

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

**CÉSAR HENRIQUE VALENTINO**

**CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA E HIDROSSEDIMENTOLÓGICA EM BACIA  
HIDROGRÁFICA COM FINALIDADES EXPERIMENTAIS**

Poços de Caldas/MG

2019

**CÉSAR HENRIQUE VALENTINO**

**CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA E HIDROSEDIMENTOLÓGICA EM BACIA  
HIDROGRÁFICA COM FINALIDADES EXPERIMENTAIS**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Linha de Pesquisa: Recursos Hídricos e Meio Ambiente. Orientador: Prof. Dr. Flávio Aparecido Gonçalves.

Poços de Caldas/MG

2019

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas  
Biblioteca campus Poços de Caldas

V161c Valentino, César Henrique.

Caracterização hidrológica e hidrossedimentológica em bacia hidrográfica com finalidades experimentais / César Henrique Valentino. -- Poços de Caldas/MG, 2019.

96 f. –

Orientador(a): Flávio Aparecido Gonçalves.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, campus Poços de Caldas, 2019.

Bibliografia.

1. Recursos hídricos. 2. Erosão hídrica. 3. Bacias hidrográficas. 4. Hidrogramas. 5. escoamento de água de chuva. I. Gonçalves, Flávio Aparecido. II. Título.

CDD – 551.48

**CÉSAR HENRIQUE VALENTINO**

**CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA E HIDROSSEDIMENTOLÓGICA  
EM BACIA HIDROGRÁFICA COM FINALIDADES EXPERIMENTAIS**

A Banca Examinadora abaixo-assinada, aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciência e Engenharia Ambiental, pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Alfenas. Linha de Pesquisa: Recursos Hídricos e Meio Ambiente

Aprovada em: 28 de fevereiro de 2019.



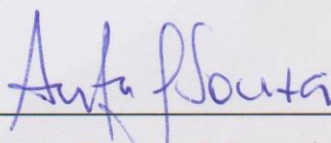
---

Prof. Dr. Flávio Aparecido Gonçalves  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas



---

Prof. Dr. Diego de Souza Sardinha  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas



---

Prof. Dr. Antônio Donizetti Gonçalves de Souza  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

*Aos meus pais, sem os quais jamais teria dado um só passo  
Ao meu irmão, por todo amor que trouxe a minha vida  
À minha esposa, cujo amor, incentivo e apoio foram cruciais  
Aos meus sogros, por todo carinho, acolhimento e sabedoria  
Ao meu filho, por me tornar uma pessoa muito melhor*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à minha mãe, Arleti, que sempre me mostrou o valor do aprendizado, responsável por construir em mim o gosto pelos livros e estudos.

Ao meu pai, Osmar, por me mostrar desde cedo o valor do trabalho e da dedicação.

Júlio César, Ana Sílvia e César Luiz, meu irmão, minha esposa e meu filho, cujo amor me é indispensável nessa vida.

À Universidade Federal de Alfenas, em especial o Instituto de Ciência e Tecnologia, pela oportunidade da realização deste curso.

À Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gérias – FAPEMIG – pela bolsa de estudos concedida.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, a qual afirmo minha gratidão.

Aos meus estimados e admirados mestres Flávio Aparecido Gonçalves, Diego de Souza Sardinha, Antônio Donizetti de Souza Gonçalves, Antônio Marciano da Silva, Paulo Henrique Bretanha Menezes Junker. Cujo trabalho, apoio e dedicação foram indispensáveis para realização desta pesquisa. A vocês, meus mais sinceros agradecimentos, e não só pelo apoio durante este mestrado, mas por todos os ensinamentos transmitidos desde a graduação e também àqueles que levarei para a vida.

Ao colega José de Oliveira Melo Neto, que trabalhou conosco no início desta pesquisa.

Aos técnicos de laboratório Luana, Marcel, Guilherme, Bruno e Mansueto, pelo auxílio e paciência.

João Alves, Sr. João e Cláudio, motoristas sempre dispostos a nos levarem a campo.

Aos grandes amigos Cláudio André dos Passos, Adriano Mota Ferreira, Leonardo Barbosa Silva, Mateus Michelin, companheiros do mestrado. Alguns dizem que grandes amizades são formadas na faculdade, na graduação propriamente dita. Sem dúvidas, no meu caso, a pós-graduação é muito mais responsável por essas grandes amizades. Muito obrigado!

Claramente não posso esquecer de agradecer aqui também aos excelentes amigos da graduação, cujo o apoio desde a fase inicial até a final foram

indispensáveis às minhas conquistas, ficam registrados aqui meus agradecimentos para: Bruno Andrade (Brunão Alfajor), Fels (Felipe Martins), Mari Frontelli (Mariana), Carlos Nogueira (Melhor Técnico), Fran (Franciele Custódio), Bruno Quintero (Brunão), Fabio Carnietto (Com duas letras 't), Bibs (Bianca de Cássia). Ao leitor desavisado, não existe erro entre os nomes e apelidos.

E por último, mas com certeza não menos importante, à toda minha família, base de tudo que é construído em minha vida:

Ana Paula e Rodrigo, Ana Claudia e Alexandre, Tia Ana e Tio Álvaro (*In memoriam*), Nilva Maria Nogueira e Marco Antônio Nogueira, Marco Túlio, Marcelo Gabriel, Luiz Fernando.

*In memoriam*: Vó (Iracema Lourenço), Vô (João Lourenço), Vó Maria (Maria Valentino) e Vô Ita (Itamar Valentino), os quais jamais esquecerei.

*–Levanta César! O galo cantou é dia!*

*Vó*



## RESUMO

Objetivou-se com este trabalho fazer a caracterização hidrológica e hidrossedimentológica da Bacia Hidrográfica do Córrego do Chapadão (BHCC), fazendo desta uma Bacia Hidrográfica Experimental para desenvolvimento de trabalhos relativos aos estudos de recursos hídricos e ambientais. De maneira específica, foi realizada a caracterização da relação chuva-deflúvio e analisado a relação da erosividade das chuvas com a produção de sedimentos. Foi realizada a caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica e sua instrumentação, com a instalação de uma estação fluviométrica na seção de controle, exutório da bacia. De dezembro de 2017 a outubro de 2018 coletou-se dados de velocidade de escoamento e nível d'água para a construção da curva-chave da seção de monitoramento, bem como os dados de Concentração de Sólidos Suspensos (CSS), que permitiram elaborar uma curva de descarga de sedimentos para determinação da Massa Total de Sólidos Suspensos (MSST) carreados em eventos erosivos do período estudado. Para alguns eventos erosivos classificados verificaram-se os valores de coeficiente *runoff* por uma analogia ao Método Racional e aplicou-se também o Método do Curva-Número. Os valores encontrados para o coeficiente de escoamento superficial foram de 0,01 a 0,57 e seu comportamento pôde ser relacionado diretamente à precipitação do evento e as condições de umidade do solo. O Método do Curva-Número indicou que o solo na região possui elevado potencial de infiltração. Os valores de CN e da infiltração potencial para as condições de umidade antecedente do solo AMC I, AMC II e AMC III foram respectivamente, 22,23 e 888,6mm; 44,60 e 315,5mm, 60,18 e 168,1mm. A comparação da lâmina escoada por diferentes métodos mostraram que o Hidrograma é o mais indicado para a área estudada. A relação entre a MSST e a erosividade das chuvas analisadas retornou um valor interessante da erodibilidade do solo na região, embora mais estudos sejam necessários nesse sentido.

**Palavras-chave:** Eventos erosivos. Massa total de sólidos suspensos. Escoamento Superficial

## ABSTRACT

The objective of this work was to make the Chapadao Basin an Experimental Hydrographic Basin for the development of studies related to water and environmental studies. In a specific way, the characterization of the rain-runoff relation was carried out and the relationship of the erosivity of the rains with the production of sediments was analyzed. It was carried out the physiographic characterization of the basin and its instrumentation, with the installation of a fluvimetric station in the control section. From December 2017 to October 2018, flow velocity and water level data were collected for the construction of the key curve of the monitoring section, as well as the Suspended Solids Concentration (CSS) data, which allowed the elaboration of a sediment discharge curve to determine the total mass of suspended solids carried in erosive events of the studied period. For some classified erosive events, the runoff coefficient values by an analogy to the Lloyd-Davies method were verified and the SCS Curve Number Method was applied. The values found for the runoff coefficient were in the range of 0.01 to 0.57 and its behavior could be directly related to precipitation of the event and soil moisture conditions. The Curve Number Method indicated that the soil in the region has a high infiltration potential, CN and potential infiltration values, for the Antecedent Moisture Conditions AMC I, AMC II and AMC III were respectively, 22.23 and 888.6mm; 44.60 and 315.5mm, 60.18 and 168.1mm. The comparison of the methods of obtaining the superficial flow showed that the Hydrograph Method is the most indicated for the studied area. The relationship between the MSST and the rainfall erosivity analyzed returned an interesting value of the soil erodibility in the region, although more studies are necessary in regard to this matter.

**Keywords:** Erosive events. Total mass of suspended solids. Surface runoff.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Trecho de um curso d'água com proporções ideais para definição da seção de controle de uma bacia hidrográfica. ....	18
Figura 2 – Representação de um hidrograma típico, com seus principais componentes, para uma dada seção de controle, considerando uma chuva individual. ....	23
Figura 3 – Componentes associados ao Método do Número da Curva sugerido pelo Serviço de Conservação de Solo do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (SCS-USDA). ....	25
Figura 4 – Fluxograma das etapas do trabalho. ....	32
Figura 5 – Localização da BHCG, pluviômetro, da BHCC e seção de controle. ....	33
Figura 6 - Exemplo das verticais da seção transversal de um rio. ....	36
Figura 7 – Amostras proporcionais as velocidades de transito, amostradas pela metodologia IIL. ....	39
Figura 8 – Métodos de separação gráfica de escoamento em hidrograma. ....	42
Figura 9 – Ponte construída acima da Seção de Controle. Por dentro do cano descem até o ribeirão os sensores de nível e turbidez. ....	46
Figura 10 – Sensores de Turbidez e Nível d'água protegidos pelo cano. ....	47
Figura 11 – Estação fluviométrica. ....	47
Figura 12 – Cercado da estação hidrológica. ....	48
Figura 13 – Mapa de Declividade da BHCC. ....	50
Figura 14 – Mapa de Solos da BHCC. ....	51
Figura 15 – Mapa de uso e cobertura do solo da BHCC. ....	52
Figura 16 – Comparação entre os perfis da seção de monitoramento de nov/17 e abr/18. ....	53
Figura 17 – Curva-chave. ....	54
Figura 18 – Evidência da cheia registrada pelo sensor no dia 10/03/2018. ....	55
Figura 19 – Hidrograma e Comportamento de C do Evento 1. ....	59
Figura 20 – Hidrograma e Comportamento de C do Evento 2. ....	60
Figura 21 – Hidrograma e Comportamento de C do Evento 3. ....	61
Figura 22 – Hidrograma e Comportamento de C do Evento 4. ....	62
Figura 23 – Hidrograma e Comportamento de C do Evento 5. ....	63
Figura 24 – Hidrograma e Comportamento de C do Evento 6. ....	64
Figura 25 – Hidrograma e Comportamento de C do Evento 7. ....	65

Figura 26 – Hidrograma e Comportamento de C do Evento 8. ....	66
Figura 27 – Hidrograma e Comportamento de C do Evento 9. ....	67
Figura 28 – Hidrograma e Comportamento de C do Evento 10. ....	68
Figura 29 – Precipitação Total e anterior relacionado ao coeficiente de escoamento superficial. ....	70
Figura 30 – Curva de descarga de sedimentos de Concentração de Sólidos Suspensos por Vazão. ....	74
Figura 31 – <i>MSST</i> em função do <i>EI30</i> calculado pela metodologia de Wishmeier e Smith (1958). ....	75
Figura 32 – <i>MSST</i> em função do <i>EI30</i> calculado pela metodologia de Wagner e Massambani (1988). ....	75
Figura 33 – Aferição do nível d'água com equipamento desenvolvido pelo autor. ....	84
Figura 34 – Medidor de velocidade de escoamento de água tipo micromolinete da Vernier® ....	84
Figura 35 – Amostrador USDH-48. ....	85
Figura 36 – Aparato de filtragem das amostras de hidrossedimento. ....	85
Figura 37 - Comparação entre <i>TUR</i> e <i>CSS</i> do Evento 1. ....	92
Figura 38 - Comparação entre <i>TUR</i> e <i>CSS</i> do Evento 2. ....	92
Figura 39 - Comparação entre <i>TUR</i> e <i>CSS</i> do Evento 3. ....	93
Figura 40 - Comparação entre <i>TUR</i> e <i>CSS</i> do Evento 4. ....	93
Figura 41 - Comparação entre <i>TUR</i> e <i>CSS</i> do Evento 5. ....	94
Figura 42 - Comparação entre <i>TUR</i> e <i>CSS</i> do Evento 7. ....	94
Figura 43 - Comparação entre <i>TUR</i> e <i>CSS</i> do Evento 8. ....	95
Figura 44 - Comparação entre <i>TUR</i> e <i>CSS</i> do Evento 9. ....	95
Figura 45 - Comparação entre <i>TUR</i> e <i>CSS</i> do Evento 10. ....	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores que influenciam a forma do hidrograma. ....	22
Tabela 2 – Distância entre verticais de acordo com a largura da seção do rio. ....	37
Tabela 3 – Obtenção da velocidade média na vertical. ....	37
Tabela 4 – Associação das coberturas e usos do solo da BHCC de acordo com a literatura. ....	44
Tabela 5 – Caracterização da BHCC. ....	48
Tabela 6 – Abrangência das Classes de Declividades* na BHCC. ....	50
Tabela 7 – Classes de uso e ocupação do solo na BHCC. ....	52
Tabela 8 – Cálculo da Erosividade da Chuva. ....	56
Tabela 9 – Eventos erosivos classificados para determinação de C. ....	58
Tabela 10 – Resumo dos dados dos Eventos Erosivos. ....	69
Tabela 11 – Resumo dos dados do Método da Curva-Número para os eventos classificados como erosivos. ....	72
Tabela 12 – Comparação dos resultados para Escoamento Superficial entre diferentes metodologias. ....	73
Tabela 13 – Interação Massa de Sólidos Suspensos Transportados, Precipitação e Deflúvio. ....	74
Tabela 14 – Medidas de nível d'água e vazão observadas em campo. ....	86
Tabela 15 - Dados de Concentração e Vazão observados em campo. ....	87
Tabela 16 – Resumo dos parâmetros hidrológicos dos eventos erosivos. ....	88

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Geral</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2</b>	<b>Específicos</b> .....	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>REFERÊNCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>17</b>
<b>3.1</b>	<b>Bacias Hidrográficas Experimentais</b> .....	<b>17</b>
<b>3.2</b>	<b>Chuvas Erosivas</b> .....	<b>19</b>
<b>3.3</b>	<b>Modelagem Chuva-Deflúvio</b> .....	<b>21</b>
3.3.1	Hidrograma.....	21
3.3.2	O Método Racional.....	23
3.3.3	O Método do Curva-Número .....	24
<b>3.4</b>	<b>Produção e transporte de sedimentos</b> .....	<b>26</b>
3.4.1	Quantificação do Hidrossedimento em Suspensão.....	28
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>31</b>
<b>4.1</b>	<b>Fluxograma</b> .....	<b>31</b>
<b>4.2</b>	<b>Área de Estudo</b> .....	<b>33</b>
<b>4.3</b>	<b>Coleta de dados</b> .....	<b>35</b>
<b>4.4</b>	<b>Chuvas erosivas</b> .....	<b>39</b>
<b>4.5</b>	<b>Hidrograma</b> .....	<b>41</b>
<b>4.6</b>	<b>O Método Racional</b> .....	<b>43</b>
<b>4.7</b>	<b>O Método do Curva-Número</b> .....	<b>44</b>
<b>4.8</b>	<b>Curva de descarga de sedimentos</b> .....	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>46</b>
<b>5.1</b>	<b>A Área de Estudo</b> .....	<b>46</b>
5.1.1	Perfil altimétrico da seção de controle.....	53
<b>5.2</b>	<b>Curva-chave</b> .....	<b>53</b>

<b>5.3</b>	<b>Chuvas erosivas.....</b>	<b>55</b>
<b>5.4</b>	<b>Hidrogramas e Coeficiente de escoamento pelo Método Racional.....</b>	<b>58</b>
<b>5.5</b>	<b>Escoamento superficial pelo Método do Curva-Número.....</b>	<b>72</b>
<b>5.6</b>	<b>Comparação de resultados do ES por diferentes métodos.....</b>	<b>73</b>
<b>5.7</b>	<b>Curva de descarga de sedimentos.....</b>	<b>74</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>77</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>79</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>80</b>
	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>84</b>

## 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O conhecimento da relação entre regime pluviométrico, escoamento superficial, produção e transporte de sedimentos é essencial para prever e evitar possíveis problemas de cunho econômico, social e ambiental, e a bacia hidrográfica deve ser tomada como uma unidade de planejamento e gestão ambiental (MELLO; SILVA, 2013).

Este trabalho está inserido dentro de um conjunto de estudos desenvolvidos pelo grupo de pesquisas de Recursos Hídricos do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Alfenas, que desenvolve pesquisas relativas a este tema nessa área desde o ano 2012. As pesquisas desenvolvidas na área até o momento foram as de Reis (2014), Lima (2014), Tavares (2016), Moreira (2017) e Purcino (2017). Outras duas pesquisas foram realizadas concomitantemente a esta, a de Adriano Mota Ferreira, Modelagem da erosão hídrica dos solos: aplicação do modelo WEPP na Bacia do Gigante, e a de Cláudio André dos Passos, Interação entre os regimes pluvial, hidrológico e hidrossedimentológico na Bacia Do Córrego do Gigante (BHCG).

