada pelos autores, 2022.

Figura 1 - Área de influência.

## Método

O amostrador foi programado para a coleta sequencial de amostras, com volume de 100 mL<sup>-1</sup> cada. A coleta se inicia após a detecção de água na canaleta pelo atuador de nível, e se encerra ao completar o limite de 24 frascos do equipamento ou cessar o escoamento. A coleta de cada amostra (100 mL<sup>-1</sup>) ocorria em aproximadamente 1 minuto e não foi programado tempo de espera entre as coletas das amostras; portanto, o programa completo do amostrador (24 amostras) tem cerca de 24 minutos. Após a coleta, as amostras foram levadas ao laboratório para a realização das análises de  $C_{ss}$ , seguindo a metodologia de análise APHA (2005), descrita a seguir.

Inicialmente, preparou-se o filtro de fibra de vidro, por meio da sucção com água destilada, e, em seguida, a secagem na estufa e aferição da massa com auxílio da balança analítica. Esse procedimento foi realizado até que os valores de pesagem fossem constantes ou apresentassem diferença inferior a 4%.

Em seguida, realizou-se a filtração da amostra, e um novo ciclo de secagem na estufa com posterior aferição de massa. Seguindo o mesmo procedimento do preparo, as pesagens foram realizadas até que se obtivessem massas constantes ou apresentassem diferença inferior a 4%.

A  $C_{ss}$  foi determinada por meio da relação entre os valores de massa dos sólidos obtida por meio da pesagem e do volume das amostras (100 mL<sup>-1</sup>).

A Q do escoamento superficial foi calculada por meio do método indicado por Porto (2001) para vertedores com influência de contração lateral, por meio da Equação 1, apresentada a seguir.

$$Q = 1,838 \cdot (L - 0,20h) \cdot h^{3/2} \quad (1)$$

Em que:

Q = vazão, em m<sup>3</sup>/s;

L = largura do vertedouro, em metros;

h = altura da lâmina da água do escoamento superficial ajustada pela altura correspondente da soleira, em metros.

A altura da lâmina d'água foi determinada por meio do sensor de nível e subtraída pela altura da soleira. A descarga sólida foi determinada multiplicando os valores de Q pela  $C_{ss}$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste estudo, foram realizadas coletas de amostras de escoamentos superficiais gerados por 28 eventos de precipitação diferentes durante todo os meses de janeiro de 2019 a janeiro de 2020. Para todos os eventos foram obtidos os dados das precipitações e realizada a análise da  $C_{ss}$  das amostras. A Tabela 1 apresenta os resultados.

### Análise de sazonalidade

A Figura 2 apresenta os gráficos com as variações das precipitações e da concentração de sólidos suspensos de pico ( $C_{ss}^{pico}$ ) e da concentração média de sólidos suspensos ( $C_{ss}^{med}$ ) ao longo dos meses em que foram realizadas as coletas das amostras.

No período de novembro de 2019 a janeiro de 2020, em que ocorreu a maior quantidade de precipitação na área de estudo, os valores de  $C_{ss}^{pico}$  e  $C_{ss}^{med}$  apresentaram-se baixos em razão da constante lavagem das superfícies. O pico

dos valores de  $C_{ss}^{pico}$  e  $C_{ss}^{med}$  em setembro de 2019 indica que após o período de estiagem na região as primeiras precipitações transportaram bastante material sólido depositado nas superfícies. O pico dos valores  $C_{ss}^{pico}$  e  $C_{ss}^{med}$ , verificados em janeiro e fevereiro de 2019, ocorreu em período de grande precipitação. Não há histórico anterior que possa ser utilizado para comparação. Esse efeito pode ser causado por ações antrópicas em razão do período de férias escolares associado à limpeza das superfícies ao nível do terreno. A análise da Figura 2 permite observar a sazonalidade mostrando que os dados corroboram com o que foi observado nos estudos de Bezak, Šraj e Mikoš (2016), Kãmãria *et al.* (2018), He *et al.* (2019) e Zhang *et al.* (2017), que observaram influência das características das estações do ano no comportamento das curvas de  $C_{ss}$ .

### Cálculo da vazão, do volume e da massa transportada

Neste trabalho, foram medidas as vazões de 23 desses eventos, por meio do método indicado. Nos demais eventos, não foi possível medir a Q, pois os dados da altura da lâmina d'água foram perdidos em razão de problemas operacionais com o equipamento de medição.

Com os dados de precipitação, Q e  $C_{ss}$  desses eventos, foi calculada a descarga sólida ao longo do tempo e foram traçados gráficos Q *versus* tempo, precipitação *versus* tempo,  $C_{ss}$  *versus* tempo e descarga sólida *versus* tempo, como mostra a Figura 3.

Na Figura 3, a coluna A apresenta o hidrograma que permite obter as informações sobre a Q escoada e a precipitação ocorrida no local de estudo; a coluna B, o comportamento da  $C_{ss}$  ao longo do tempo; e a coluna C, o polutograma que permite obter as informações sobre a massa de sedimentos em suspensão transportada pelo escoamento superficial. Essas informações são apresentadas para os primeiros 40 minutos dos eventos de precipitação.

Determinou-se o volume de água escoado correspondente a cada evento de precipitação, pela integral do hidrograma, e a massa total transportada dos eventos pela integral do polutograma. A Tabela 2 foi elaborada com base nos dados obtidos desses eventos.

### Correlação entre precipitação e concentração de sólidos suspensos

Diversos estudos em todo o mundo vêm demonstrando que a  $C_{ss}$  no escoamento superficial é influenciada pela precipitação, por exemplo, os estudos de He *et al.* (2019), Pizarro *et al.* (2014), Hagemann e Gastaldini (2016) e Righetto *et al.* (2017). Neste estudo, buscou-se correlacionar os dados de precipitação obtidos nos eventos com os dados de  $C_{ss}$  utilizando os dados apresentados na Tabela 3.