Na presente pesquisa realizou-se a instrumentação de uma seção de controle no Ribeirão do Chapadão para a caracterização de seu regime hidrológico. Tal ribeirão fica localizado na Bacia Hidrográfica do Córrego do Chapadão (BHCC), sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Cipó (BHRC), que segundo Reis (2014) teve seu principal curso d'água, o Ribeirão do Cipó, represado para construção da represa Lindolpho Pio da Silva Dias ou Barragem do Cipó, como é popularmente conhecida, em 1999. A obra, realizada pelo Departamento Municipal de Energia, teve por finalidade regularizar a vazão do Rio das Antas para produção de energia elétrica. A barragem possui 400 m de extensão e 27 m de altura. Foi construída no sistema de aterro compactado, o lago é formado por aproximadamente 32 milhões de metros cúbicos de água, que também permite a captação de  $400 \text{ L.s}^{-1}$  de água para abastecimento.

O Ribeirão do Chapadão é um dos contribuintes do Reservatório do Cipó, razão pela qual, entender a dinâmica hidrológica na região é de alta importância, pois o transporte de sedimentos pelo Ribeirão do Chapadão pode vir a comprometer a capacidade e eficiência deste importante reservatório do município de Poços de Caldas – MG.



A BHCC possui características rurais e foi instrumentada para servir como uma bacia experimental, a fim de que a partir das informações coletadas na seção de controle seja possível realizar inferências e modelagens futuramente, permitindo melhor compreensão dos fenômenos hidrológicos da região e em bacias semelhantes.

Estudos dessa natureza são importantes para tomadas de decisão relativas ao bom manejo dos recursos da bacia hidrográfica, de modo a tornar concreta a possibilidade de um desenvolvimento sustentável (SOUZA; FERNANDES, 2000).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Realizar a caracterização hidrológica e hidrossedimentológica em bacia hidrográfica com finalidades experimentais.

### **2.2 Específicos**

- a) Instrumentar a seção de controle da área de estudo;
- b) Caracterizar a área de Estudo;
- c) Gerar a curva-chave para a seção de controle;
- d) Determinar as precipitações erosivas no período estudado;
- e) Elaborar hidrogramas da seção de controle;
- f) Avaliar o Coeficiente de Escoamento Superficial por analogia ao Método Racional;
- g) Verificar o Escoamento Superficial pelo Método do Curva-Número;
- h) Gerar a curva de descarga de sedimentos para seção de controle; e
- i) Estimar a Massa de Sólidos Suspensos Transportados.

### 3 REFERÊNCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Bacias Hidrográficas Experimentais

De acordo com Mello e Silva (2013), bacias hidrográficas, também chamadas de bacias de captação ou de drenagem, são áreas delimitadas espacialmente pelos divisores de água, constituídas por uma rede de drenagem interligada, cujo escoamento converge para uma seção comum, denominada foz ou exutório da bacia. Podem ser classificadas como:

- Bacias Hidrográficas Pequenas, cujo conceito não está relacionado diretamente ao tamanho (área) da bacia hidrográfica, mas a estudos a serem desenvolvidos e algumas características como uniformidade na distribuição espacial e temporal da precipitação;
- Bacias Hidrográficas Representativas, definidas de forma que possam representar as características fisiográficas de uma dada região;
- Bacias Hidrográficas Elementares, de pequena ordem, constituindo-se na menor unidade geomorfológica onde ocorre; e
- Bacias Hidrográficas Experimentais, consideradas para estudos científicos dos componentes do ciclo hidrossedimentológico e eventuais influências nos componentes deste.

De acordo com Mota et al (2016), a Suíça foi pioneira com estudos em bacias experimentais no mundo, no qual duas bacias foram analisadas em 1902. O segundo estudo ocorreu em 1906, no Japão. Depois, no início do século XX foram iniciados estudos semelhantes nos Estados Unidos, na Europa e na África do Sul. Hoje existem diversas bacias experimentais no Brasil e no mundo.

Para atingir um bom nível de manutenção e preservação dos mananciais, é necessário o planejamento, gerenciamento e uso adequado dos recursos hídricos para diminuir o problema tanto da escassez como do excesso de água. Nesse sentido, as Bacias Hidrográficas Experimentais são de grande importância, pois fornecem dados e facilitam o entendimento da hidrologia local (SAGARA, 2001). Além disso, as bacias hidrográficas experimentais tem a função de desempenhar o papel de um laboratório no campo, onde se busca caracterizar as relações entre solo, planta, água e atmosfera, assim como suas inter-relações (VIEIRA, 2011).

Para Ponce (1989), a classificação das bacias hidrográficas de acordo com a magnitude da área de drenagem, é realizada com certa subjetividade e mesmo

ambiguidade conforme a área de conhecimento. Uma pequena bacia hidrográfica é aquela em que as seguintes considerações podem ser feitas:

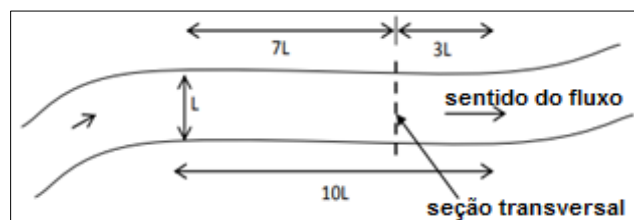
- A precipitação é distribuída no espaço e no tempo de maneira uniforme, sobre toda a bacia;
- A duração das chuvas em geral ultrapassa o tempo de concentração da bacia;
- A produção de água e sedimentos dá-se pelo escoamento nas vertentes; e
- Os processos de armazenamento e escoamento concentrado na calha dos cursos d'água não são de grande importância.

De acordo com Vieira (2011), estudos em bacias hidrográficas experimentais estão associados a áreas de drenagem da ordem das dezenas de quilômetros quadrados. Em parte, a definição da área está associada a características geomorfológicas e aos decorrentes estudos em modelagem hidroclimática.

A escolha do local da seção de controle em uma Bacia Hidrográfica é muito importante, pois o local é imprescindível para promover a realização de um bom desempenho do monitoramento, devendo se basear nas seguintes condições (EMÍLIO, 2010):

- i. o trecho escolhido deve ser retilíneo com margens paralelas;
- ii. perfil longitudinal deve ser regular, com leito livre de vegetação, pedras e outros obstáculos;
- iii. a posição da seção de medição deve ser, na medida do possível, o mais próximo da indicada pela Figura 1, onde  $L$  é a largura do curso d'água. A curva no leito do rio apresentada na Figura 1 pode ser também representada por qualquer obstáculo ou remanso.

Figura 1 – Trecho de um curso d'água com proporções ideais para definição da seção de controle de uma bacia hidrográfica.



Fonte: EMÍLIO (2010).

- iv. o perfil transversal da seção deve ser simétrico e ter taludes altos, que não permitam o extravasamento;

- v. o leito e as margens devem ser estáveis;
- vi. as velocidades do escoamento devem estar entre  $0,30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e  $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;
- vii. deve garantir a acessibilidade em qualquer circunstância e ser local de fácil acesso e no caso da existência de observador, o mesmo deve morar próximo à seção;
- viii. o local deve estar suficientemente afastado das confluências, para evitar o efeitos de remanso;
- ix. o local deve ser livre das ações antrópicas;
- x. deve existir um adequado controle natural estável, ou condições para implantação de um controle artificial; e
- xi. as condições para instalação dos dispositivos necessários (de acordo com o sistema de medição escolhido) devem ser satisfatórias.

Arcova, Cicco e Rocha (2003) ao estudar uma bacia hidrográfica experimental quantificaram a precipitação efetiva e a interceptação das chuvas pelo dossel da floresta secundária de Mata Atlântica e dessa forma foram capazes de investigar diversos componentes do ciclo hidrológico, trazendo compreensão da dinâmica hidrológica da região.

Palmier (2002), discute a importância do monitoramento de bacias hidrográficas experimentais para criação de bancos de dados sólidos a fim de promover condições para o desenvolvimento de pesquisas sobre o uso de recursos hídricos na região do semi-árido brasileiro.

Moraes (2007), realizou uma estimativa do Balanço Hídrico na bacia experimental de Santa Maria/Cambiocó, uma bacia com características rurais, e concluiu que a mesma possui um déficit hídrico anual, bem como armazenamento de água em situação crítica na maioria dos meses, inferindo que um dos fatores causadores deste déficit é a monocultura de tomate no local, por demandar considerada quantidade de água no sistema de rega adotado pelos agricultores da área em estudo.

Exemplos como os supracitados evidenciam a importância de pesquisas em bacias hidrográficas experimentais e o entendimento da dinâmica hidrológica nas mesmas.

### **3.2 Chuvas Erosivas**

O solo é um dos recursos naturais utilizados pelo homem de modo mais intenso. Para utilização de forma sustentada dos solos necessita-se conhecer os fatores que influenciam a intensidade da erosão hídrica, que variam de acordo com o local. A potencialidade das chuvas em provocar erosão constitui um dos mais importantes componentes para estimativa da erosão hídrica dos solos por meio de modelos de predição. A potencialidade da chuva em causar erosão pode ser estudada por meio de índices de erosividade, que se baseiam nas características físicas das chuvas de cada região (SILVA et al, 1997).

Segundo Wishmeier e Smith (1958 apud SILVA et al, 1997), o produto da energia cinética total pela intensidade máxima em trinta minutos ( $EI_{30}$ ) é a relação que melhor expressa o potencial da chuva em causar erosão, considerando as fases de impacto das gotas da chuva, a desagregação do solo, a turbulência do escoamento, e o transporte das partículas.

A energia cinética da chuva pode ser calculada diretamente a partir da distribuição do tamanho e da velocidade terminal das gotas. No Brasil, são raros os estudos detalhados sobre estes parâmetros. Com o intuito de contribuir para a geração de tais informações, Wagner e Massambani (1988) determinaram a relação entre a energia cinética e a taxa de precipitação, obtida a partir de 533 amostras da distribuição de gotas de chuva oriundas de precipitações predominantemente convectivas (pequeno volume, curta duração e alta intensidade) observadas na região de São Paulo. Os autores concluíram que a equação para o cálculo de energia cinética obtida de acordo com os dados observados não difere significativamente da equação de Wischmeier e Smith de 1958 (SILVA et al, 1997).

A erosividade da chuva, calculada pelos métodos de Wishmeier e Smith (1958) e Wagner e Massambani (1988), depende da intensidade da chuva, que pode ser obtida por série histórica de dados pluviográficos; por equação Intensidade-Duração-Frequência (IDF); ou por monitoramento das precipitações ao longo da realização ou condução de um trabalho específico em uma bacia hidrográfica.

Segundo Mello e Silva (2013) precipitações maiores que 10 mm e que possuem intensidade máxima em 15 minutos maiores que 24 mm.h<sup>-1</sup> ou energia cinética maior que 3,6 MJ.h<sup>-1</sup> são consideradas erosivas. Um evento de precipitação pode ser separado de outro quando o intervalo entre eles é de no mínimos seis horas, exceto aqueles com lâmina inferior a 1 mm, que são por si só eventos individuais.

### 3.3 Modelagem Chuva-Deflúvio

Neste item serão abordados os principais conceitos, aplicações, limitações, vantagens e desvantagens de alguns dos métodos mais utilizados para modelagem chuva-deflúvio, a saber, o Hidrograma, Método Racional e Método do Curva-Número.

#### 3.3.1 Hidrograma

Hidrograma é a distribuição da vazão em função do tempo na seção de um curso d'água. Essa distribuição é interpretada como sendo a resposta da bacia hidrográfica ou da área de drenagem quando estimulada pelas chuvas que caem sobre essa área (RIGHETTO, 1998). Na Figura 2 está apresentado um hidrograma típico para um chuva individual, com seus principais componentes.

Um hidrograma típico produzido por uma chuva intensa apresenta uma curva com um pico único. Um hidrograma pode apresentar picos múltiplos se houver variações abruptas na intensidade da chuva, uma sequência de chuvas intensas ou uma recessão anormal do escoamento subterrâneo (PORTO et al,1999).

Na Tabela 1 estão apresentados alguns dos fatores que influenciam a forma do hidrograma.

Tabela 1 – Fatores que influenciam a forma do hidrograma.

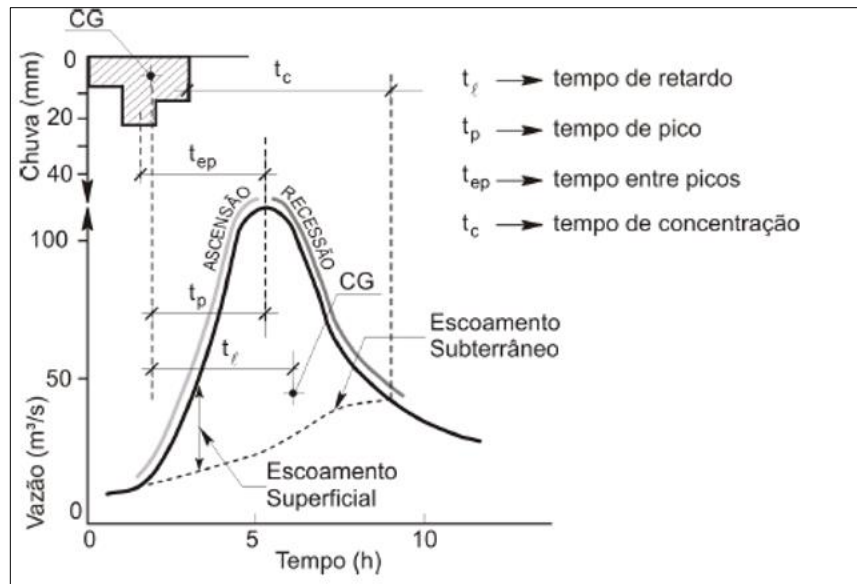
<b>Área da bacia</b>	Quanto maior a área maior o volume; mas bacias hidrográficas com grandes áreas de extravasamento tendem a regularizar o escoamento e reduzir o pico.
<b>Relevo</b>	Quanto maior a densidade de drenagem da bacia hidrográfica maior o pico do hidrograma;
	Quanto maior a declividade do rio e da bacia hidrográfica a velocidade tende a ser maior, o tempo de concentração menor, provocando picos de cheia elevados;
	Maior capacidade de armazenamento com presença de lagos, depressões, polderes, áreas alagáveis aumentam o tempo de concentração e diminuem o pico; e
	Bacias mais circulares antecipam e têm picos de vazões maiores do que bacias hidrográficas alongadas.
<b>Constituição geológica do subsolo</b>	Maior capacidade de absorção do solo e solo mais profundo diminuem a quantidade de chuva transformada em chuva efetiva (escoamento).
<b>Modificações artificiais no rio</b>	Reservatórios de regularização reduzem os picos, enquanto canalizações, retificações podem aumentar os picos.
<b>Característica da precipitação</b>	Chuvvas deslocando-se de jusante para montante geram hidrogramas com picos menores;
	As chuvvas convectivas e distribuídas numa pequena área, podem provocar as grandes enchentes em pequenas bacias hidrográficas. São aquelas chuvvas de verão: grande intensidade, curta duração, com ventos e raios; e
	Para bacias hidrográficas grandes, são mais críticas as chuvvas frontais, com menor intensidade, longa duração (vários dias). Pausas, chuvviscos alternando com chuvvas mais intensas em grandes áreas são típicos desse tipo de chuva.
<b>Condições de superfície do solo e Uso do solo</b>	Urbanização e desmatamento reduzem a infiltração e aumentam o escoamento superficial e diminuem a vazão de base
	A impermeabilização dos terrenos do solo da bacia hidrográfica aumenta o escoamento superficial;
	Maior cobertura vegetal tende a retardar o escoamento. Isso aumenta a infiltração e as perdas por evaporação, reduzindo a vazão de pico.

Fonte: Porto et al (1999).

Para obtenção de um hidrograma são necessários dados de precipitação e vazão ao longo do tempo, que podem ser obtidos por pluviógrafo, linígrafos, *data logger's* etc. No hidrograma, pode ser realizada a separação entre escoamento de base (subterrâneo) e superficial (RIGHETTO, 1998).



Figura 2 – Representação de um hidrograma típico, com seus principais componentes, para uma dada seção de controle, considerando uma chuva individual.



Fonte: COLLISCHONN; DORNELLES (2013).

### 3.3.2 O Método Racional

De acordo com Pruski, Brandão e Silva (2004) com o Método Racional pode-se determinar a vazão máxima de escoamento superficial levando em consideração o coeficiente de escoamento superficial (ou coeficiente *runoff*), a intensidade máxima média de precipitação para uma duração igual ao tempo de concentração da bacia e a área da bacia hidrográfica. O coeficiente *runoff* pode ser obtido por meio das características da bacia e representa a parcela da chuva convertida em escoamento superficial; a intensidade máxima média de precipitação é obtida a partir de dados de chuvas.

O Método Racional é fundamentado nos seguintes princípios básicos:

- As precipitações deverão ter alta intensidade e curta duração, sendo a vazão máxima de escoamento superficial aquela que ocorre quando a duração da chuva for igual ao tempo de concentração;
- A precipitação com duração igual ao tempo de concentração ocorre uniformemente ao longo de toda a bacia;
- Dentro de um curto período de tempo, a variação na taxa de infiltração não deverá ser grande, geralmente admitindo-se que durante o evento extremo o solo encontra-se saturado;

- Utilização de um único coeficiente de escoamento superficial estimado com base nas características da bacia; e
- Não considera a forma da bacia hidrográfica, apenas a sua área total.

Como o método parte do princípio que a vazão máxima é atingida quando toda a área da bacia hidrográfica está contribuindo simultaneamente com o escoamento na seção de controle, a complexidade real do processo de escoamento é ignorada, desprezando tanto o armazenamento de água na bacia hidrográfica quanto as variações da intensidade de precipitação e do coeficiente de escoamento superficial.

As Limitações do Método Racional, segundo Dhakal (2012) são:

- O método não leva em consideração as condições de permeabilidade do terreno. Não considera a umidade antecedente no solo;
- Não considera o efeito da intensidade da chuva no coeficiente de escoamento superficial “C”;
- Não considera um tempo para as perdas iniciais;
- Tendo em vista o grande número de variáveis que influem no volume escoado, tais como infiltração, armazenamento, evaporação, retenção, etc, tornando necessariamente, uma adoção empírica do valor adequado (são muito fatores resumidos numa única constante);
- Não considera também o retardamento natural do escoamento cujo fenômeno acarreta alteração do pico de cheia, sendo esta a principal razão da limitação do método quando se trata de bacias maiores;
- Não considera que as chuvas mais curtas eventualmente podem dar maior pico; e
- Outra consideração que provoca restrições é o fato de considerar constante a intensidade de chuva de projeto tanto no tempo como no espaço, ou seja, admite uma precipitação uniforme em toda a área de contribuição.

### 3.3.3 O Método do Curva-Número

O Método do Número da Curva, ou Curva-Número (*CN*), foi desenvolvido em 1972 pelo Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos em associação ao Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (SCS-USDA) a partir de dados de

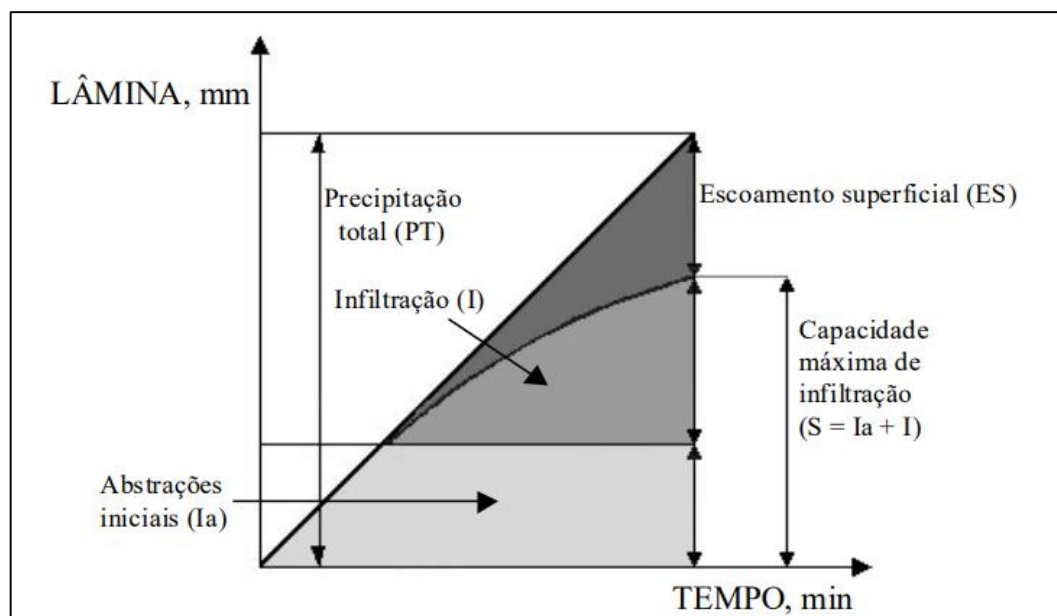
um grande número de bacias hidrográficas experimentais e permite estimar a lâmina de escoamento superficial a partir de dados de precipitação e de outros parâmetros da bacia hidrográfica (PRUSKI; BRANDÃO; SILVA, 2004).

O Método do Curva-Número é empregado para realizar uma estimativa do volume de escoamento superficial em pequenas bacias hidrográficas quando disponíveis informações relativas às condições do solo e da vegetação (cobertura do solo) e registros diários de precipitação. Sendo assim, a grande vantagem deste método é requerer informações de fácil obtenção para ser utilizado (WELLS et al, 1986).

A precipitação recomendada para uso no método é aquela que corresponde ao total precipitado para um dado tempo de retorno e duração de precipitação requerido (normalmente 6, 12 ou 24 h), sendo determinada a partir de dados pluviométricos (PRUSKI; GRIEBELER; SILVA, 2001).

Na Figura 3 estão apresentadas as variáveis do Método do Número da Curva evidenciando que a precipitação acumulada varia linearmente com o tempo, ou seja, a intensidade da precipitação é considerada constante para uma dada duração. Ainda é possível observar que a precipitação é totalmente convertida em abstrações iniciais até o tempo  $t_{la}$ . Abstrações iniciais correspondem a toda precipitação que ocorre antes do início do escoamento superficial (PRUSKI; GRIEBELER; SILVA, 2001).

Figura 3 – Componentes associados ao Método do Número da Curva sugerido pelo Serviço de Conservação de Solo do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (SCS-USA).



Fonte: Pruski, Griebeler e Silva (2001)

A soma das abstrações iniciais e da parcela da precipitação que infiltra resulta na Capacidade Máxima de Infiltração, também chamada de Infiltração Potencial ( $S$ ). A infiltração potencial depende do chamado Número da Curva ou Curva-Número ( $CN$ ), cujo valor pode variar entre 1 e 100 e depende das condições de cobertura do solo, uso e manejo da terra, do grupo de solo e da umidade antecedente do solo (PRUSKI, BRANDÃO; SILVA, 2004).  $CN$  define o complexo hidrológico solo-vegetação (PRUSKI; GRIEBELER; SILVA, 2001).

O Método do Curva-Número depende de dados de precipitação, os quais podem ser obtidos por série histórica de dados pluviométricos ou pluviográficos; por equação de intensidade duração e frequência (equação IDF – um tipo de curva que correlaciona intensidade e duração com um determinado período de retorno por meio de alguns coeficientes de ajustes que variam para cada região); ou por monitoramento ao longo da realização ou condução de um trabalho específico em uma bacia hidrográfica.

### **3.4 Produção e transporte de sedimentos**

Entende-se por erosão dos solos o processo de desprendimento, transporte e deposição de partículas do solo, tendo como principais agentes o vento e a água. Contudo a ação humana, por meio da implantação de práticas que desequilibram as condições naturais, acelera os processos erosivos e ocasiona a denominada erosão acelerada. A erosão acelerada é avaliada como um fenômeno de grande relevância, pois acarreta grandes prejuízos ao meio ambiente e às atividades antrópicas, como a agropecuária, promovendo extensivamente assoreamento, poluição e eutrofização das águas superficiais, prejudicando a quantidade e qualidade dos recursos hídricos (VALLE JUNIOR, 2008, p.1).

Com o passar do tempo, a erosão pode ocasionar perdas ao meio ambiente, às atividades econômicas e ao setor agropecuário. A perda de solo por erosão é a principal causa de degradação das terras agrícolas no Brasil, e tem a capacidade de gerar elevação no custo de produção devido ao aumento do emprego de corretivos e fertilizantes nos locais afetados (PRUSKI, 2006).

Sedimentos são os produtos do intemperismo e erosão de rochas ou solos. Intemperismo é o processo ou conjunto de processos combinados, químicos, físicos

ou biológicos de desintegração, desagregação ou decomposição das rochas ou solos. Já a erosão é o processo geológico de desbaste da superfície terrestre.

A forma com que os sedimentos adentram nos rios das bacias hidrográficas, dependem das características das partículas, da declividade da bacia hidrográfica e outras características da mesma (BROOKS et al, 2003). Podem ser transportados até os corpos d'água pelo vento, pela gravidade e, principalmente durante eventos de precipitação, por escoamento superficial direto. Os sedimentos quando incorporados ao curso d'água são denominados hidrossedimentos, sendo transportados em suspensão ou arraste de fundo. Quando não há energia suficiente para transportá-los, são depositados no fundo do corpo d'água, evento chamado de sedimentação (MELLO; SILVA, 2013; MOREIRA, 2017).

A elucidação dada por Couto Júnior (2016, p. 20) para transporte de sedimentos torna o entendimento dessa temática mais clara. O autor diz que

...os materiais resultantes dos processos erosivos podem ser transportados pela ação das águas por escoamento superficial, sendo que esse transporte depende da topografia da bacia hidrográfica e da granulometria dos materiais transportados. Nesse sentido, o transporte de sedimentos, que varia em função do material transportado, pode ser classificado de acordo com três tipos: sólidos dissolvidos, sólidos em suspensão e carga sólida de arrasto.

Sólidos dissolvidos são as substâncias orgânicas e inorgânicas contidas num líquido sob formas moleculares, ionizadas ou micro-granulares, também é um parâmetro de determinação da qualidade da água, pois avalia o peso total dos constituintes minerais presentes na água, por unidade de volume (TUCCI, 2005). Os sólidos suspensos dizem respeito a pequenas partículas sólidas que ficam em suspensão em água e são carregados junto ao fluxo, é utilizado como um indicador da qualidade da água. Segundo Carvalho (2008), as cargas sólidas de arrasto são as partículas de sedimentos que por vezes apresentam maior granulometria, elas escorregam ou rolam longitudinalmente ao longo do curso d'água, estando sempre em contato com o fundo do rio.

O transporte de sedimentos em suspensão é determinado pela velocidade do escoamento em curso d'água. Quanto maior a velocidade do caudal, maior será a turbulência e, conseqüentemente, a capacidade de transportar sedimentos. Quando a velocidade do fluxo diminui, o material transportado em suspensão é depositado. Conclui-se então que o transporte de sedimentos em suspensão é diretamente proporcional a vazão do curso d'água (CHRISTOFOLETTI, 1981. p. 35).

Todo curso d'água apresenta equilíbrio em relação ao transporte de sedimento, seja por arrasto e saltitação junto ao leito, seja em suspensão na corrente líquida. Os sedimentos tendem a naturalmente depositarem-se quando encontram água com menor velocidade, conforme maior ou menor granulação das partículas e menor ou maior turbulência do escoamento (CABRAL, 2005).

No tocante a construção de obras hidráulicas, normalmente há modificação das condições naturais do curso d'água. Em relação ao aspecto sedimentológico, as barragens causam redução das velocidades de escoamento provocando a deposição dos sedimentos carregados pelo curso d'água a montante, acarretando o assoreamento, diminuindo gradativamente a capacidade de armazenamento do reservatório, podendo inviabilizar a operação do aproveitamento, além de ocasionar problemas ambientais de diversas naturezas (CARVALHO et al, 2000a, p. 7).

O diagnóstico do processo de assoreamento deve estar incluso nas atividades dos projetos de construção e manutenção de obras hidráulicas, sendo imperativa uma correta atitude dos órgãos de tomada de água a fim de prevenir eventuais dificuldades de operação, ou mesmo de interrupções no abastecimento da água (CABRAL, 2005).

#### 3.4.1 Quantificação do Hidrossedimento em Suspensão

Uma vez que os rios transportam predominantemente sedimentos em suspensão, esse é o tipo de medição mais importante e dominante em análises de sedimentometria (CARVALHO, 2008).

As grandezas fundamentais no cálculo da descarga sólida em suspensão são a concentração e a descarga líquida. Quando a amostragem é pontual tem-se de levar em consideração as profundidades e distâncias nos pontos de amostragem, bem como a velocidade do caudal. Se o sedimento em suspensão fosse igualmente distribuído na seção, uma amostra em qualquer ponto poderia representar a concentração. Como isso não ocorre, é necessário levar em conta a variação da concentração, realizando amostragens ao longo da seção em número adequado de posições (CARVALHO, 2008).

Os diversos equipamentos de medida ou de amostragem em suspensão podem ser classificados em vários tipos (CARVALHO et al, 2000a, p. 23):

- Instantâneos ou integradores: os instantâneos aprisionam a amostra rapidamente ou fazem a leitura, enquanto que os integradores admitem a amostra em alguns segundos por bocal ou bico, armazenando num recipiente;
- Portáteis ou fixos: os portáteis são operados manualmente, por haste ou guincho, ou mesmo presos a um barco, enquanto que os fixos são instalados numa estrutura própria, numa ponte ou na margem;
- De bocal ou com bico: os de bocal são aqueles de bombeamento ou outros, enquanto aqueles que usam bicos são os portáteis, providos de garrafas, recipiente plástico ou saca plástica;
- Instantâneos pontuais, pontuais por integração e por integração na vertical: os instantâneos pontuais são do tipo de cilindro com dispositivo que aprisiona a amostra com envio de mensageiro/peso que aciona as válvulas. Os pontuais por integração coletam a amostra em alguns segundos em um ponto de uma vertical. Os integradores na vertical, ou em profundidade, coletam a amostra movendo o equipamento ao longo da vertical em um movimento constante que pode ser em um só sentido ou numa viagem de ida e volta da superfície ao fundo; e
- Amostrador de tubo horizontal, de garrafa, de saca compressível, de bombeamento, de integração, fotoelétrico, nuclear, ultra-sônico ótico, ultra-sônico de dispersão, ultrasônico Doppler: o amostrador horizontal é o tipo instantâneo pontual. O amostrador de garrafa é construído em forma hidrodinâmica com uma cavidade para que seja colocada a garrafa, sendo que a amostragem é feita através de um bico intercambiável com outros de diâmetros variáveis (1/4", 3/16" e 1/8") enquanto o ar é expelido por um tubo. O amostrador de saca compressível é também construído em forma hidrodinâmica, e tem um recipiente de alumínio para conter a saca plástica com capacidade maior que a garrafa, que é colocada comprimida para expulsar o ar; utiliza também os bicos intercambiáveis. O equipamento de bombeamento pode ser colocado em um barco ou instalado na margem, e que normalmente utiliza uma mangueira provida de um bocal ou bico apropriado para admitir a amostra; o bombeamento é controlado em função da velocidade da corrente, existindo diversos tipos desse equipamento. O equipamento que trabalha por integração é o tipo de garrafa ou de saca compressível. O fotoelétrico e o nuclear operam com emissão de luz ou emissão de raios a partir de fonte de intensidade constante. O ultra-sônico ótico e o de dispersão trabalham com fontes que emitem raios ultra-sônicos que são captados por equipamentos apropriados, enquanto que o ultra-sônico Doppler utiliza

o efeito Doppler de retorno de incidência nas partículas para registrar a concentração, que é medida em decibéis; trata-se do aparelho conhecido como ADCP (do inglês - Acoustic Doppler Current Profiler).

O USDH-48, indicado pelo Departamento de Pesquisa Geológica dos Estados Unidos da América (USGS), é produzido em alumínio com corpo hidrodinâmico, possui haste para operação a vau ou de embarcação. Para profundidades de até 2,7 m para uso em coleta por integração na vertical em dois sentidos utiliza bico de 1/4", e pode ser adaptado com um dispositivo para uso em suspensão, podendo-se trocar o bico para os diâmetros menores que 3/16" e 1/8" para amostragens em maiores profundidades, com limite de 5 m. A distância do bico ao fundo do amostrador igual a 9,1 cm garante amostragem apenas do sedimento suspenso (CARVALHO et al, 2000b, p. 32). O equipamento pode ser usado em correntes com velocidade de até  $2,75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (JCTM COMÉRCIO E TECNOLOGIA, 2015).

O USDH-48 é projetado para execução de amostragem isocinética, o que significa que a água e sedimentos entram no bico na mesma velocidade que o fluxo, obtendo uma amostra representativa, possibilitando a determinação da concentração dos sólidos em suspensão (CSS) (SANTOS, 2001).

Carvalho (2008) explana que um dos métodos mais empregados e indicados de amostragem de sedimento suspenso é o método de Igual Incremento de Largura (IIL).



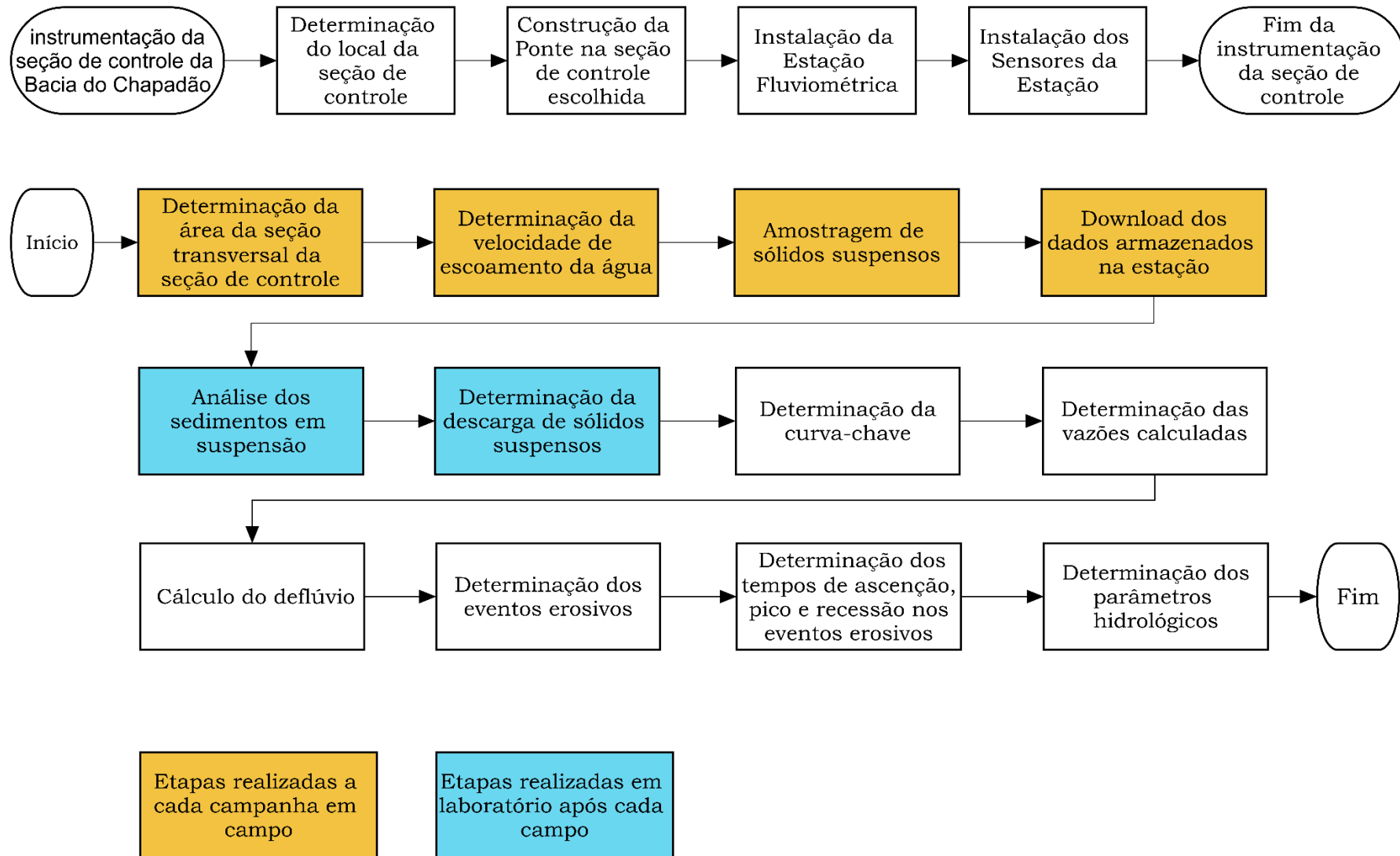
## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

No APÊNDICE A estão apresentados alguns registros fotográficos dos equipamentos utilizados para coleta de dados.