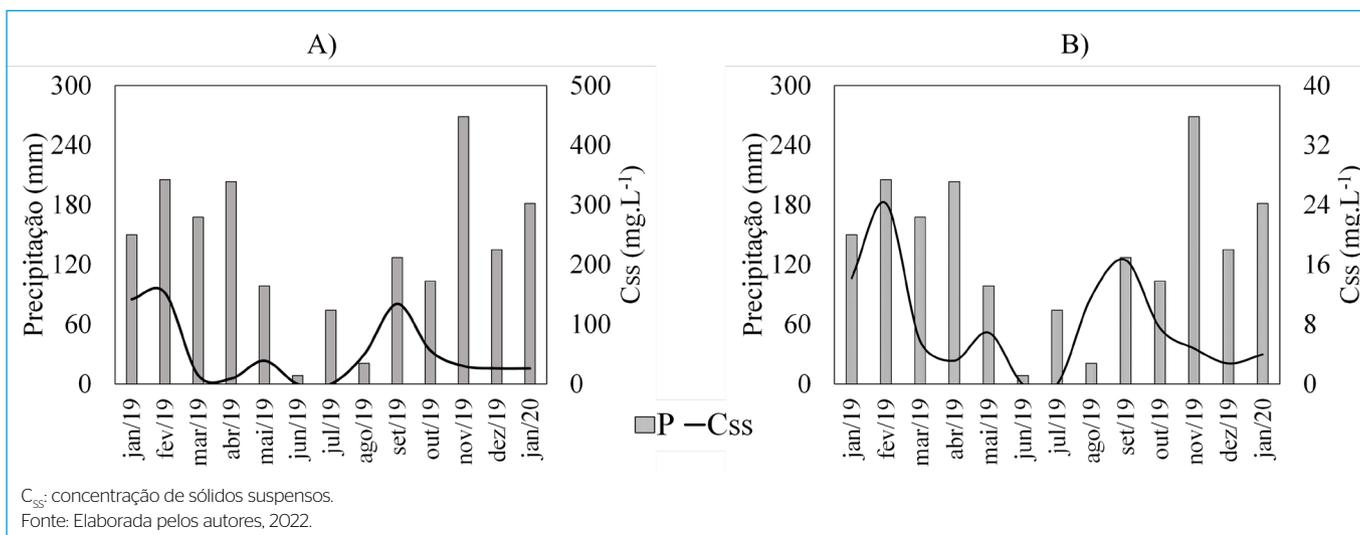
Alguns autores identificaram que a precipitação no início dos eventos tem forte influência na  $C_{ss}$ . Hagemann e Gastaldini (2016) e Righetto *et al.* (2017) constataram que os valores de  $C_{ss}$  são maiores no início dos escoamentos superficiais e que eventos com maiores intensidades de precipitação no início do escoamento apresentam maiores valores de  $C_{ss}$ . Com base nessas informações, foi utilizada, neste estudo, a precipitação nos primeiros 10 minutos ( $P_{10m}$ ) para relacionar com a  $C_{ss}^{pico}$  e a  $C_{ss}^{med}$  dos eventos, como mostra a Figura 4.

Observou-se baixa correlação, evidenciada pelo R<sup>2</sup>. Considerando que a precipitação do período anterior aos eventos amostrados ocasiona a lavagem da superfície e reduz a quantidade de sedimentos em suspensão transportados durante os eventos amostrados, optou-se por correlacionar a precipitação ocorrida nos sete dias anteriores aos eventos ( $P_{7D}$ ) com a  $C_{ss}$ , como apresenta a Figura 5.  $C_{ss}^{pico}$ .

Tabela 1 - Dados dos eventos monitorados.

Evento	Data	P <sub>total</sub> (mm)	P <sub>amos</sub> (mm)	C <sub>SS</sub> <sup>pico</sup> (mg.L <sup>-1</sup> )	C <sub>SS</sub> <sup>med</sup> (mg.L <sup>-1</sup> )
1	22/01/2019	4,0	4,0	142	24,93
2	23/01/2019	2,0	1,8	100	14,00
3	31/01/2019	11,2	3,4	16	7,16
4	04/02/2019	5,8	5,6	153	29,38
5	06/02/2019	4,8	2,4	54	16,00
6	14/03/2019	14,2	2,2	15	5,75
7	08/04/2019	23,0	2,6	8	3,96
8	16/04/2019	13,0	3,6	9	2,00
9	14/05/2019	3,6	3,0	39	6,38
10	16/05/2019	41,4	1,2	24	7,41
11	20/08/2019	4,0	1,8	49	11,70
12	03/09/2019	4,2	3,4	67	13,25
13	25/09/2019	70,6	4,2	134	33,00
14	25/09/2019	70,6	0,6	31	3,58
15	07/10/2019	7,8	0,6	56	9,39
16	24/10/2019	5,2	3,4	52	7,75
17	29/10/2019	3,0	2,4	27	5,50
18	31/10/2019	2,6	2,6	49	7,50
19	05/11/2019	21,6	0,2	24	8,25
20	05/11/2019	21,6	2,2	30	3,88
21	05/12/2019	7,4	2,4	26	8,75
22	11/12/2019	19,2	1	8	2,26
23	12/12/2019	16,2	6,4	24	2,25
24	08/01/2020	1,6	0,6	26	7,36
25	08/01/2020	1,6	0,2	24	6,32
26	10/01/2020	1	0,6	11	2,04
27	20/01/2020	8,2	8	13	3,25
28	22/01/2020	2,8	1,4	12	2,875

P<sub>total</sub>: precipitação total medida pelo pluviômetro durante o dia da coleta da amostra; P<sub>amos</sub>: precipitação durante o período em que foram coletadas as amostras; C<sub>SS</sub><sup>pico</sup>: maior valor obtido de concentração de sólidos em suspensão entre as amostras coletadas no evento; C<sub>SS</sub><sup>med</sup>: média das concentrações de sólidos em suspensão de todas as amostras coletadas no evento.

Figura 2 - Variação sazonal (A) da C<sub>SS</sub><sup>pico</sup> e (B) da C<sub>SS</sub><sup>med</sup>.