### **4.1 Fluxograma**

As etapas de desenvolvimento do trabalho podem ser visualizadas no fluxograma apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma das etapas do trabalho.



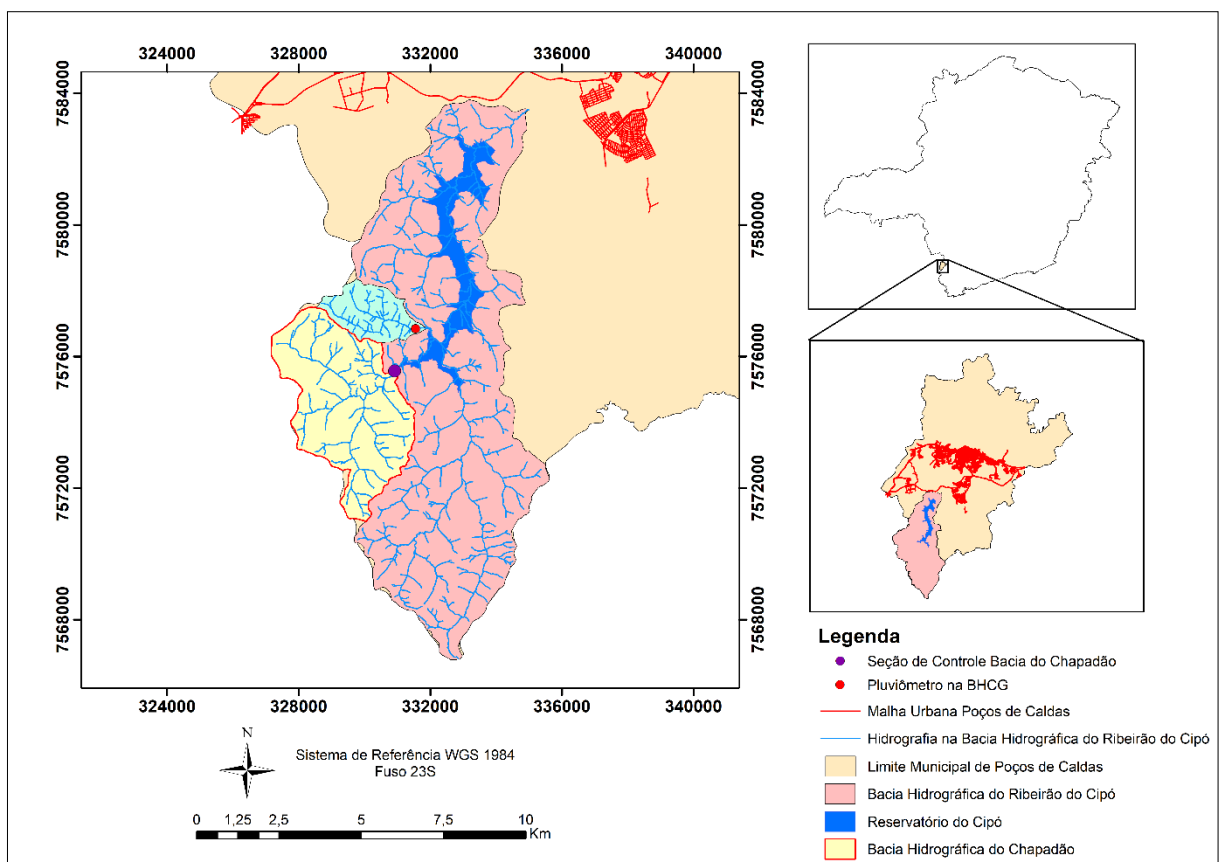
## 4.2 Área de Estudo

A área de estudo desta pesquisa foi a Bacia Hidrográfica do Córrego do Chapadão (BHCC), sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Cipó (BHRC), na qual se encontra a principal fonte de abastecimento e geração de energia do município, a represa do Cipó. A BHCC, localizada a montante da Barragem do Cipó, é uma bacia rural onde são promovidas atividades de mineração e agropecuária.

Melo Neto et al (2017) averiguaram a frequência de chuvas na Bacia Hidrográfica do Córrego do Gigante (BHCG), que também é uma sub-bacia da BHRC, vizinha a BHCC, e que devido à proximidade e características semelhantes, pode ter seu resultado extrapolado para outras sub-bacias da região.

Na Figura 5 está apresentada a malha urbana de Poços de Caldas, os limites da área de estudo destacando a localização do ponto de monitoramento na mesma, a posição relativa da BHCC com sua vizinha, a BHCG, bem como o ponto de coleta dos dados de pluviometria e o reservatório do Cipó.

Figura 5 – Localização da BHCG, pluviômetro, da BHCC e seção de controle.



Fonte: Do autor.

A seção de controle foi escolhida com base nas condições apresentadas no tópico “3.1 Bacias Hidrográficas Experimentais”, e se deu no exutório da BHCC.

Construiu-se uma ponte e realizou-se a instalação de uma estação fluviométrica da marca Solar, modelo ML-2000, na seção de controle da BHCC com medidores contínuos de nível d’água e turbidez a fim de comparar os dados com amostras coletadas diretamente do curso do Ribeirão do Chapadão. Um pluviógrafo instalado na BHCC forneceu os dados de precipitação utilizados nesse trabalho.

A caracterização fisiográfica da área de estudo se deu em ambiente Sistema de Informação Geográfica (SIG) por meio de modelos digitais de elevação e dados vetorizados que permitiram calcular os seguintes parâmetros:

Parâmetros Geométricos:

- Área ( $A$ ) e Perímetro ( $P$ ) da Bacia.
- Fator Forma, dado pela Equação 1:

$$K_f = \frac{L_{méd}}{L_{axial}} \quad (1)$$

$K_f$  é o fator forma da bacia,  $L_{méd}$  é a largura média da bacia e  $L_{axial}$  é o comprimento axial da bacia.

- Coeficiente De Compacidade, dado pela Equação 2:

$$K_C = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

$K_C$  é o coeficiente de compacidade da bacia,  $P$  é o perímetro da bacia e  $A$  é área da bacia.

Parâmetros da Rede de Drenagem:

- Classificação Hierárquica Pelo Método De Strahler
- Densidade De Drenagem, dada pela Equação 3:

$$Dd = \frac{\sum L}{A} \quad (3)$$

$Dd$  é a densidade de drenagem da bacia,  $\sum L$  são comprimento total dos drenos da bacia e  $A$  é área da bacia.

- Extensão Do Rio Principal ( $L_{principal}$ )
- Sinuosidade Do Curso D’Água Principal, dada pela Equação 4:

$$S = \frac{L_{principal}}{L_t} \quad (4)$$

$L_{principal}$  é o comprimento do canal principal e  $L_t$  é o comprimento do talvegue, medido em linha reta da nascente ao exutório.

- Declividade Do Curso D'Água Principal, calculado pelo método da média harmônica ponderada da raiz quadrada das declividades dos trechos retilíneos, dado pela Equação 5:

$$S_3 = \frac{\sum L_i}{\sqrt{\sum \left( \frac{L_i}{\sqrt{D_i}} \right)}} \quad (5)$$

$S_3$  é a declividade do canal principal e  $L_i$  é o comprimento de cada trecho, e  $D_i$  é a declividade em cada trecho, dada pela Equação 6:

$$D_i = \frac{dn_i}{L_i} \quad (6)$$

$dn_i$  é a diferença de cotas entre as extremidades de cada trecho.

- Extensão Média do Escoamento Superficial, dada pela Equação 7:

$$Cm = \frac{1}{4 \cdot Dd} \quad (7)$$

$Cm$  é a extensão média do escoamento superficial e  $Dd$  é a densidade de drenagem.

Parâmetros de Relevos:

- Declividade Média Da Bacia
- Área Da Bacia Com Declividade Inferior a 20 %
- Área Da Bacia Com Declividade Superior a 45 %
- Elevação Máxima Da Bacia
- Elevação Média Da Bacia
- Elevação Mínima Da Bacia

### 4.3 Coleta de dados

A instalação do pluviômetro na BHCG foi realizada em setembro de 2017, e os dados de precipitação com intervalo de registro a cada 5 minutos começaram a ser coletados a partir do dia 28 desse mesmo mês.

A instalação da estação fluviométrica na BHCC aconteceu no início de dezembro de 2017. Dessa forma, as campanhas para coleta dos dados na seção foram efetuadas semanalmente de 11 de dezembro de 2017 a 24 de abril de 2018, período chuvoso, e a partir do início do período seco do ano de 2018, a cada duas semanas, de 10 de maio de 2018 a 06 de dezembro de 2018.

O monitoramento na seção de controle do Ribeirão do Chapadão foi realizado de acordo com o Guia de Práticas Sedimentométricas da ANEEL.

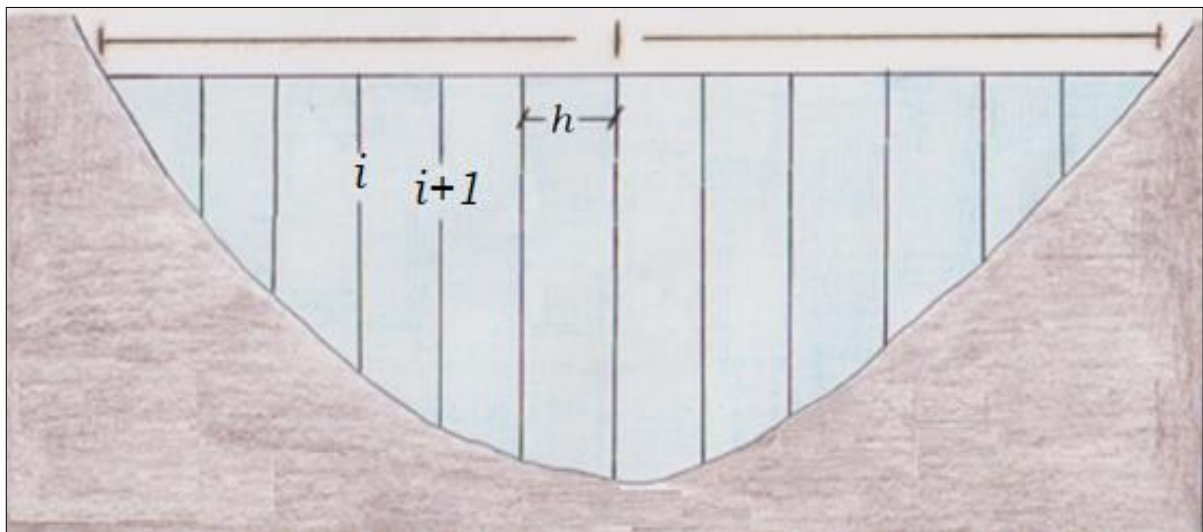
As atividades em cada campanha de monitoramento consistiam em coletar os dados de precipitação na BHCG, armazenados pela estação fluviométrica lá instalada. Na BHCC era realizada a batimetria da seção e a observação de nível d'água e da velocidade do caudal com um micromolinete flowrate sensor Vernier® (0,0 a 4,0 m.s<sup>-1</sup>), que permitiam calcular a vazão na seção de controle pela relação entre vazão e velocidade dada pela Equação 8, obtidos a amostragem de sólidos suspensos com o USDH-48, coletados os dados de nível d'água armazenados pela estação fluviométrica.

$$Q = v \cdot A \quad (8)$$

Q é a vazão em m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, v é a velocidade em m.s<sup>-1</sup> e A é a área da seção em m<sup>2</sup>.

As medidas de velocidade foram realizadas utilizando-se um Micromolinete da Vernier®, e o método da seção média descrito por Santos (2001), que baseado na Figura 6 terá o passo a passo delineado.

Figura 6 - Exemplo das verticais da seção transversal de um rio.



Fonte: Adaptado de Carvalho (2008).

A distância entre verticais depende da largura do rio e da regularidade do escoamento de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 – Distância entre verticais de acordo com a largura da seção do rio.

<b>Largura do rio (m)</b>	<b>Distância entre verticais (m)</b>
<b>≤ 3</b>	0,30
<b>3 a 6</b>	0,50
<b>6 a 15</b>	1,00
<b>15 a 30</b>	2,00
<b>30 a 50</b>	3,00
<b>50 a 80</b>	4,00
<b>80 a 150</b>	6,00
<b>150 a 250</b>	8,00
<b>≥ 250</b>	12,00

Fonte: Santos (2001).

Dependendo da profundidade da vertical realizam-se medidas de velocidades nas porcentagens da profundidade e calculam-se as velocidades médias das verticais conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Obtenção da velocidade média na vertical.

<b>Profundidade (m)</b>	<b>Posição na vertical em que deve se realizar a medição da velocidade, em relação à profundidade "p".</b>	<b>Cálculo da Velocidade Média "v" na vertical</b>
<b>0,1 - 0,6</b>	0,6p	$v = v_{0,6}$
<b>0,6 - 1,2</b>	0,2p ; 0,8p	$v = (v_{0,2} + v_{0,8})/2$
<b>1,2 - 2,0</b>	0,2p ; 0,6p ; 0,8p	$v = (v_{0,2} + 2v_{0,6} + v_{0,8})/4$
<b>2,0 - 4,0</b>	0,2p ; 0,4p ; 0,6p ; 0,8p	$v = (v_{0,2} + 2v_{0,4} + 2v_{0,6} + v_{0,8})/6$
<b>&gt; 4,0</b>	S ; 0,2p ; 0,4p ; 0,6p ; 0,8p ; F *	$v = [v_S + 2(v_{0,2} + v_{0,4} + v_{0,6} + v_{0,8}) + v_F]/10$

Fonte: Adaptado de Santos (2001).

Notas: S = Superfície; F = Fundo.

Os serviços de hidrometria brasileiros costumam utilizar dois métodos para determinação da velocidade média na vertical: o método detalhado, em que o número de pontos em cada vertical é o máximo em função da profundidade, de acordo com a Tabela 3, e o método simplificado, também chamado de método dos dois pontos, que utiliza um ponto a 0,6p para profundidades menores que 0,60 m e dois pontos a 0,2p e 0,8p para profundidades maiores que 0,60 m (SANTOS, 2001).

Este trabalho utilizou o método simplificado para a determinação da vazão de escoamento na seção de controle da Bacia do Chapadão. O método é descrito a seguir, com base na Figura 6:

- i. Subdivisão equidistante de em metros, advinda da Tabela 2;
- ii. Medição da profundidade de cada vertical, a exemplo tomemos a vertical  $i$  e a vertical  $i + 1$ , que possuem respectivamente  $L_i$  metros e  $L_{i+1}$  metros;
- iii. Cálculo da área  $a_i$  é dado pela área do trapézio que representa essa subdivisão, de acordo com a Equação 9:

$$a_i = \left( \frac{L_i + L_{i+1}}{2} \right) \cdot h \quad (9)$$

Em que  $L_i$  e  $L_{i+1}$  são as profundidades em metros das verticais  $i$  e  $i + 1$ ;  $h$  é a distância entre as verticais em metros.

- iv. Medição das velocidades a 20% e a 80% da profundidade em cada vertical.
- v. Cálculo das velocidades médias nas subdivisões, como mostra a Equação 10:

$$v_{ai\text{ méd}} = \frac{v_{i\text{ méd}} + v_{i+1\text{ méd}}}{2} \quad (10)$$

$v_{ai\text{ méd}}$  é a velocidade média de escoamento na região  $a_i$ ;  $v_{i\text{ méd}}$  e  $v_{i+1\text{ méd}}$  são as velocidades médias nas verticais  $i$  e  $i + 1$ .

- vi. Cálculo das vazões nas subdivisões, de acordo com a Equação 11:

$$q_{ai} = v_{ai\text{ méd}} \cdot a_i \quad (11)$$

$q_{ai}$  é a vazão na região  $ai$ ;  $v_{ai\text{ méd}}$  é a velocidade média de escoamento na região  $ai$ .

- e) Cálculo da vazão total, conforme Equação 12:

$$Q = \sum_{i=1}^n q_{ai} \quad (12)$$

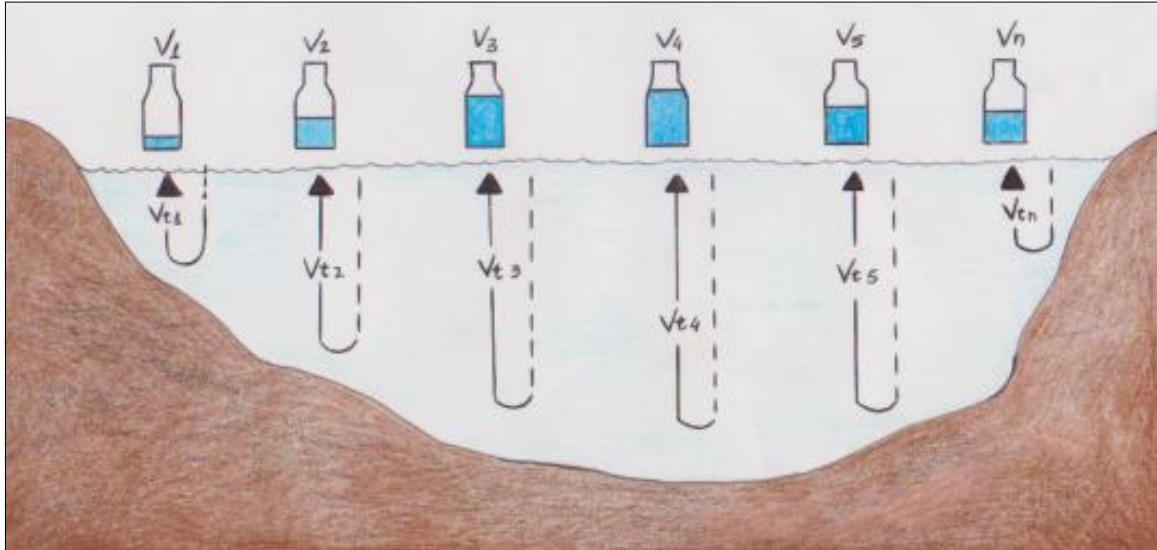
$Q$  é a vazão total na seção de controle e  $q_{ai}$  é a vazão em cada região  $a_i$ .

O Método de Igual Incremento de Largura (IIL), descrito em CARVALHO, 2008, é tido como um dos mais usuais para tomada de dados hidrossedimentológicos. A Figura 7 exhibe a divisão da seção transversal em subseções de largura igual, determinada de acordo com a Tabela 2 para a medição da velocidade de escoamento, na qual de acordo com a velocidade medida nas



verticais e a profundidade dessas, é possível estimar o tempo de amostragem de hidrossedimento.

Figura 7 – Amostras proporcionais as velocidades de transito, amostradas pela metodologia IIL.



Fonte: Adaptado de Carvalho (2008).

A Figura 7 demonstra a metodologia IIL que provê em cada vertical uma amostra com volume ajustado à vazão na subseção, afinal, conhecendo-se a profundidade de cada vertical, e a velocidade de fluxo do escoamento, o tempo de amostragem será aquele necessário para descer e ascender o amostrador de sedimentos, de acordo com a Equação 13 (CARVALHO, 2008):

$$t = \frac{2p}{v} \quad (13)$$

$t$  é o tempo de amostragem em segundos, que deverá ser suficiente para o amostrador descer e subir toda a vertical;  $p$  é a profundidade da vertical em metros;  $v$  é a velocidade de escoamento em metros por segundo.

As amostras podem ser ajuntadas em uma única amostra composta, para a análise que se deseja (CARVALHO, 2008).

Posteriormente à coleta, as amostras foram armazenadas em embalagens de vidro apropriadas e a quantificação dos hidrossedimentos, ou seja, a quantificação da concentração dos sólidos suspensos, realizadas nos laboratórios da UNIFAL. Utilizou-se para tal, filtros de 47 mm no aparato de filtragem com uma bomba a vácuo e kitasato.

#### 4.4 Chuvas erosivas

Para a estimativa da erosividade da chuva de cada evento foram utilizados os dados de precipitação registrados na estação instalada na BHCG.

Foram considerados dois modelos para a estimativa da energia cinética sendo eles desenvolvidos por Wischmeier e Smith (1958) mostrado na Equação 14, e Wagner e Massambani (1988) na Equação 15 abaixo:

$$Ec = 0,119 + 0,0873.Log_{10}(I) \quad (14)$$

$$Ec = 0,153 + 0,0645.Log_{10}(I) \quad (15)$$

$Ec$  refere-se a energia cinética por milímetro de precipitação ( $MJ \cdot ha^{-1} \cdot mm^{-1}$ ) e  $I$  a intensidade média da chuva em  $mm \cdot h^{-1}$ .

Com isso, a energia cinética total produzida pelo evento foi calculada pela Equação 16 abaixo:

$$Ect = Ec \cdot h \quad (16)$$

$Ect$ , a Energia cinética total, é dada em  $MJ \cdot ha^{-1}$  e  $h$  é a lâmina precipitada em mm.

Com base nos cálculos para energia cinética e energia cinética total descritos, foi calculada a Erosividade propriamente dita, o  $EI_{30}$ . O  $EI_{30}$  é o produto da energia cinética da chuva pela intensidade máxima ocorrida em qualquer período de 30 minutos consecutivos, como mostrado na Equação 17:

$$EI_{30} = I_{30} * Ect \quad (17)$$

$EI_{30}$  é a erosividade da chuva em  $MJ \cdot mm \cdot (ha \cdot h)^{-1}$  e  $I_{30}$  a intensidade máxima em 30 minutos consecutivos em  $mm \cdot h^{-1}$ .

Para os eventos erosivos, verificaram-se os parâmetros hidrológicos necessários para o entendimento do transporte de sedimentos na BHCC, pelos seguintes passos:

- Realizou-se a somatória das precipitações anteriores ao evento nos períodos de 24h, 48h, 72h, 96h e 120h;
- Verificou-se o horário de início e fim do evento e por conseguinte, a duração do mesmo;
- Averiguou-se a lâmina precipitada;
- Determinaram-se o horário de início da ascensão da vazão ( $Ta$ ), da vazão de pico ( $Tb$ ) e da recessão da vazão ( $Tc$ ), bem como os valores de vazões respectivos a esses horários ( $Qa$ ,  $Qb$  e  $Qc$ ) e o intervalo de tempo entre a ascensão e recessão ( $\Delta t$ );
- Calculou-se a taxa de variação da vazão ( $\Delta Q/\Delta t$ ), com a Equação 18

$$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right) = \frac{Qc - Qa}{Tc - Ta} \quad (18)$$

- Considerando a vazão no início da ascensão ( $Qa$ ) como sendo a primeira vazão de base ( $Qbase$ ), calculou-se as vazões de base pela Equação 19:

$$Qbase_i = Qbase_{i-1} + 5 \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right) \quad (19)$$

em que multiplicou-se a taxa de variação da vazão por 5 mantendo o mesmo intervalo de tempo das vazões de base, que são calculadas de 5 em 5 minutos;

- Deflúvio Escoado Superficialmente em unidades de vazão ( $DSD$ ), foi estimado pela Equação 20

$$DSD = Qcc - Qbase \quad (20)$$

- Multiplicando o  $DSD$  por 300 segundos, intervalo de tempo dos registros, obteve-se o Deflúvio Escoado em unidade de volume; e
- Efetuou-se o cálculo do coeficiente de escoamento superficial ( $C$ ) por intervalo de tempo pelo Método Racional.

Dessa forma foram obtidos os Hidrogramas dos eventos erosivos. Foram classificados os eventos que apresentaram hidrograma com características de uma chuva individual para determinação e análise do coeficiente de escoamento superficial e das condições de umidade antecedente do solo, bem como a análise do Método do Curva-Número nesses eventos.

#### 4.5 Hidrograma

Os Hidrogramas foram obtidos por meio da curva-chave construída para a seção, uma curva da vazão como função do nível de água ( $Q = f(NA)$ ) a partir dos dados de níveis de água ( $NA$ ) verificados nas campanhas e as vazões observadas ( $Qobs$ ) para os mesmos.

Determinou-se a série de vazão para a seção de controle do Córrego do Chapadão com o mesmo intervalo de registro dos dados de nível d'água, a cada 5 minutos. Os valores de vazão calculados foram denominados Vazão pela Curva-Chave ( $Qcc$ ), de acordo com a Equação 21.

$$Qcc = a(NA)^b \quad (21)$$

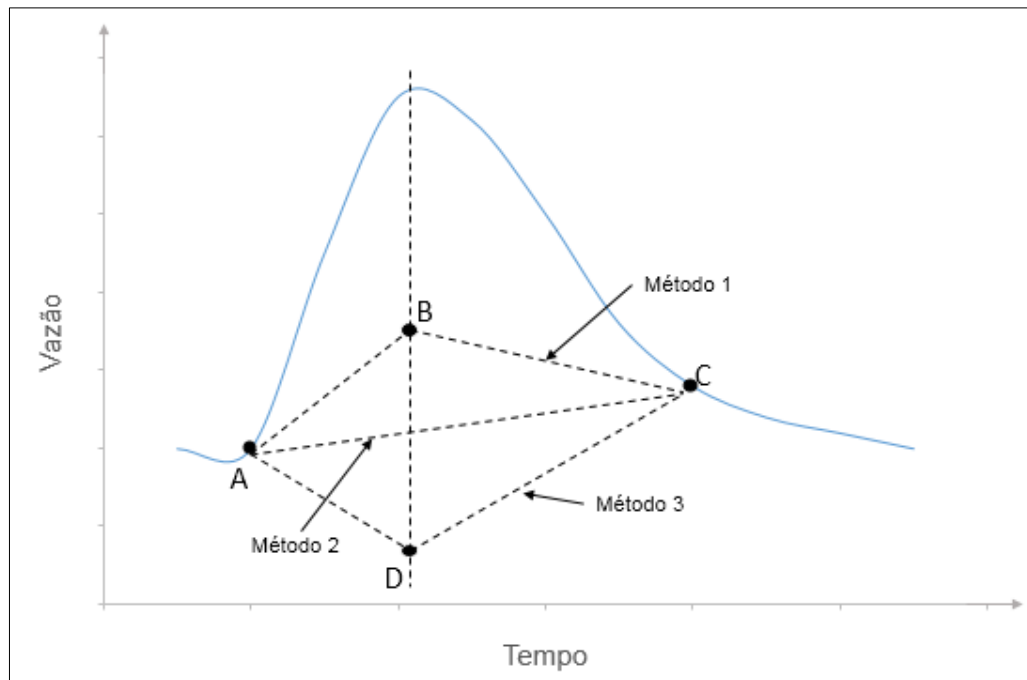
$Q_{cc}$  é a vazão calculada em  $m^3.s^{-1}$ ,  $a$  e  $b$  são coeficientes de ajuste da curva-chave e  $NA$  é o nível d'água em metros.

É importante destacar a importância da amplitude dos dados observados, pois apenas com valores de baixo a altos níveis pode-se garantir uma boa curva-chave para a seção.

Os três métodos mais usualmente empregados na separação do escoamento de base e superficial são, de acordo com a Figura 8:

- Método 1: extrapolar a curva de recessão a partir de C, até encontrar B. Ligar ABC.
- Método 2: AC
- Método 3: extrapolar a tendência no ponto A até encontrar D, unir DC.

Figura 8 – Métodos de separação gráfica de escoamento em hidrograma.



Fonte: Adaptado de Collischonn e Dornelles (2013).

Neste trabalho foi utilizado o Método 2 para a separação do escoamento. E os eventos erosivos que apresentaram hidrograma com características de uma chuva individual (um pico) foram classificados para determinação e análise do coeficiente de escoamento superficial e condições de umidade antecedente do solo.

A lâmina escoada pôde ser obtida dividindo-se o volume escoado encontrado no hidrograma pela área da bacia.

#### 4.6 O Método Racional

O Método Racional permite calcular a vazão máxima por meio da Equação 22:

$$Q_{m\acute{a}x} = \frac{C \cdot i \cdot A}{360} \quad (22)$$

$C$  é o coeficiente *runoff* (adimensional),  $i$  é a intensidade da chuva em  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $A$  é a área de drenagem da bacia em ha, e 360 é um fator de conversão de unidades para que  $Q_{m\acute{a}x}$ , vazão máxima de escoamento superficial, seja dada em  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ .

A intensidade  $i$  foi obtida pela relação entre precipitação total e duração da chuva, de acordo com a Equação 23:

$$i = \frac{PT}{t} \quad (23)$$

$PT$  é a precipitação total em mm, e  $t$  é o tempo de duração da chuva em horas.

Substituindo a Equação 23 na Equação 22, temos a Equação 24:

$$Q_{m\acute{a}x} = \frac{C \cdot PT \cdot A}{t \cdot 360} \quad (24)$$

Isolando para  $C$ , obtemos a Equação 25:

$$C = \frac{Q_{m\acute{a}x} \cdot t \cdot 360}{PT \cdot A} \quad (25)$$

O produto entre vazão e tempo resulta no volume escoado de modo que de acordo com a Equação 26 temos:

$$C = \frac{V_{esc} \cdot 360}{PT \cdot A} \quad (26)$$

$V_{esc}$  é o volume escoado em  $\text{m}^3$ . É válido ressaltar que na Equação 26 pode-se retirar o fator de conversão 360 ao se trabalhar com  $V_{esc}$  em litros,  $PT$  em milímetros e  $A$  em metros quadrados.

Utilizou-se a Equação 26 para verificação dos valores do coeficiente *runoff* nos eventos erosivos analisados e sua relação com a umidade antecedente (total precipitado acumulado nas horas anteriores ao evento considerado).

Calculou-se um valor de  $C$  para cada intervalo de registro, e multiplicando o mesmo pela precipitação no intervalo de registro obteve-se o Escoamento Superficial no intervalo, e a somatória destes resultados foi comparada com a lâmina escoada obtida pelo Hidrograma e pelo Método do Curva-Número.

#### 4.7 O Método do Curva-Número

O escoamento superficial foi calculado para os eventos erosivos pela expressão do Método Curva-Número, de acordo com a Equação 27:

$$ES = \frac{(PT - 0,2 S)^2}{PT + 0,8 S} \quad (27)$$

$ES$  é o escoamento superficial;  $PT$  é a precipitação total,  $Ia$  são as abstrações iniciais;  $S$  é a capacidade máxima de infiltração, todos em milímetros. É válido ressaltar que a Equação 27 é válida para  $PT > 0,2 S$ , caso contrário  $ES$  será igual a 0 mm, ou seja, o fenômeno fisicamente representado não pode ser calculado quando a precipitação total for menor que as abstrações iniciais.

A capacidade máxima de infiltração é obtida pela Equação 28:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (28)$$

$CN$  é o curva-número (parâmetro que dá nome ao método) e os valores numéricos são coeficientes para ajuste de unidades quando se expressa  $S$  em mm.

Neste estudo determinou-se o valor de  $CN$  com base nas características do solo advindas da caracterização da área de estudo e nos dados de precipitação das 120h anteriores (condições de umidade antecedente, ou antecedente moisture conditions - AMC) ao evento erosivo, utilizando para isso as características dos tipos de solo em acordo com Pruski, Brandão e Silva (2004). Na Tabela 4 está apresentada a descrição de uso e ocupação adaptada e considerada no trabalho.

Ressalta-se que, como o Método do Curva-Número pode ser utilizado quando uma bacia não tem cobertura vegetal homogênea (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013), ou mesmo quando existem dois tipos de solo na bacia hidrográfica, o valor de  $CN$  é calculado na forma de uma média ponderada dos valores tabelados

Tabela 4 – Associação das coberturas e usos do solo da BHCC de acordo com a literatura.

<b>Classe de Uso</b>	<b>Considerada de acordo com a Pruski, Brandão e Silva (2004)</b>
Campo associado à umidade	Pastagens para pastoreio má
Campo de altitude	Pastagens para pastoreio boa
Cultura	Cultivo em fileira com curva de nível boa
Massa d'água	Pastagens para pastoreio má
Mata nativa	Floresta boa
Pasto	Pastagens para pastoreio regular
Reflorestamento	Floresta regular
Solo exposto	Sem cultivo

Fonte: Do autor.

#### 4.8 Curva de descarga de sedimentos

Foram relacionados os dados de concentração de sólidos suspensos (*CSS*) coletados nas campanhas para construção da curva de descarga de sedimentos ( $CSS = f(Q)$ ). Estimou-se a *CSS* para os valores de  $Q_{cc}$ , diversos tipos de curvas foram testados, e o que apresentou melhor coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi o ajuste exponencial, de acordo com a Equação 29.

$$CSS = a \cdot e^{b \cdot Q_{cc}} \quad (29)$$

*CSS* é a concentração de sólidos suspensos em miligramas por litro,  $Q_{cc}$  é a vazão calculada em litros por segundo,  $a$  e  $b$  são coeficientes de ajuste da curva de descarga de sedimentos.

Foi realizado o cálculo da massa de sólidos suspensos transportados no evento com a Equação 30

$$MSST = \frac{Q_{cc} \times 300 \times CSS}{10^9} \quad (30)$$

$Q_{cc}$  é a vazão calculada em litros por segundo, *CSS* é a concentração de sólidos suspensos em miligramas por litro, os valores 300 e  $10^9$  são fatores de conversão para que a *MSST*, a massa de sólidos suspensos transportada, seja dada em toneladas.

Uma vez obtida a *MSST*, realizou-se a somatória dos mesmos para a estimativa da *MSST* mensal, em toneladas por mês.

Eduardo, (2012), explana que ao simplificar a Equação Universal da Perda De Solo (Universal Soil Loss Equation – USLE) considerando os fatores relativos a declividade, cobertura e manejo e práticas conservacionistas do solo como constantes, uma das metodologias utilizadas para encontrar o fator de erodibilidade do solo ( $K$ ) é dada pela Equação 31:

$$A = K R \quad (31)$$

Em que  $A$  é a perda de solo, no caso deste trabalho *MSST*, e  $R$  é a erosividade da chuva, no caso deste trabalho representada pelo  $EI_{30}$ . Utilizou-se da Equação 31 para uma estimativa do fator de erodibilidade ( $K$ ) do solo na Bacia do Chapadão.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados dos registros diários e tabelas utilizadas para análise dos resultados encontram-se no APÊNDICE B.

### 5.1 A Área de Estudo

As Figuras 9 a 12 apresentam a seção de controle instrumentada.

A construção da ponte foi realizada com três toras de eucalipto tratadas. As toras foram vazadas com uma furadeira e presas umas às outras com barras rosqueadas de 3/8, porcas e arruela.

Figura 9 – Ponte construída acima da Seção de Controle. Por dentro do cano descem até o ribeirão os sensores de nível e turbidez.

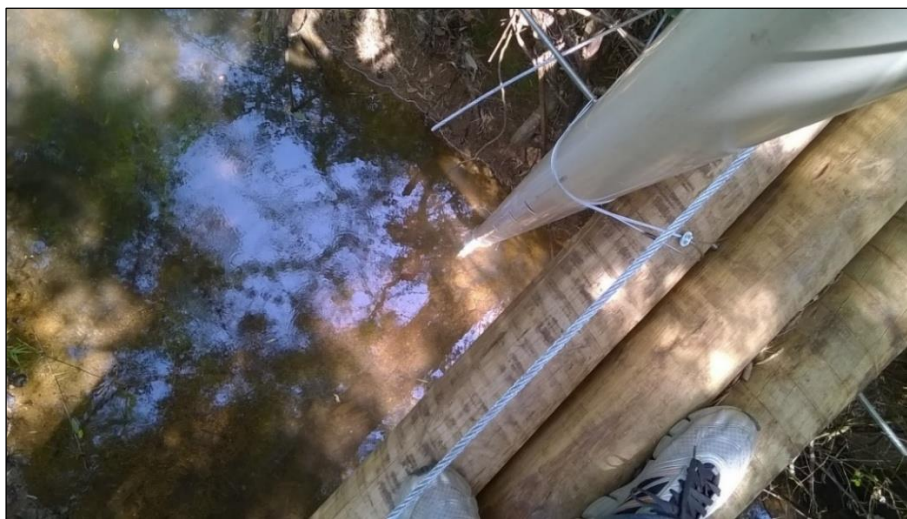


Fonte: Do autor.