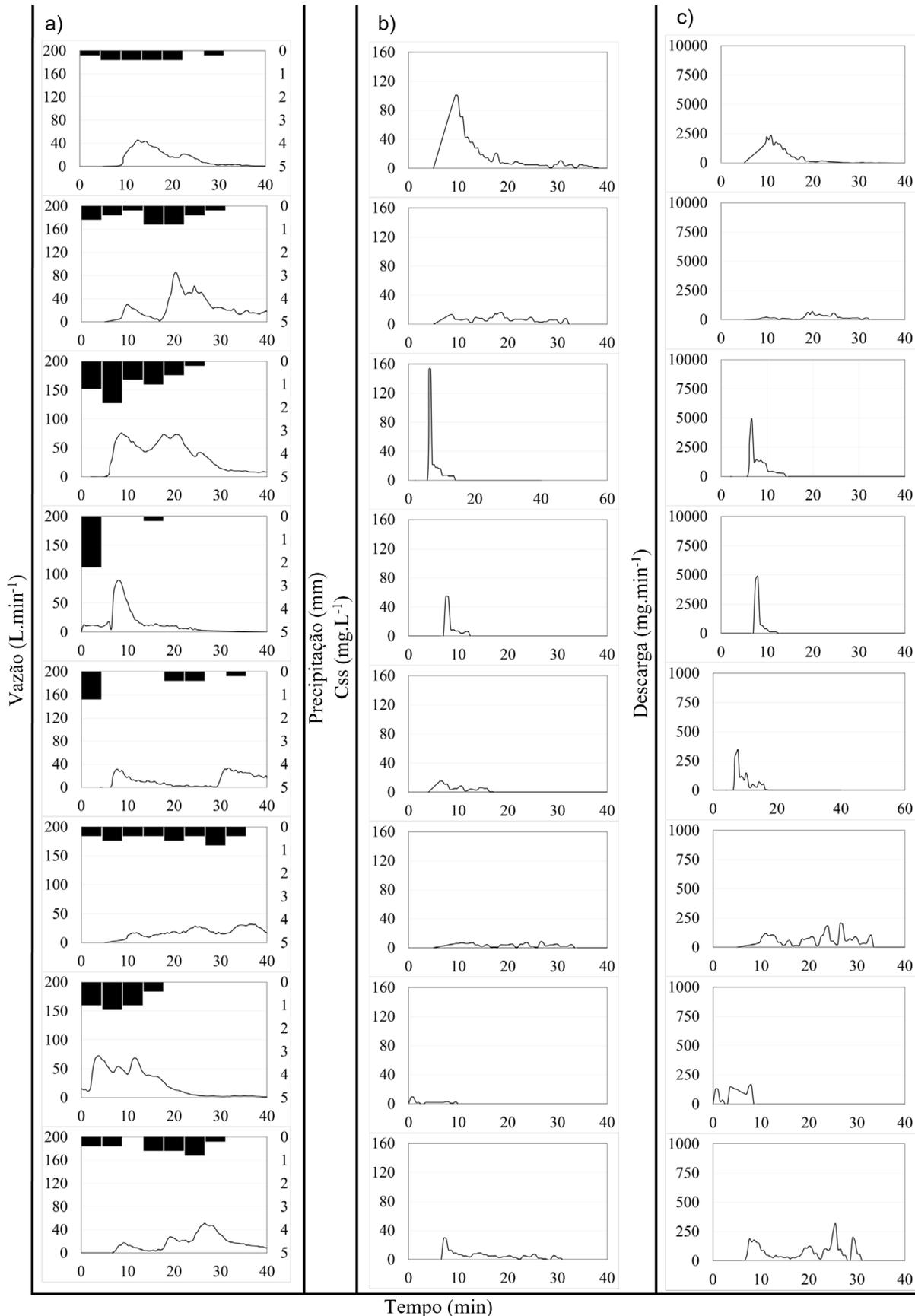


Figura 3 - Massa transportada ao longo dos eventos.

Continua...