Os sensores da estação fluviométrica descem por dentro de um cano preso ao lado da ponte para encontrar o ribeirão, o cano é furado a cada 15 centímetros pra permitir a entrada de água sem perda de carga e manter o nível dentro do mesmo igual ao nível do lado de fora. O cano serve como proteção aos sensores.



Figura 10 – Sensores de Turbidez e Nível d'água protegidos pelo cano.



Fonte: Do autor.

A estação fluviométrica foi instalada cerca de 15 m de distância do ribeirão, e os fios dos sensores levados ao rio por dentro do cano que pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 – Estação fluviométrica.



Fonte: Do autor.

Figura 12 – Cercado da estação hidrológica.



Fonte: Do autor.

A caracterização fisiográfica da área de estudo realizada em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG) está apresentada na

Tabela 5.

Tabela 5 – Caracterização da BHCC.

<b>TIPO</b>	<b>PARÂMETROS</b>	<b>VALOR</b>
<b>Parâmetros geométricos</b>	Área	15,90 km <sup>2</sup>
	Perímetro	19,48 km
	Fator de forma	0,38
	Coeficiente de compacidade	1,37
<b>Parâmetros da rede de drenagem</b>	Classificação hierárquica pelo método de Strahler	4
	Densidade de drenagem	2,74 km km <sup>-2</sup>
	Extensão do rio principal	5,39 km
	Sinuosidade do curso d'água principal	1,19
	Declividade do curso d'água principal	0,69 %
	Extensão média do escoamento superficial	0,09 km
<b>Parâmetros de relevo</b>	Declividade média da bacia	11,61 %
	Área da bacia declividade inferior a 20 %	84,34 %
	Área da bacia declividade superior a 45 %	0,63 %
	Elevação máxima da bacia	1431 m
	Elevação média da bacia	1318 m
	Elevação mínima da bacia	1270 m

Fonte: Do autor.

Bacia de grande porte com menor tendência a enchentes, porém, apresenta uma tendência mediana a enchentes ser de grandes proporções caso venham a ocorrer. De acordo com a classificação Strahler a bacia possui uma ramificação significativa, o que vai de encontro com a drenagem regular verificada para o local,

que favorece a infiltração em detrimento do escoamento superficial. É verificado ainda uma extensão média no canal principal, corroborando com a densidade de drenagem regular.

O canal principal possui uma sinuosidade que indica formas transicionais, regulares e irregulares, uma declividade alta, que influencia na velocidade de escoamento, conseqüentemente no tempo de concentração, na infiltração e nos processos erosivos.

A Extensão Média Do Escoamento Superficial apresentou um valor relativamente baixo apesar de a densidade de drenagem ser moderada.

A declividade média da bacia indica um relevo ondulado, característica observada em campo e também ao elaborar um mapa da declividade (Figura 13), pois observa-se que a maior parte da bacia apresenta um relevo suave ondulado a ondulado.

Elevada abrangência da área total da bacia possui declividade inferior a 20%, indicando que o principal tipo de relevo na região é suave.

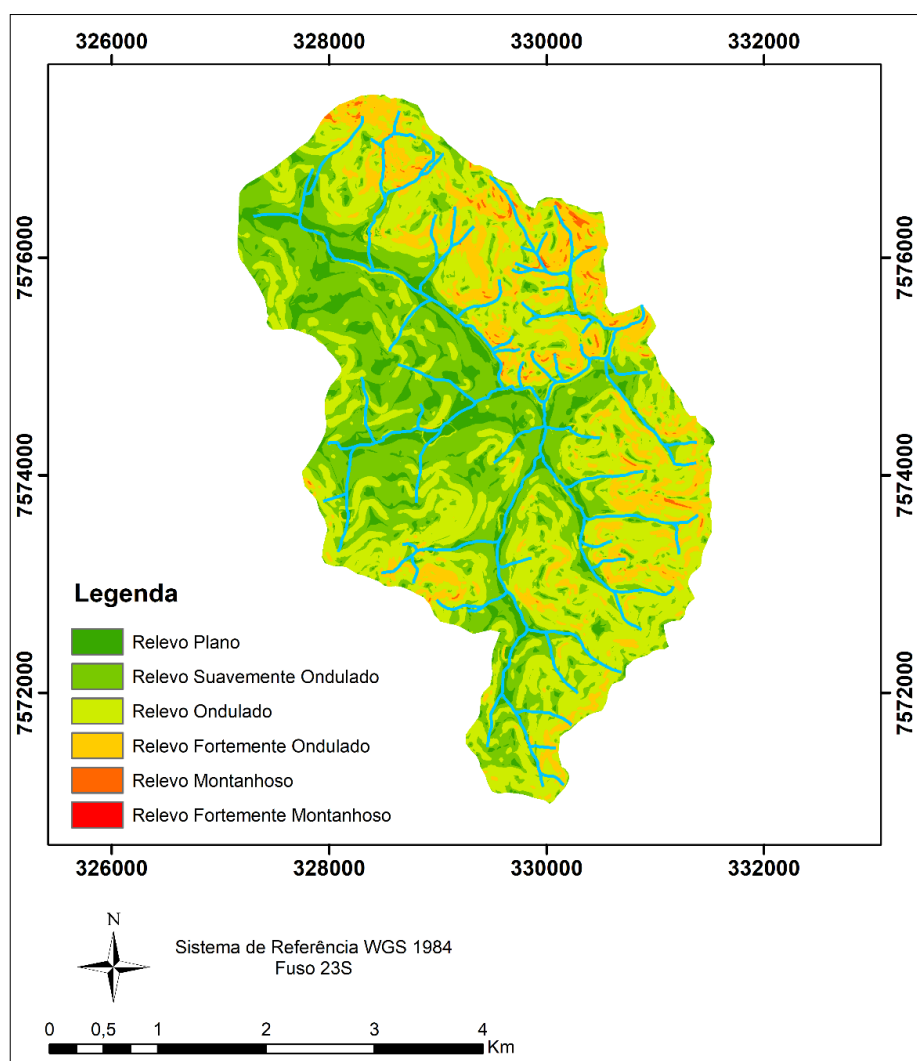
Apenas 0,63% da área da bacia possui declividade maior que 45%, essa área deve ser destinada à APP de acordo com a legislação ambiental brasileira.

Percebe-se uma grande amplitude altimétrica, que tem influência na precipitação, nas perdas de água pela evaporação e transpiração, no escoamento superficial, na temperatura e na decisão do local de instalação de equipamentos de monitoramento, de modo a apresentarem resultados representativos da bacia.

Segundo a classificação de Köppen (1948) o clima da região possui os subtipos Cwa e Cwb. Para altitude superior a 1100 m predomina o Cwb e em áreas baixas, o Cwa. O clima Cwb possui inverno seco e verão brando e chuvoso. No período chuvoso, a temperatura média do mês mais quente não chega a 22°C e o índice pluviométrico anual fica entre 1300 a 1700 mm. No período seco, de maio a setembro, a temperatura média do mês mais frio fica em torno de 16,5°C e, devido a essa queda na temperatura, há uma baixa evapotranspiração. O clima Cwa apresenta inverno seco e verão quente e chuvoso, sendo que no mês mais quente a temperatura média excede os 22°C, no mais frio é inferior a 18°C e a pluviometria anual varia entre 1100 e 1700 mm. O período chuvoso varia entre janeiro e fevereiro, o período seco está entre abril e setembro, sendo julho o mês com maior estresse hídrico (TINÓS, 2011).

Na Figura 13 está apresentado o mapa de declividades da BHCC e, assim como indicado na Tabela 6, a classe de declividade ondulada é a mais abrangente na Bacia Hidrográfica. De acordo com Purcino (2017), as maiores declividades são poucas, relativas a pequenos divisores dentro da bacia e a região em que faz divisa com a BHCG.

Figura 13 – Mapa de Declividade da BHCC.



Fonte: Adaptado de PURCINO (2017).

Tabela 6 – Abrangência das Classes de Declividades\* na BHCC.

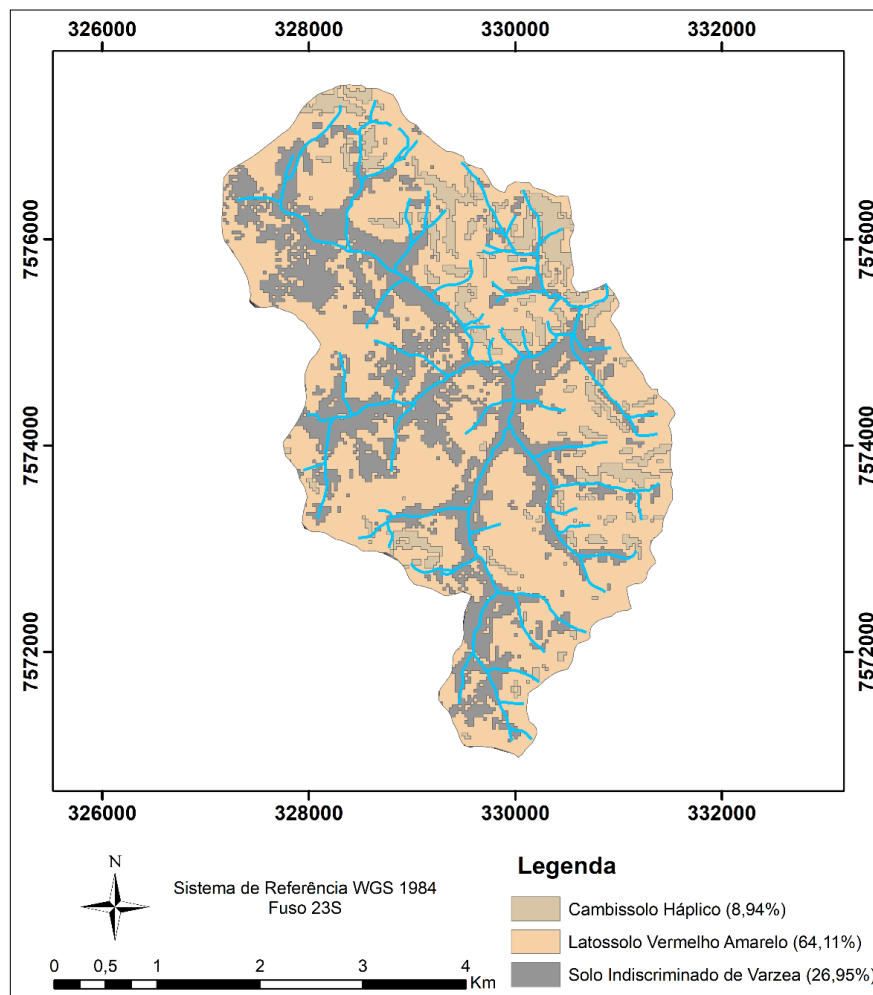
Declividade (%)	Declividade (Graus)	Descrição	Área (km <sup>2</sup> )	%
< 3	≅ 2	Plano	1,56	9,81
3 - 8	≅ 4	Suavemente ondulado	5,23	32,87
8 - 20	≅ 10	Ondulado	6,62	41,66
20 - 45	≅ 25	Fortemente ondulado	2,40	15,08
45 - 75	≅ 35	Montanhoso	0,10	0,62
> 75	≅ 37	Fortemente montanhoso	0,001	0,01

Fonte: Adaptado de PURCINO (2017).

Notas: 100% de declividade = 45°, \*Classificação realizada de acordo com Embrapa (1979).

Purcino (2017) elaborou um mapa de solos para a BHCC, e na Figura 14 está apresentada uma versão deste mesmo mapa.

Figura 14 – Mapa de Solos da BHCC.

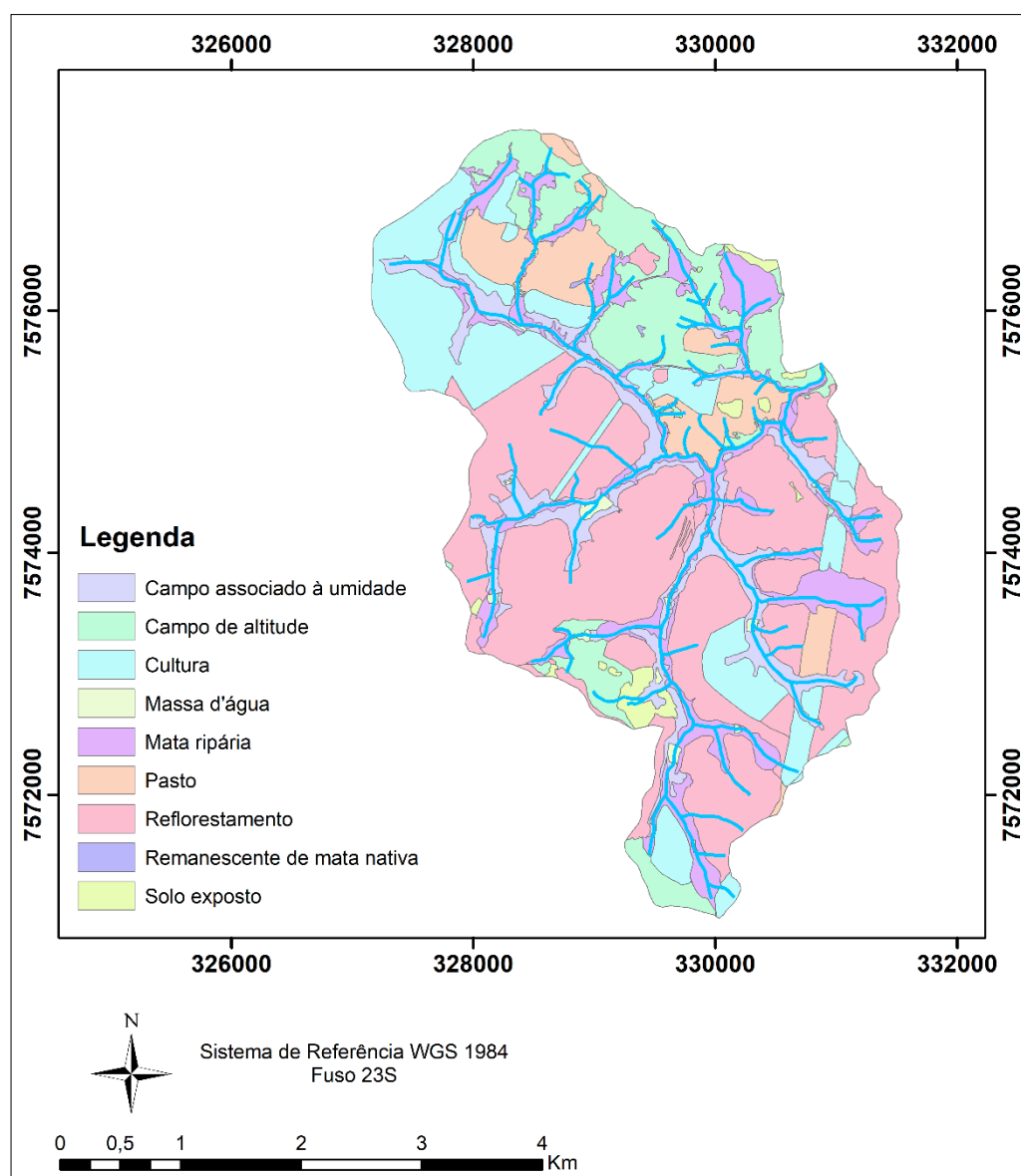


Fonte: Adaptado de PURCINO (2017).

Ao comparar a Figura 14 com a Figura 13 nota-se que os Cambissolos estão situados em relevos mais acidentados, o Solo Indiscriminado de Várzea em regiões mais planas, e os latossolos em regiões intermediárias, relativas a regiões mais suavemente onduladas a onduladas, não tão fortemente ondulada. Ademais, na Figura 14 observa-se a predominância de latossolo vermelho-amarelo, que de acordo com Benda et al, (2012), são solos não hidromórficos, possuem zona de aeração e textura média (relativa ao intemperismo do horizonte B), que promove elevada permeabilidade, sendo classificados de bem até acentuadamente drenados.

Na Figura 15 está apresentado o mapa de uso e cobertura do solo da BHCC e pode ser observado o alto nível de antropização da região.

Figura 15 – Mapa de uso e cobertura do solo da BHCC.



Fonte: Do autor.

Tabela 7 – Classes de uso e ocupação do solo na BHCC.

<b>Classe de Uso e Ocupação</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentagem</b>
<b>Campo associado à umidade</b>	1,69	10,65%
<b>Campo de altitude</b>	1,99	12,54%
<b>Cultura</b>	2,39	15,03%
<b>Massa d'água</b>	0,10	0,65%
<b>Mata nativa</b>	2,03	12,74%
<b>Pasto</b>	1,38	8,70%
<b>Reflorestamento</b>	6,12	38,48%
<b>Solo exposto</b>	0,19	1,21%

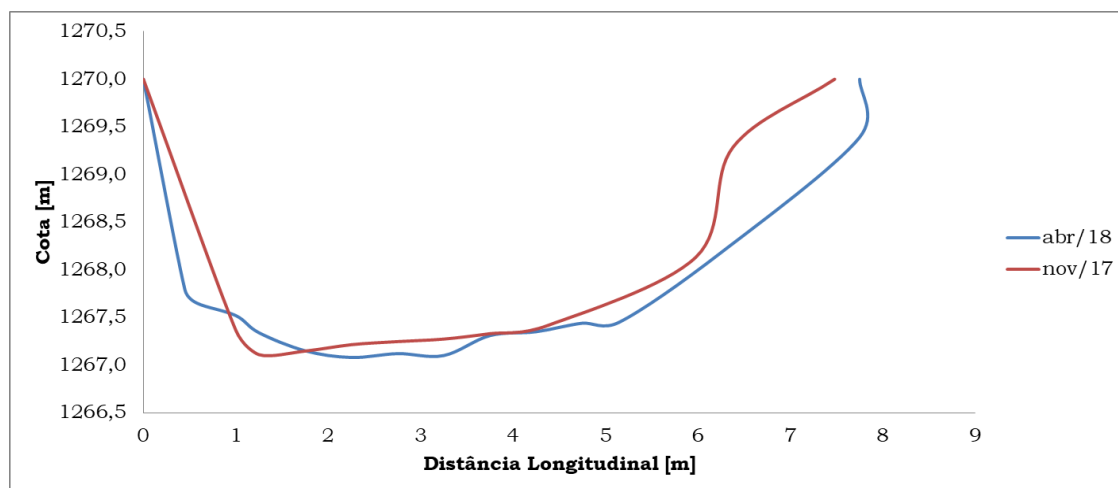
Fonte: Do autor.