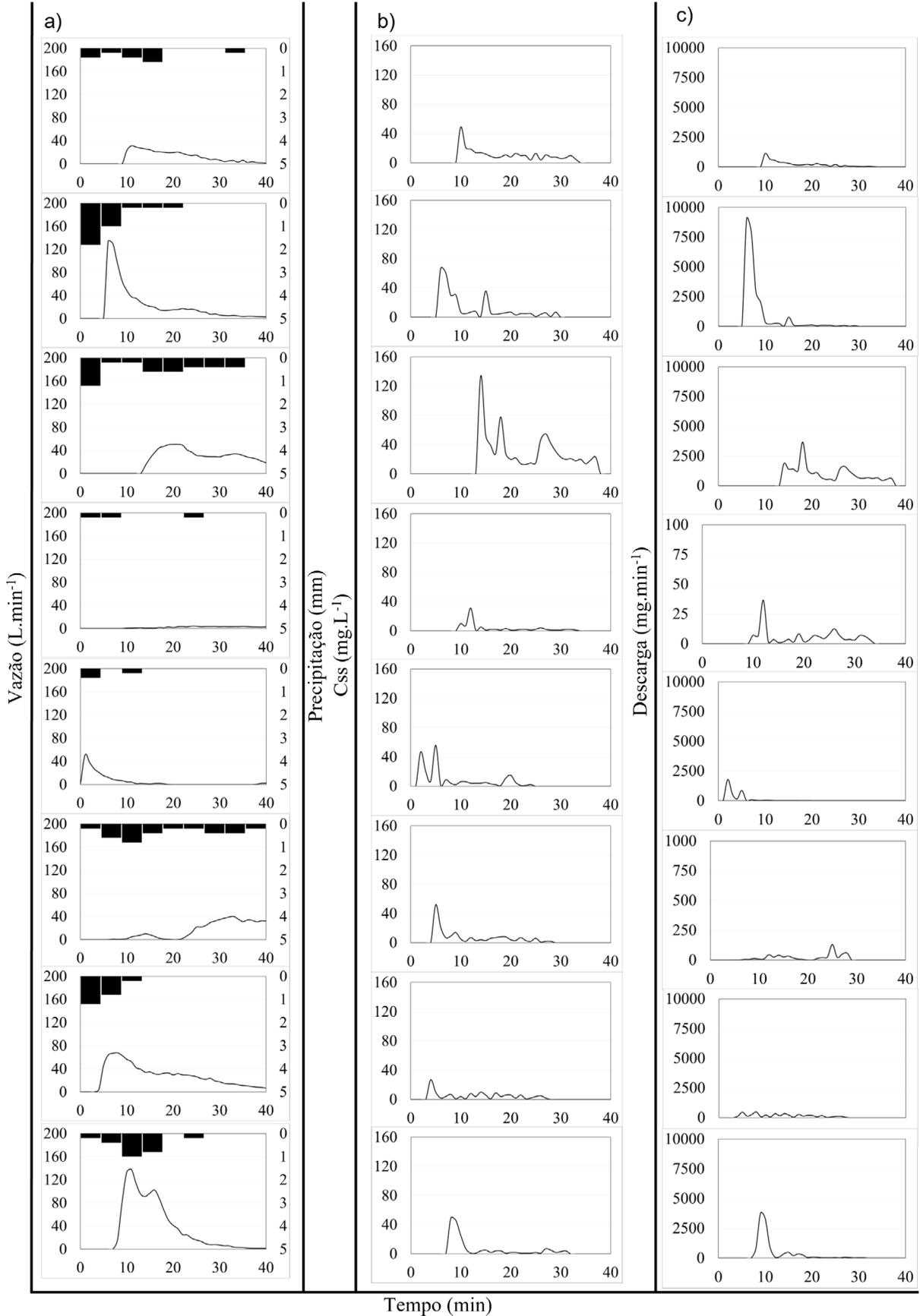
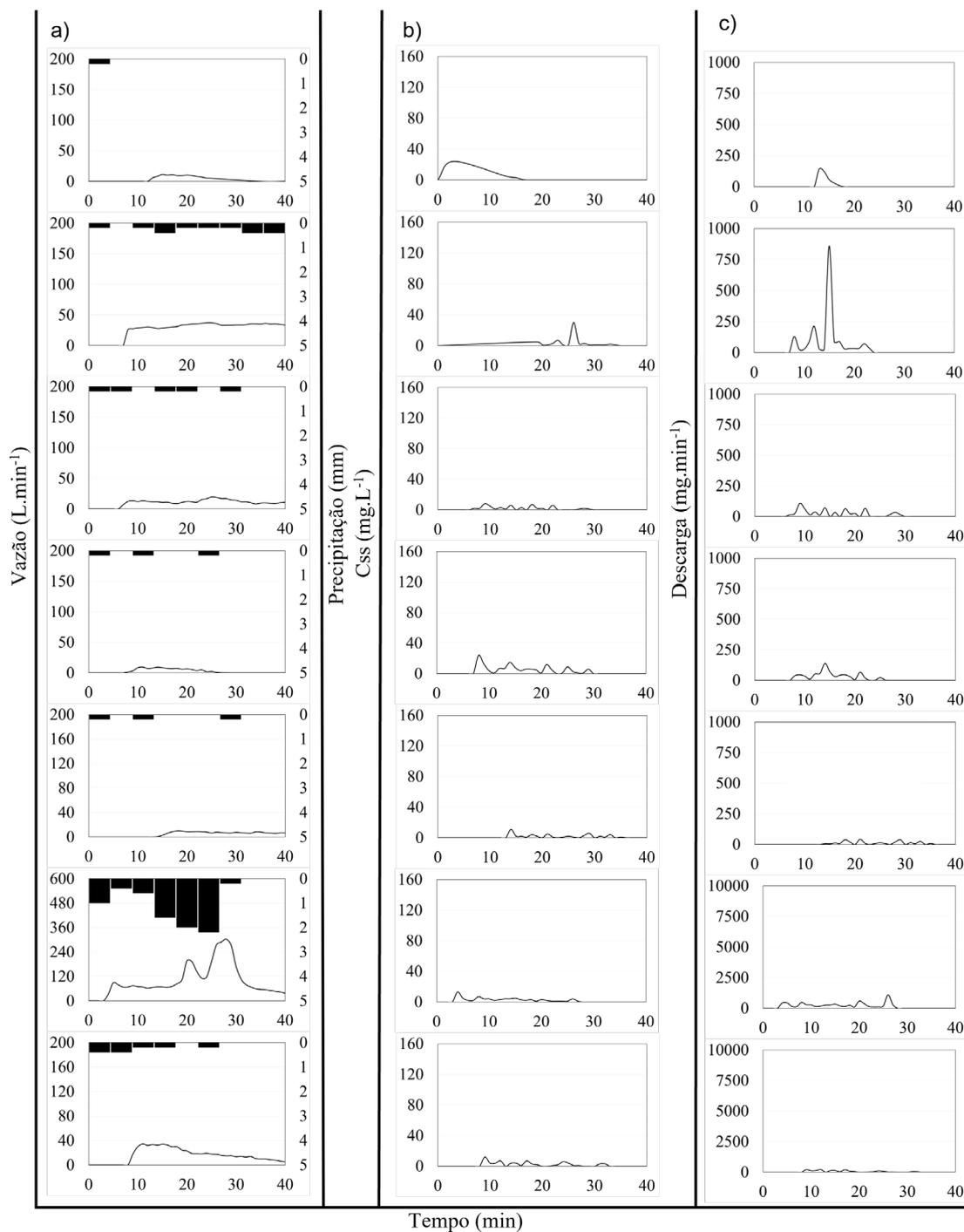


Figura 3 - Continuação.

Continua...



C<sub>ss</sub>: concentração de sólidos suspensos.  
 Fonte: Elaborada pelos autores, 2022.

**Figura 3 - Continuação.**

Após verificar que a relação entre a  $P_{7D}$  e a  $C_{ss}$  não foi satisfatória, correlacionou-se a  $C_{ss}$  em função de  $P_{10m}/P_{7D}$ , pois espera-se que a  $P_{7D}$  seja inversamente proporcional à  $C_{ss}$  e possa aprimorar os resultados obtidos anteriormente. Levando em conta essas considerações, a  $P_{10m}$  foi dividida pela  $P_{7D}$  e correlacionada com a  $C_{ss}^{pico}$  e a  $C_{ss}^{med}$ , como mostra a Figura 6.

Observa-se uma melhora significativa na correlação entre as variáveis relacionadas à precipitação e a  $C_{ss}^{med}$ ,  $R^2$  aumentou de 0,2657 e 0,2357 para 0,7166

e 0,7337, para  $C_{ss}^{pico}$  e  $C_{ss}^{med}$ , respectivamente. A análise, a partir da  $P_{7D}$ , apresenta como limitações eventos específicos, pois o período de apenas sete dias anteriores é curto e pode não ocorrer precipitação. Em razão dessa limitação, não foi possível realizar a análise dos eventos 11 e 13.