### 5.1.1 Perfil altimétrico da seção de controle

Após a devida instrumentação da BHCC, realizou-se uma batimetria para aferição do perfil altimétrico da seção. Porém, durante os monitoramentos, era notável uma pequena alteração no leito do ribeirão devido a presença de muitos seixos, e após alguns meses de monitoramento optou-se por realizar outro levantamento do perfil.

Na comparação dos dois perfis, conforme Figura 16, nota-se a alteração, inclusive uma erosão nos taludes, tanto na margem esquerda quanto na margem direita.

Figura 16 – Comparação entre os perfis da seção de monitoramento de nov/17 e abr/18.

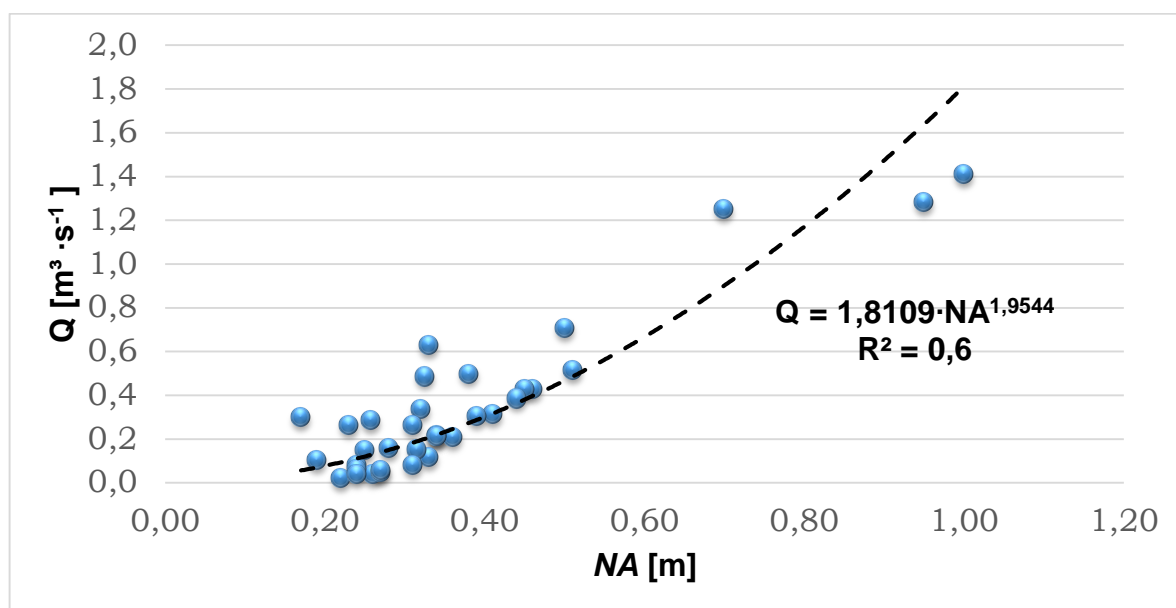


Fonte: Do autor.

## 5.2 Curva-chave

Na Figura 17 está apresentada a Curva-Chave construída com os dados de nível d'água ( $NA$ ) e vazão observada ( $Q_{obs}$ ).

Figura 17 – Curva-chave.



Fonte: Do autor.

Nota-se que a maioria dos dados estão concentrados na parte inferior da curva. A alteração do leito da seção, evidenciada na Figura 16, pode explicar o valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que indica a qualidade do ajuste, na curva-chave gerada com os dados observados. Devido à característica inerente do processo que avalia o leito do ribeirão como constante, uma vez que cada nível de água será responsável por uma vazão calculada, no caso de alteração do leito, valores iguais de níveis d'água observados correspondem a diferentes vazões, causando a diminuição do valor de  $R^2$ . Este valor de  $R^2$  poderia aumentar com a continuação do trabalho ao passo que mais observações fossem realizadas.

Interessante notar, também, na Figura 17 que foram observados valores variando de 0,17 m até 1 m de nível d'água, caracterizando, assim, a amplitude recomendada para uso da equação ajustada. No entanto, vale salientar que a observação em que o nível d'água estava a 1 m, aconteceu no dia 13/03/2018, após um grande evento de precipitação registrado no dia 10/03/2018, em que o nível d'água indicado pelo sensor foi de 2,78 m. Apesar da não oportunidade da observação desse evento em campo, uma evidência dessa cheia está apresentada na Figura 18, onde nota-se folhas presas até essa altura na régua instalada na seção, que certamente foram carregadas pela água.



Figura 18 – Evidência da cheia registrada pelo sensor no dia 10/03/2018.



Fonte: Do autor.

O ajuste da curva-chave e os dados de nível d'água da Estação Fluviométrica, permitiram a construção da série de vazão do Córrego do Chapadão com o mesmo intervalo de registro do nível d'água, ou seja, a cada 5 minutos.

### 5.3 Chuvas erosivas

Na Tabela 8 estão apresentados os valores de erosividade das chuvas. A erosividade expressa pelo  $EI_{30}$ , estimadas pela metodologia de Wischmeier e Smith (1958) e Wagner e Massambani (1988) foram respectivamente 6528,4 e 6883,5  $MJ \cdot mm \cdot (ha \cdot h)^{-1}$ , sendo valores condizentes com os encontrados por Melo Neto et al (2017) para a BHCG, que promove uma alta erosividade no local, com valores em torno de  $8000 MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$ . É válido lembrar que chuvas com  $3600 MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$  ou mais são altamente erosivas.

Além destes dados, a tabela traz informações sobre a precipitação, duração e intensidade da chuva para cada evento registrado.

Tabela 8 – Cálculo da Erosividade da Chuva.

(continua)

DIA	Precipitação [mm]	Duração [h]	Intensidade [mm·h <sup>-1</sup> ]	Ec <sup>1</sup>	Ec <sup>2</sup>	ECT <sup>1</sup>	ECT <sup>2</sup>	I <sub>30</sub>	EI <sub>30</sub> [MJ·mm·(ha·h) <sup>-1</sup> ]	
									1	2
27/10/2017	29,00	8,42	3,45	0,17	0,19	4,81	5,44	11,60	55,81	63,13
29/10/2017	17,80	5,25	3,39	0,17	0,19	2,94	3,33	19,20	56,49	63,98
11/04/2017	20,20	3,42	5,91	0,19	0,20	3,76	4,10	27,60	103,91	113,06
11/10/2017	20,60	6,42	3,21	0,16	0,19	3,36	3,82	17,60	59,18	67,32
20/11/2017	20,60	5,75	3,58	0,17	0,19	3,45	3,89	20,80	71,72	80,87
22/11/2017	28,80	7,16	4,02	0,17	0,19	4,95	5,53	16,00	79,15	88,47
22/11/2017	22,80	10,58	2,16	0,15	0,17	3,38	3,98	18,80	63,49	74,80
30/11/2017	23,80	4,16	5,72	0,19	0,20	4,41	4,80	23,20	102,22	111,46
12/07/2017	24,00	4,00	6,00	0,19	0,20	4,49	4,88	31,60	141,77	154,10
30/12/2017	60,20	6,92	8,70	0,20	0,21	12,10	12,86	57,60	697,03	740,65
31/12/2017	21,20	6,17	3,44	0,17	0,19	3,52	3,98	57,60	202,48	229,07
01/01/2018	35,80	2,17	16,52	0,23	0,23	8,07	8,29	37,60	303,33	311,71
03/01/2018	19,40	3,33	5,83	0,19	0,20	3,60	3,93	22,80	82,19	89,51
07/01/2018	37,80	19,67	1,92	0,14	0,17	5,43	6,48	12,00	65,21	77,70
08/01/2018	35,60	15,75	2,26	0,15	0,18	5,34	6,26	12,00	64,05	75,12
11/01/2018	49,80	3,58	13,91	0,22	0,23	10,90	11,29	50,00	544,85	564,60
23/01/2018	25,80	1,08	23,89	0,24	0,24	6,17	6,24	34,60	213,63	215,93
13/02/2018	30,80	3,17	9,73	0,21	0,22	6,32	6,68	24,80	156,78	165,55
26/02/2018	33,80	4,67	7,24	0,19	0,21	6,56	7,05	32,00	209,88	225,45
27/02/2018	18,60	2,83	6,57	0,19	0,21	3,54	3,83	14,00	49,58	53,58
07/03/2018	34,00	2,75	12,36	0,21	0,22	7,29	7,60	56,80	413,94	431,51
10/03/2018	89,60	4,58	19,55	0,23	0,24	20,76	21,17	64,00	1328,76	1354,92

Tabela 8 – Cálculo da Erosividade da Chuva.

(conclusão)

DIA	Precipitação [mm]	Duração [h]	Intensidade [mm·h <sup>-1</sup> ]	Ec <sup>1</sup>	Ec <sup>2</sup>	ECT <sup>1</sup>	ECT <sup>2</sup>	I <sub>30</sub>	EI <sub>30</sub> [MJ·mm·(ha·h) <sup>-1</sup> ]	
									1	2
15/03/2018	58,40	3,42	17,08	0,23	0,23	13,23	13,58	63,60	841,60	863,52
16/03/2018	13,40	2,33	5,74	0,19	0,20	2,48	2,71	22,80	56,61	61,71
20/03/2018	<b>18,00</b>	<b>1,25</b>	<b>14,40</b>	<b>0,22</b>	<b>0,23</b>	<b>3,96</b>	<b>4,10</b>	<b>23,60</b>	<b>93,51</b>	<b>96,73</b>
20/03/2018	30,40	4,08	7,45	0,20	0,21	5,93	6,36	48,00	284,71	305,32
23/03/2018	22,40	3,72	6,03	0,19	0,20	4,19	4,55	20,00	83,82	91,09
03/04/2018	20,80	4,00	5,20	0,18	0,20	3,78	4,14	27,20	102,69	112,69
<b>Total</b>									<b>6528,4</b>	<b>6883,5</b>

Fonte: Do autor.

Notas: 1- Wischmeier e Smith (1958); 2- Wagner e Massambani (1988); Ec - Energia cinética; ECT - Energica cinética total; I<sub>30</sub> - Intensidade máxima em 30min; EI<sub>30</sub> - Erosividade da chuva.

Os valores encontrados pela metodologia de Wischmeier e Smith (1958) são em torno de 92% do valor encontrado pela expressão indicada por Wagner e Massambani (1988), bem próximos.

Pela equação de Wischmeier e Smith (1958) o maior valor de erosividade encontrado foi  $1328,76 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot(\text{ha}\cdot\text{h})^{-1}$ , valor que representa 20% da erosividade total calculada por este método. Já pela equação de Wagner e Massambani (1988) o maior valor de erosividade encontrado foi de  $1354,92 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot(\text{ha}\cdot\text{h})^{-1}$ , que representa 19% da erosividade total encontrada por este método.

A erosividade possui relação não só com o total precipitado, mas também com a intensidade da chuva, dessa forma, para chuvas com lâminas precipitadas semelhantes, as que ocorrem em menor duração apresentam maior erosividade.

Os eventos erosivos que apresentaram hidrograma com características de uma chuva individual foram classificados para determinação e análise do coeficiente de escoamento superficial e condições de umidade antecedente do solo. Os eventos classificados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Eventos erosivos classificados para determinação de C.

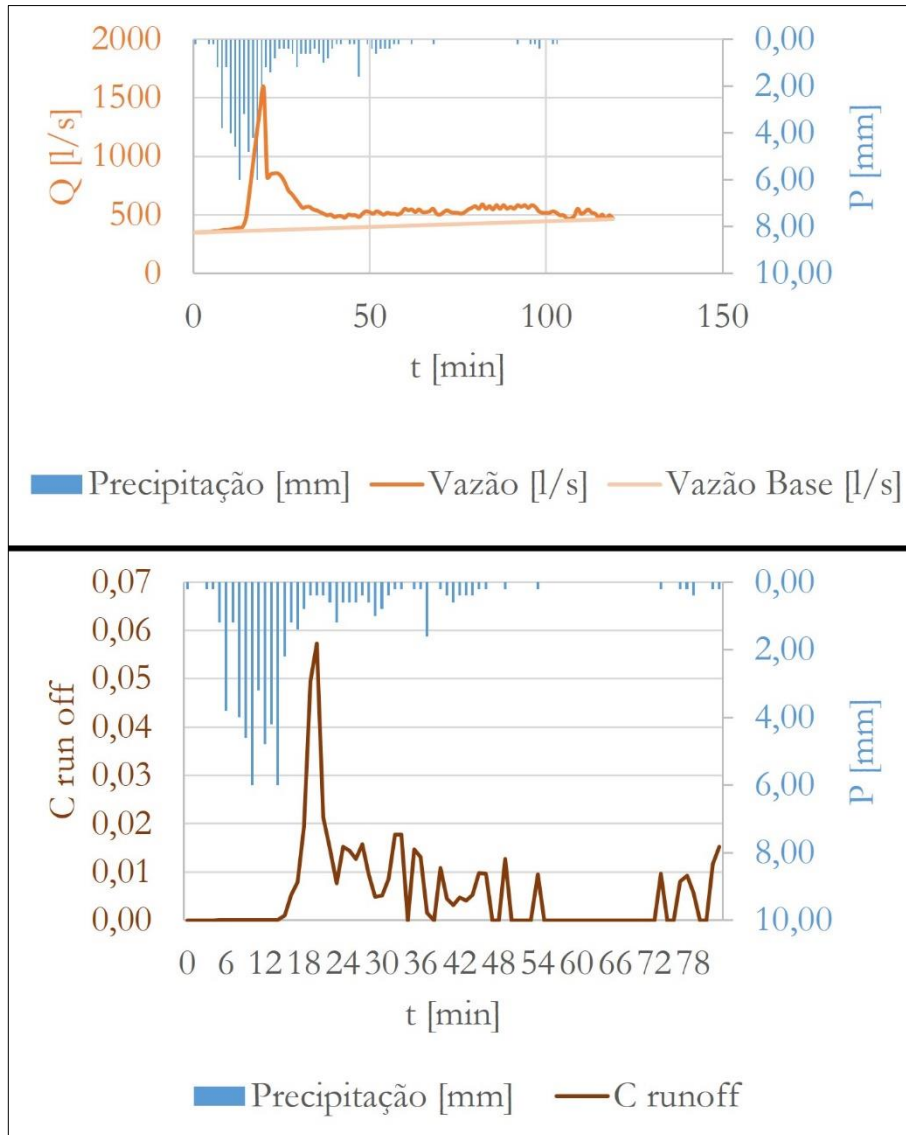
<b>29/12/2017</b>	Evento 1
<b>01/01/2018</b>	Evento 2
<b>26/02/2018</b>	Evento 3
<b>27/02/2018</b>	Evento 4
<b>07/03/2018</b>	Evento 5
<b>10/03/2018</b>	Evento 6
<b>15/03/2018</b>	Evento 7
<b>20/03/2018</b>	Evento 8
<b>20/03/2018</b>	Evento 9
<b>23/03/2018</b>	Evento 10

Fonte: Do autor.

#### **5.4 Hidrogramas e Coeficiente de escoamento pelo Método Racional**

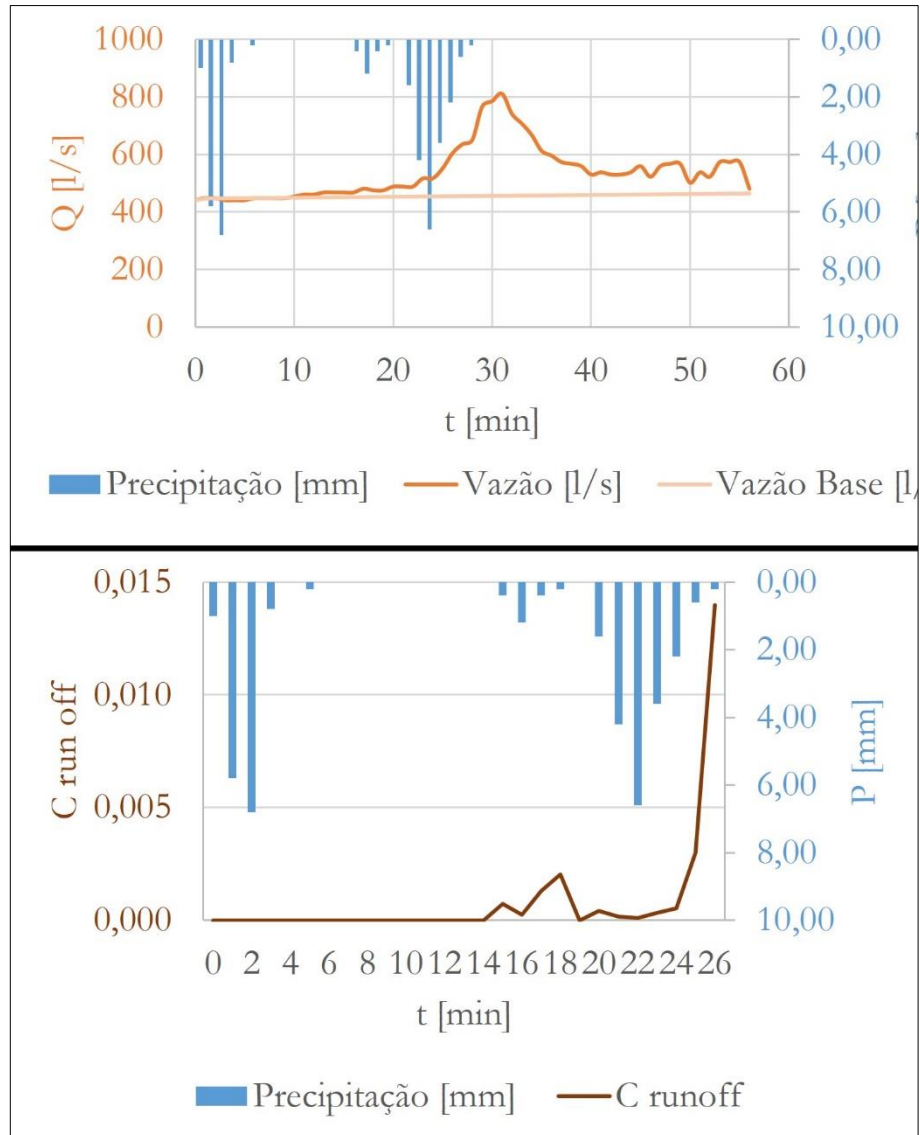
Nas Figuras 19 a 28 estão apresentados os hidrogramas dos eventos classificados e juntamente a estes pode ser observado o comportamento do coeficiente de escoamento superficial (*runoff*) obtido por analogia ao Método Racional.