Para aprimorar as análises e incluir os dados dos eventos 11 e 13, foi utilizada uma constante (K). K é uma constante de correção utilizada apenas quando a  $P_{7D} < 1$  mm; ela foi ajustada para cada situação pelo método dos mínimos

**Tabela 2 - Coeficientes de escoamento.**

Evento	Data	Volume (L)	Massa transportada (mg)
2	23/01/2019	486,63	11615,96
3	31/01/2019	878,99	4951,57
4	04/02/2019	1497,81	9258,04
5	06/02/2019	598,70	6049,95
6	14/03/2019	543,61	1027,84
7	08/04/2019	991,51	1689,23
8	16/04/2019	934,92	782,60
9	14/05/2019	766,86	2018,54
11	20/08/2019	431,54	5572,56
12	03/09/2019	880,03	24573,25
13	25/09/2019	1047,04	25425,64
14	25/09/2019	94,51	147,67
15	07/10/2019	94,45	3555,52
16	24/10/2019	878,87	558,39
17	29/10/2019	542,67	4239,70
18	31/10/2019	654,87	11208,69
19	05/11/2019	55,99	362,46
20	05/11/2019	536,12	1826,49
23	11/12/2019	206,62	617,30
25	08/01/2020	55,99	714,06
26	10/01/2020	94,31	285,13
27	20/01/2020	2167,47	6915,18
28	22/01/2020	318,56	1679,65

quadrados. Para realizar a correlação com os valores de  $C_{ss}$ , foi obtido o coeficiente de precipitação ( $C_p$ ) pela Equação 2:

$$C_p = P_{10m} / (K + P_{7D}) \quad (2)$$

Em que:

$C_p$  = coeficiente de precipitação;

$P_{10m}$  = precipitação nos primeiros 10 minutos do evento;

$P_{7D}$  = precipitação ocorrida nos sete dias anteriores ao evento;

$K$  = constante de correção utilizada apenas quando a  $P_{7D} < 1$  mm e ajustada pelo método dos mínimos quadrados.

O  $C_p$  foi relacionado com os valores de  $C_{ss}$ , como mostra a Figura 7.

O valor obtido para a constante  $K$  foi de 6 mm para a  $C_{ss}^{pico}$  e de 4,5 mm para a  $C_{ss}^{med}$ . Observa-se, na Figura 7, o aumento do  $R^2$  em relação aos apresentados na Figura 6 (sem considerar  $K$ ), o que permite inferir que a metodologia proposta (considerar  $K$ ) é válida.

A análise da probabilidade de significância, utilizando o coeficiente de Person ( $r$ ), mostrou que tanto para a concentração de pico quanto para a média, resultou em nível de significância ( $\alpha$ ) menor que 0,001. O valor crítico de  $r$ , considerando

**Tabela 3 - Variáveis utilizadas nas análises.**

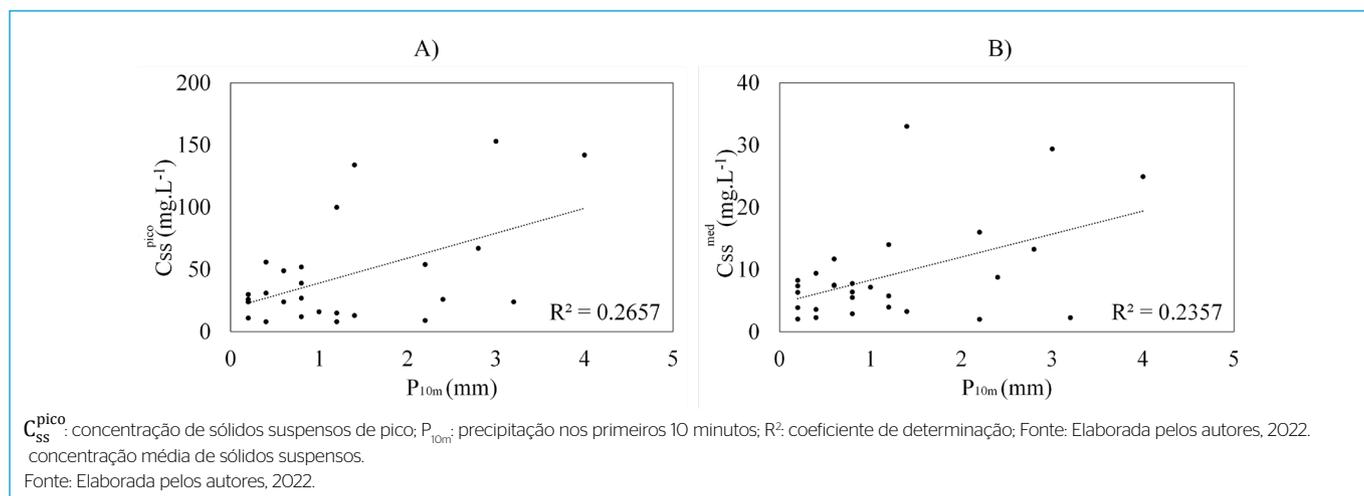
Evento	$P_{10m}$ (mm)	$P_{7D}$ (mm)	$C_{ss}^{pico}$ (mg.L <sup>-1</sup> )	$C_{ss}^{med}$ (mg.L <sup>-1</sup> )
1	4,0	15,2	142	24,93
2	1,2	14,6	100	14,00
3	1,0	47,4	16	7,16
4	3,0	12,0	153	29,38
5	2,2	18,6	54	16,00
6	1,2	12,0	15	5,75
7	1,2	44,2	8	3,96
8	2,2	145,2	9	2,00
9	0,8	10,4	39	6,38
10	0,6	14,0	24	7,41
11	0,6	-	49	11,70
12	2,8	29,0	67	13,25
13	1,4	-	134	33,00
14	0,4	67,0	31	3,58
15	0,4	8,2	56	9,39
16	0,8	5,6	52	7,75
17	0,8	55,0	27	5,50
18	0,6	65,4	49	7,50
19	0,2	38,0	24	8,25
20	0,2	38,2	30	3,88
21	2,4	59,0	26	8,75
22	0,4	47,4	8	2,26
23	3,2	81,8	24	2,25
24	0,2	80,6	26	7,36
25	0,2	82,0	24	6,32
26	0,2	31,2	11	2,04
27	1,4	20,6	13	3,25
28	0,8	23,6	12	2,86

$P_{10m}$ : precipitação nos primeiros 10 minutos dos eventos;  $P_{7D}$ : precipitação ocorrida nos sete dias anteriores aos eventos amostrados;  $C_{ss}^{pico}$ : maior valor obtido de concentração de sólidos em suspensão entre as amostras coletadas no evento;  $C_{ss}^{med}$ : concentração média de sólidos suspensos.

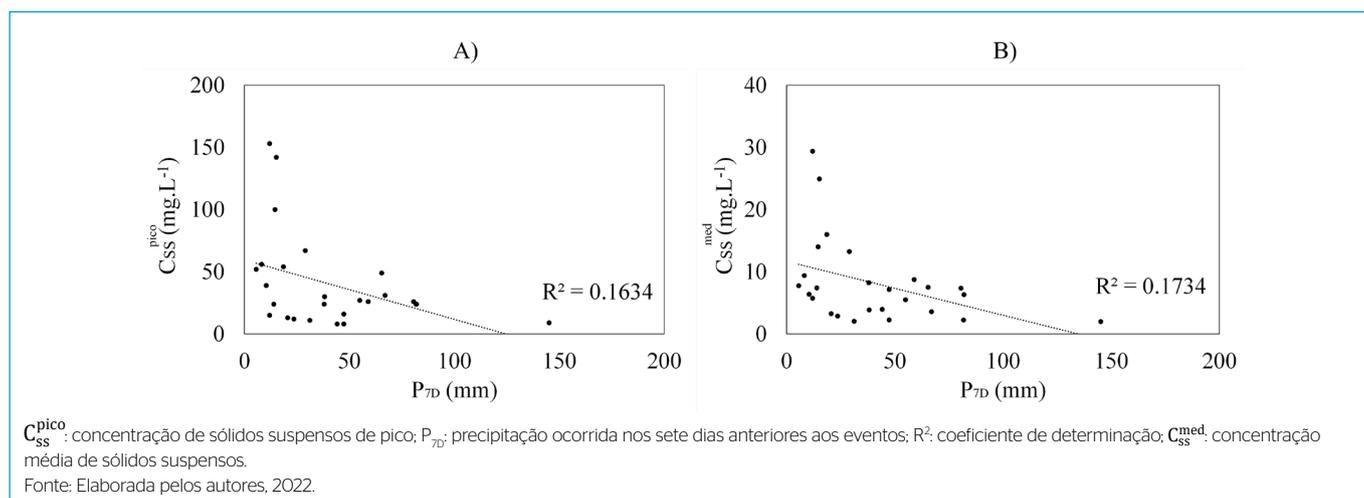
25 pares de valores ( $N$ ) e  $\alpha = 0,001$ , é de 0,618. Os valores de  $r = \sqrt{R}$  obtidos a partir do ajuste da Figura 7 são de 0,8599 e 0,9030, ambos maiores que  $r$  crítico, o que permite rejeitar a hipótese nula. Desse modo, pode-se inferir que a relação linear apresentada tem significância estatística.

### Primeira descarga de lavagem (Mass First Flush)

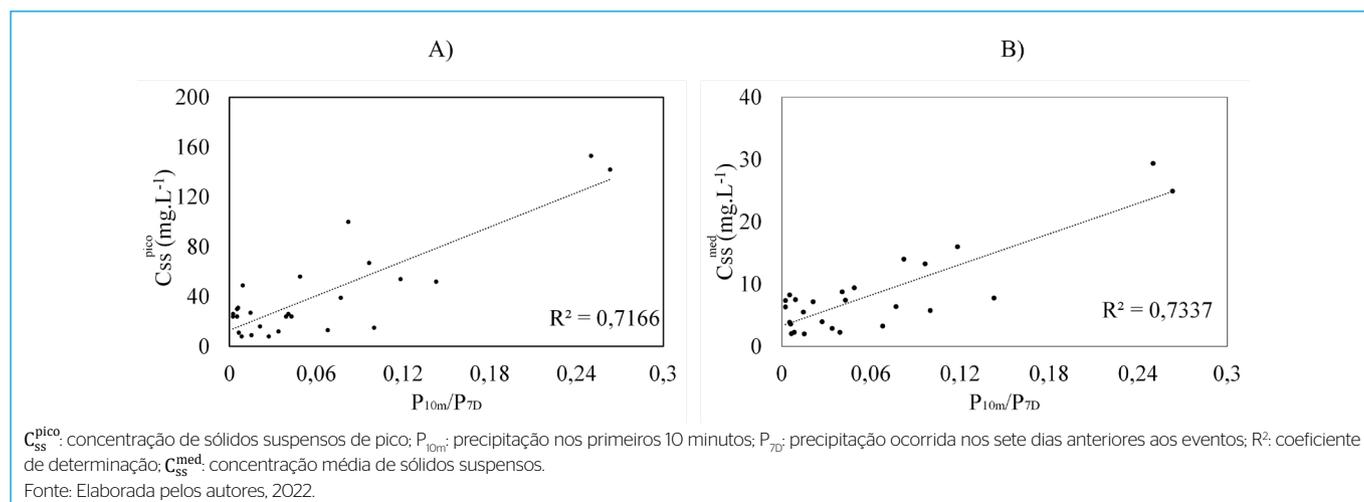
As análises sobre o fenômeno de *First Flush* podem ser feitas a partir da distribuição de massa transportada e volume do escoamento em curvas  $M(V)$ , em que alguns estudos, como Sansalone e Buchberger (1997), propõem que o fenômeno pode ser observado quando as curvas estão acima da bissetriz do gráfico, e outros, como Deletic (1998), consideram que a ocorrência de MFF pode ser



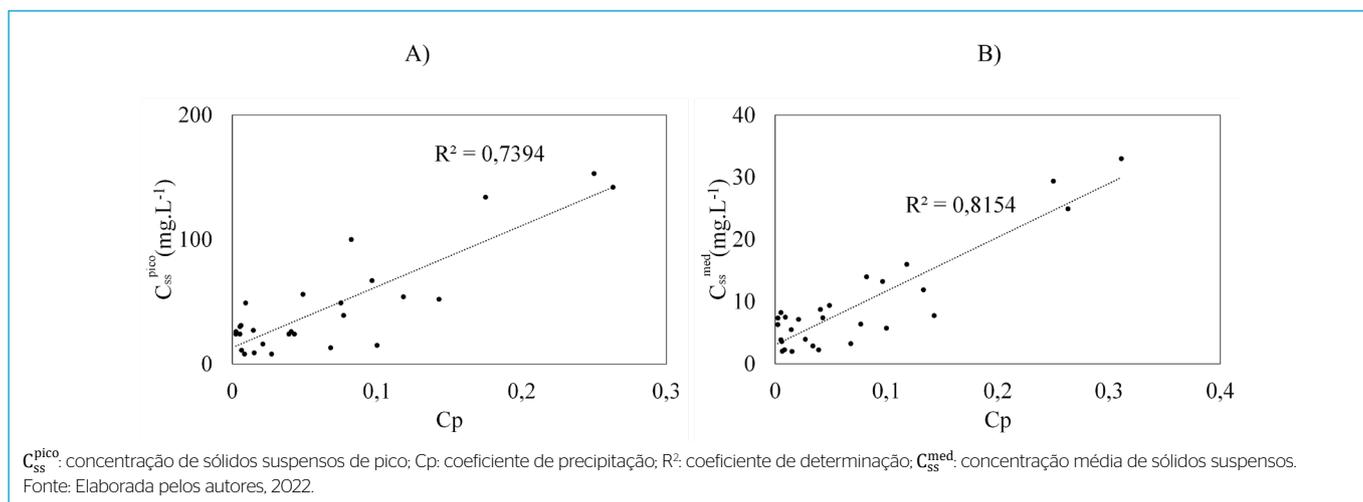
**Figura 4** - Relação entre (A)  $C_{SS}^{pico}$  e  $P_{10m}$  e entre (B)  $C_{SS}^{med}$  e  $P_{10m}$ .



**Figura 5** - Relação entre (A)  $C_{SS}^{pico}$  e  $P_{7D}$  e entre (B)  $C_{SS}^{med}$  e  $P_{7D}$ .



**Figura 6** - Relação entre (A)  $C_{SS}^{pico}$  e  $(P_{10m}/P_{7D})$  e entre (B)  $C_{SS}^{med}$  e  $(P_{10m}/P_{7D})$ .



**Figura 7** - Relação entre (A)  $C_{ss}^{pico}$  e  $C_p$  e entre (B)  $C_{ss}^{med}$  e  $C_p$ .

identificada em eventos de precipitação nos quais mais de 20% da massa é carregada nos primeiros 20% do volume escoado.

Dessa forma, para a análise dos dados foi utilizado o conceito de MFF, empregando-se a Equação 3:

$$MFF = M^*/V^* \quad (3)$$

Em que:

MFF: *Mass First Flush*;

$M^*$  = valor de massa transportada acumulada até determinado instante dividido pela massa total transportada no evento;

$V^*$  = valor de volume escoado acumulada até determinado instante dividido pelo volume total escoado ao longo do evento.

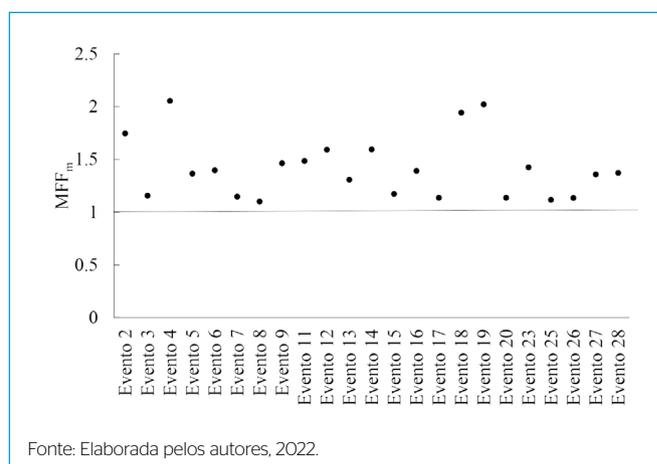
Quando o valor de MFF é superior a 1, pode-se concluir que a massa foi transportada mais rapidamente que o volume de água escoado, indicando a ocorrência do fenômeno de *First Flush*.

A Figura 8 apresenta o valor de *Mass First Flush* médio ( $MFF_m$ ) para cada evento.

Observa-se que os 23 eventos monitorados apresentaram, em termos médios, a ocorrência de *First Flush*. Resultados semelhantes aos apresentados por Righetto *et al.* (2017), que, por meio do estudo de nove eventos de precipitação em uma bacia urbana da cidade de Natal, no estado do Rio Grande do Norte, observaram a ocorrência do fenômeno para  $C_{ss}$  em sete deles.

Nos eventos 8, 17, 20, 25 e 26, o fenômeno de  $MFF_m$  ocorreu em menor intensidade ( $MFF_m < 1,14$ ), e foi possível observar períodos em que o MFF era menor do que 1, mas, na média, maior que 1, sugerindo que a precipitação que ocorre no período anterior impacta na quantidade de sólidos transportados no evento amostrado.

Os eventos 4, 18 e 19 foram os que apresentaram maior intensidade de *First Flush*, porém não foi possível constatar a ocorrência de períodos secos antecedentes ao evento como uma circunstância que poderia intensificar o fenômeno, como as apresentadas por Saget *et al.* (1995) e Costa *et al.* (2017), que atribuíram um período de estiagem que precede o evento amostrado como um fator ligado diretamente ao *First Flush*.



**Figura 8** - *Mass First Flush* médio.

## CONCLUSÕES

Na análise de sazonalidade, foi observado que as características das estações do ano têm influência no transporte de  $C_{ss}$ . O verão, período em que ocorre a maior quantidade de precipitação na localidade do estudo, apresentou os maiores valores de  $C_{ss}^{pico}$  e  $C_{ss}^{med}$ , e o inverno os menores, corroborando com o que foi verificado na literatura.

Para a correlação das características da chuva com a  $C_{ss}$  foi proposta uma metodologia que se baseou nos dados de  $P_{10m}$  e de  $P_{7D}$ . Com essa metodologia foi possível obter valores de correlações significativos ( $R^2 = 0,7394$  e  $R^2 = 0,8154$  para os dados de  $C_{ss}^{pico}$  e  $C_{ss}^{med}$ , respectivamente). O método se mostrou satisfatório para aplicação em uma pequena área, com alto índice de impermeabilização e pouca interferência externa.

Neste trabalho, foi observada a ocorrência de  $MFF_m$  em todos os eventos estudados, alguns com maior e outros com menor intensidade. Por se tratar de uma bacia com alto índice de impermeabilidade, é esperado que a maior parte da massa seja transportada no início do escoamento.

O método proposto neste trabalho apresentou resultados satisfatórios para a característica da área de estudo. No entanto, seria interessante testar sua aplicabilidade em bacias com características distintas, por exemplo, bacias maiores, com interferência externa e menor grau de impermeabilidade.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais — FAPEMIG (APQ-01982-14), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-Brasil — CAPES (88881.030412/2013-01) e à Financiadora de Estudos e Projetos — Finep (01.13.0455.00).

## CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Silveira, A.: Conceituação, Obtenção de Financiamento, Metodologia, Escrita – Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição. Assis, L.C.L.: Investigação, Metodologia, Escrita – Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição. Buffo, M.M.: Investigação, Metodologia, Escrita – Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição.

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). Standard methods for the examination of water and wastewater. American Water Works Association (AWWA); Water Environment Federation (WEF). 21. ed. Washington, 2005.
- BEELER, K. R.; MITCHELL, R. J. Sediment and phosphorus inputs from perennial streams to Lake Whatcom. Washington State. Environmental and Engineering Geoscience, Washington, v. 23, n. 3, p. 153-164, 2017. <https://doi.org/10.25710/39hp-fc03>.
- BEZAK, N.; SRAJ, M.; MIKOS, M. Analyses of suspended sediment loads in Slovenian rivers. Hydrological Sciences Journal, [s.l.], v. 61, n. 6, p. 1094-1108, 2016.
- COSTA, M. E.; SOUZA, F.P.; ROQUE, D. F. D.; KOIDE, S. Analysis of urban stormwater runoff quality and first flush phenomenon. In: 14TH ICUD - INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN DRAINAGE, Prague, France, 2017.
- DELETIC, A. The first flush load of urban surface runoff. Water Research, v. 32, n. 8, p. 2462-2470, 1998.
- FELICE, J. G.; SILVEIRA, A.; ISIDORO, J. M. P. G.; GONÇALVES, F. A.; SILVA, A. M. da. Simulação do transporte de partículas em suspensão e de poluentes dissolvidos pelo escoamento em superfícies impermeáveis: uma contribuição ao saneamento urbano. Engenharia Sanitária e Ambiental, [s.l.], v. 23, n. 2, p. 405-414, 2018.
- GARRIDO, J. W.; SOUSA, T. M. I. de.; ISMAEL, L. L.; CRISPIM, D. L.; FERREIRA, P. M. L.; QUEIROZ, M. M. F. de. Determinação das curvas-chave de descargas de sedimentos em suspensão na bacia hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu. Engenharia Sanitária e Ambiental [s.l.], v. 23, n. 1, p. 69-75, 2018.
- GIRÃO, L. F. O.; SIMÕES, N. E. C.; MARQUES, J. A. A. S.; LEITÃO, J. P. C.; PINA, R. D. Modelação hidráulica e de qualidade da água dos sistemas de drenagem em meios urbanos. Engenharia Sanitária e Ambiental [s.l.], v. 22, n. 2, p. 351-360, 2017.
- GONG, Y.; XIAOYING, L.; XIAONING, L.; JUNQI, L.; XING, F.; RUINING, S. Influence of rainfall characteristics on total suspended solids in urban runoff: a case study in Beijing, China. Water, Beijing, China, p. 278-285, 2016.
- HAGEMANN, S. E.; GASTALDINI, M. C. C. Variação da qualidade da água de chuva com a precipitação: aplicação à cidade de Santa Maria - RS. RBRH, v. 21, n. 3, p. 525-536, 2016.
- HE, C.; YAO, Y.; LU, X.; CHEN, M.; MA, W.; ZHOU, L. Exploring the influence mechanism of meteorological conditions on the concentration of suspended solids and chlorophyll-a in large estuaries based on MODIS imagery. Water, Shanghai, China, v. 11, n. 2, p. 375, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11020375>
- KÄMÄRI, M.; TATTARI, S.; LOTSARI, E.; KOSKIAHO, J.; LLOYD, C. E. M. High-frequency monitoring reveals seasonal and event-scale water quality variation in a temporally frozen river. Journal of Hydrology, Joensuu, Finlândia, p. 619-639, 2018.
- PORTO, R. M. Hidráulica básica. 2. ed. São Carlos: 2001.
- PIZARRO, J.; VERGARA, P. M.; MORALES, J. M.; RODRIGUEZ, J. M.; PINTO, I. V. Influence of land use and climate on the load of suspended solids in catchments of Andean rivers. Environmental Monitoring and Assessment, Santiago, Chile, p. 835-843, 2014.
- RIGHETTO, A. M.; GOMES, K. M.; FREITAS, F. R. S. Poluição difusa nas águas pluviais de uma bacia de drenagem urbana. Engenharia Sanitária e Ambiental, [s.l.], v. 22, n. 6, p. 1109-1120, 2017.
- SAGET, A.; CHEBBO, G.; BERTRAND-KRAJEWSKI, J.L. The first flush in sewer systems. Water Science and Technology, v. 33, n. 9, p. 101-108, 1996.
- SANSALONE, J. J.; BUCHBERGER, S. G. Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water. Journal of Environmental Engineering, v. 123, n. 2, p. 134-143, 1997.
- SILVA, A. E. P.; ANGELIS, C. F.; MACHADO, L. A. T.; WAICHAMAN, A. V. Influência da precipitação na qualidade da água do Rio Purus. Acta Amazônica [s.l.], v. 38, n. 4, p. 733-742, 2008.
- SOUZA, M. M.; GASTALDINI, M. C. C. Avaliação da qualidade da água em bacias hidrográficas com diferentes impactos antrópicos. Engenharia Sanitária e Ambiental [s.l.], v. 19, n. 3, p. 263-274, 2014.
- ZHANG, C.; ZHANG, W.; HUANG, Y.; XUEPING, G. Analysing the correlations of long-term seasonal water quality parameters, suspended solids and total dissolved solids in a shallow reservoir with meteorological factors. Environmental Science and Pollution Research, Tianjin, China, p. 6746-6756, 2017.
- ZHANG, R.; LI, M.; YUAN, X.; PAN, Z. Influence of rainfall intensity and slope on suspended solids and phosphorus losses in runoff. Environmental Science and Pollution Research, Pequim, China, p. 1-13, 2018.
- ZURAINI, N. A.; ALIAS, N.; ABD RAHMAN, N.; HARUN, S.; IBRAHIM, Z.; AZMAN, S.; JUMAIN, M. Influence of rainfall characteristics on total suspended solid concentration. Journal of Physics, Johor Bahru, Malásia, 1049 012039, 2018.