Figura 19 – Hidrograma e Comportamento de C do Evento 1.



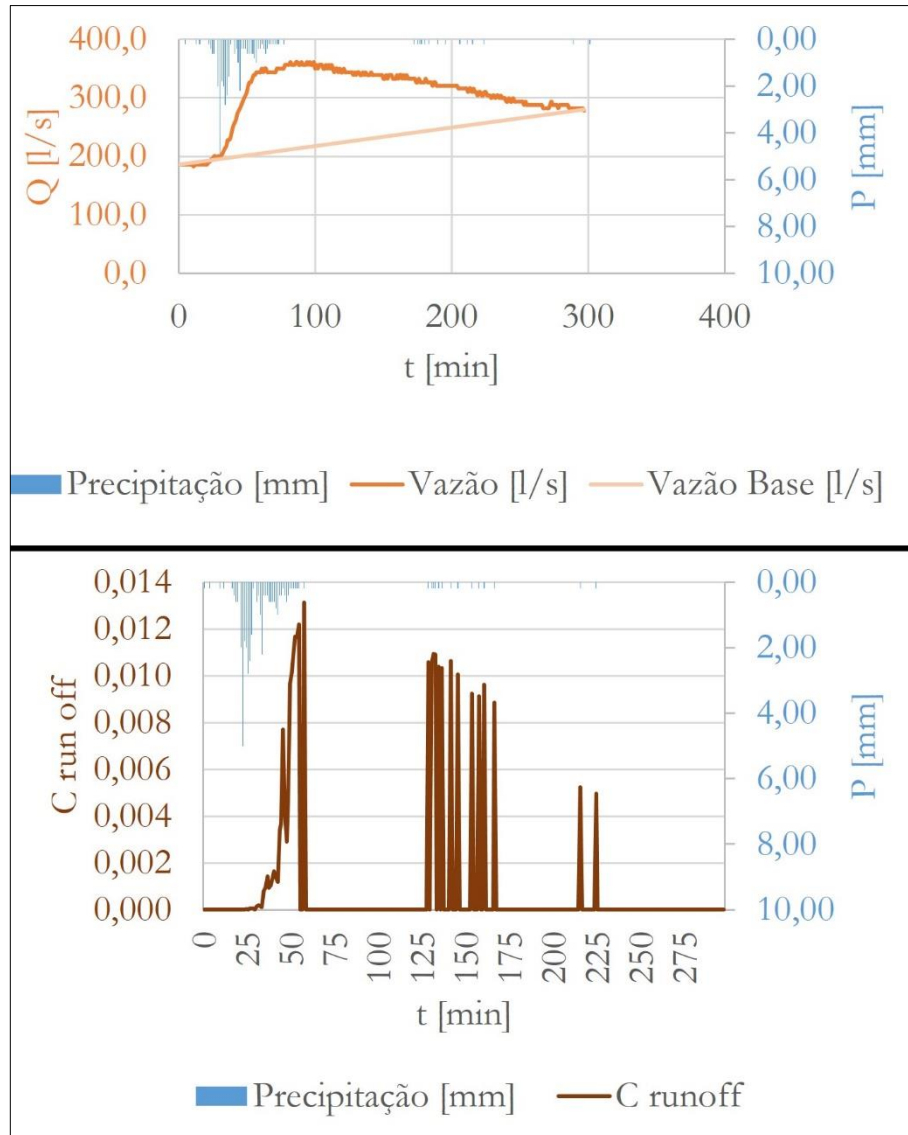
Fonte: Do autor.

Figura 20 – Hidrograma e Comportamento de C do Evento 2.



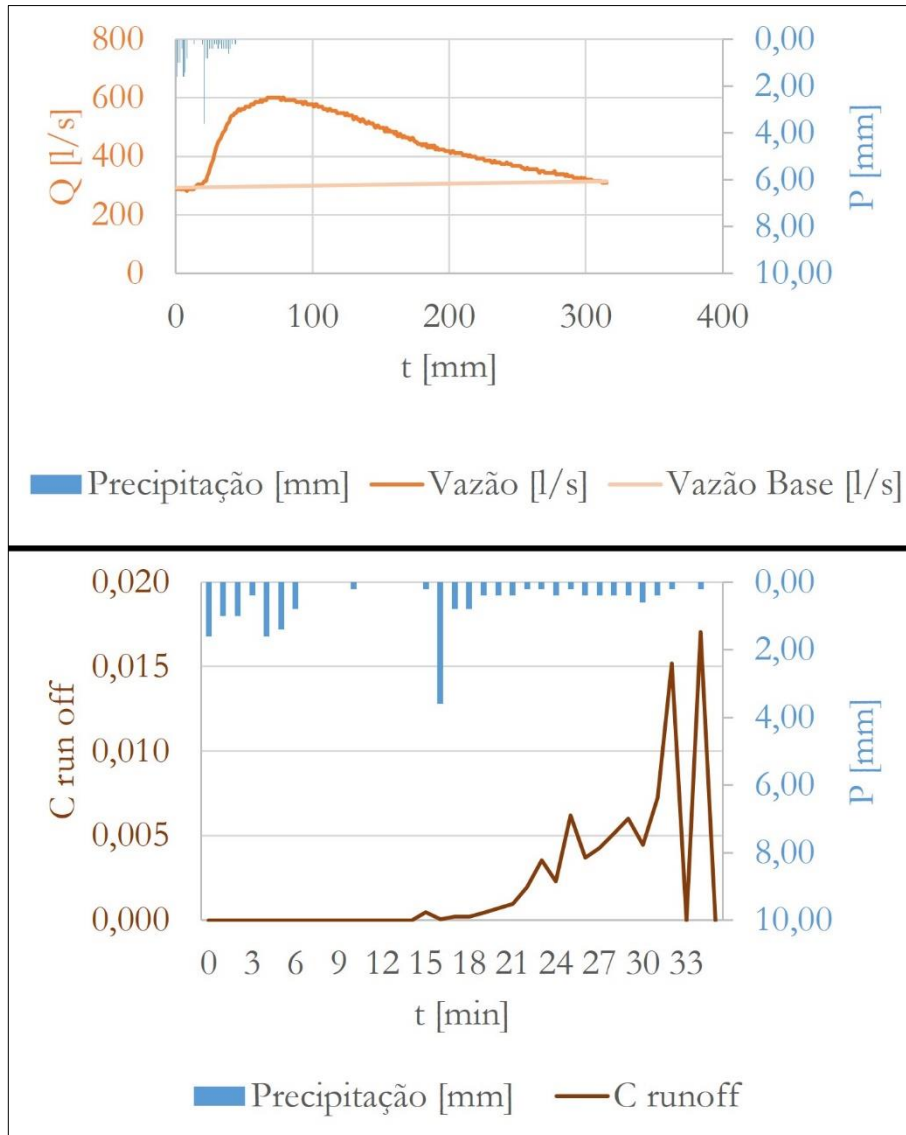
Fonte: Do autor.

Figura 21 – Hidrograma e Comportamento de C do Evento 3.



Fonte: Do autor.

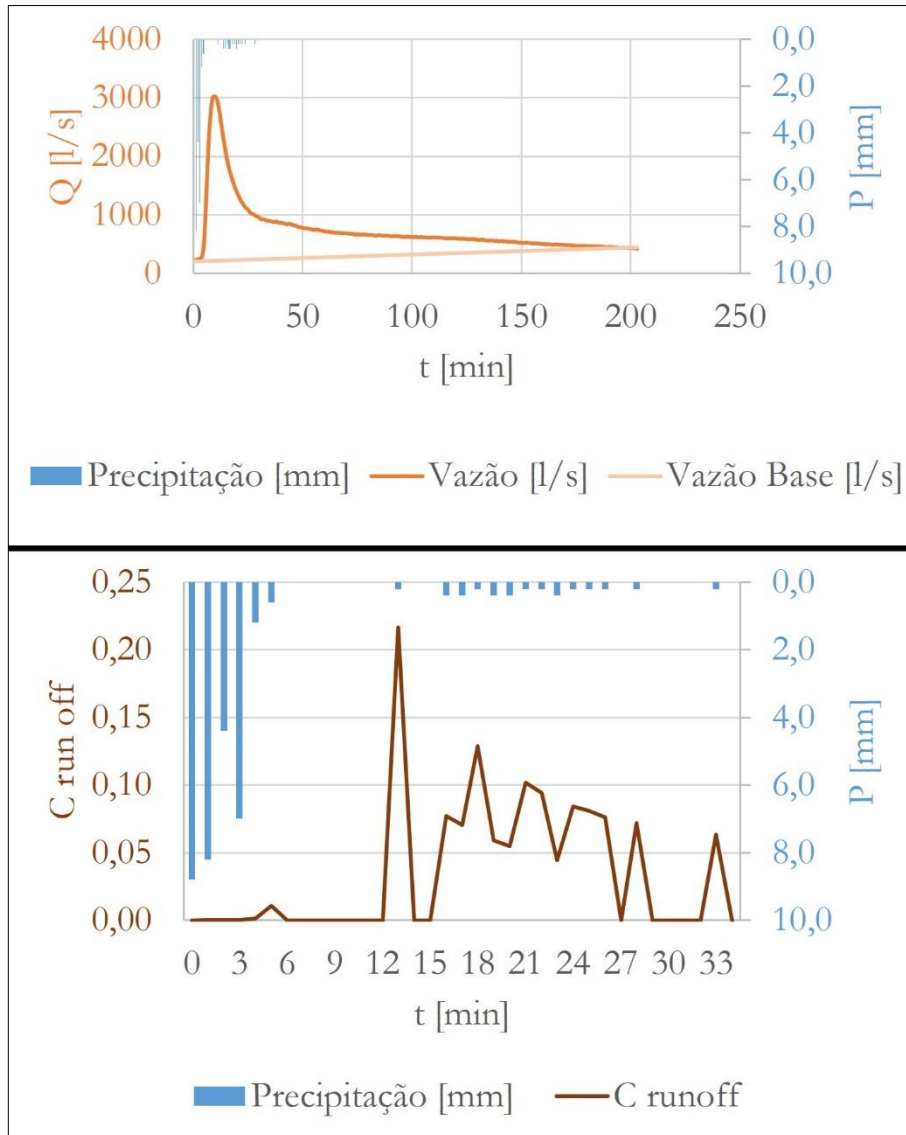
Figura 22 – Hidrograma e Comportamento de C do Evento 4.



Fonte: Do autor.

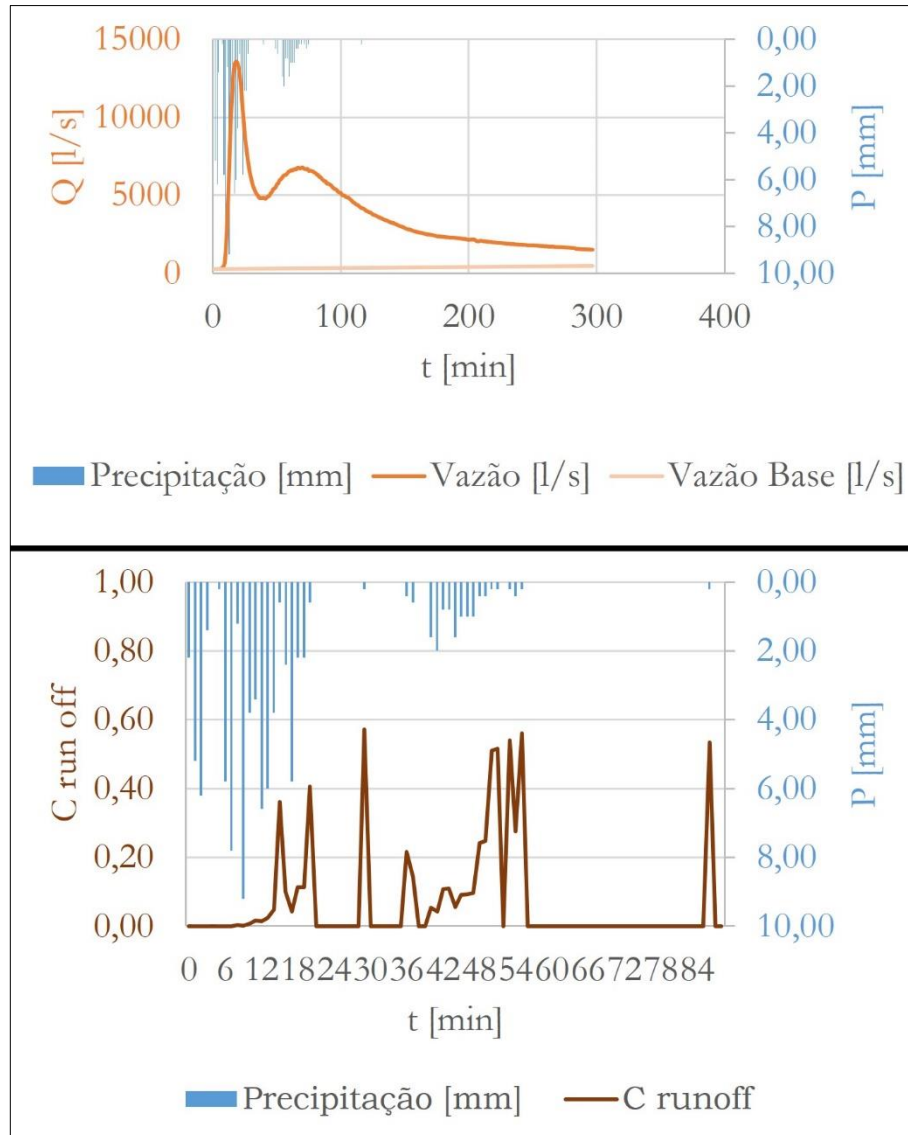


Figura 23 – Hidrograma e Comportamento de C do Evento 5.



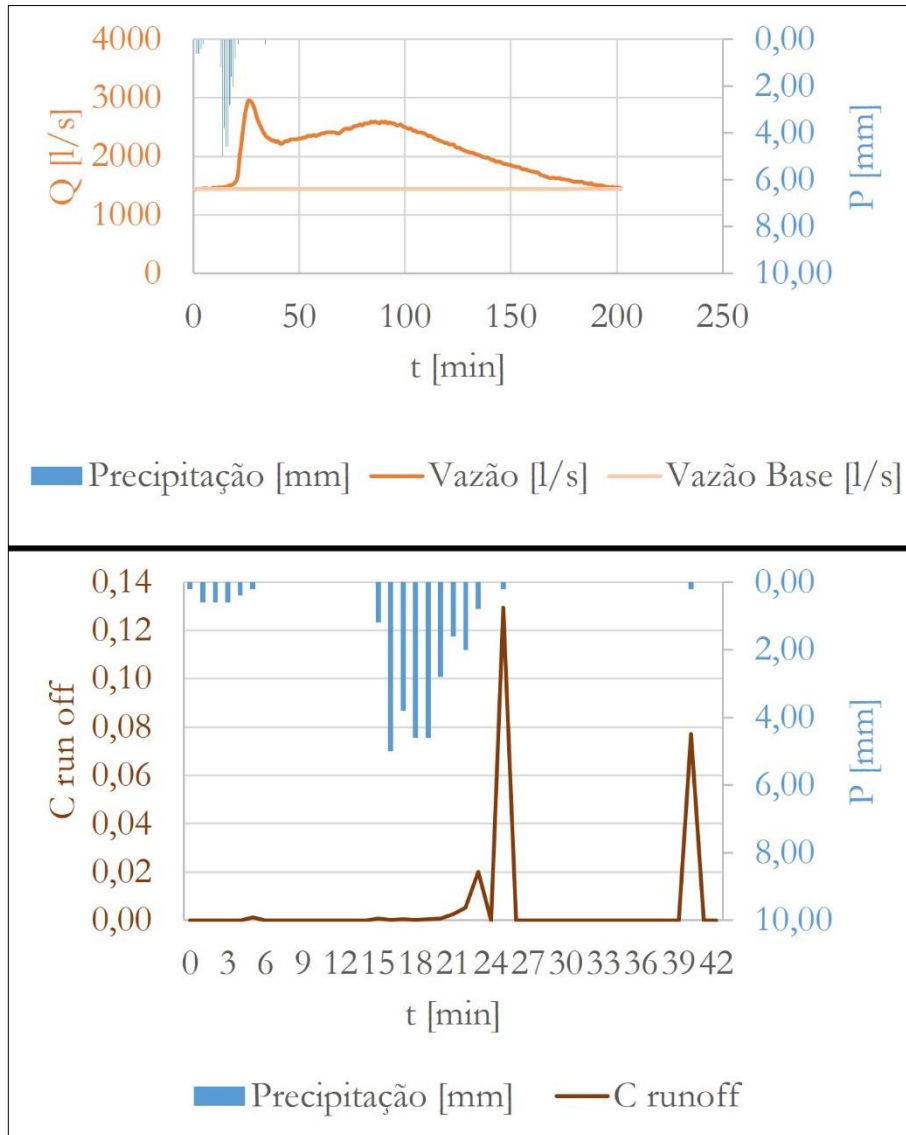
Fonte: Do autor.

Figura 24 – Hidrograma e Comportamento de C do Evento 6.



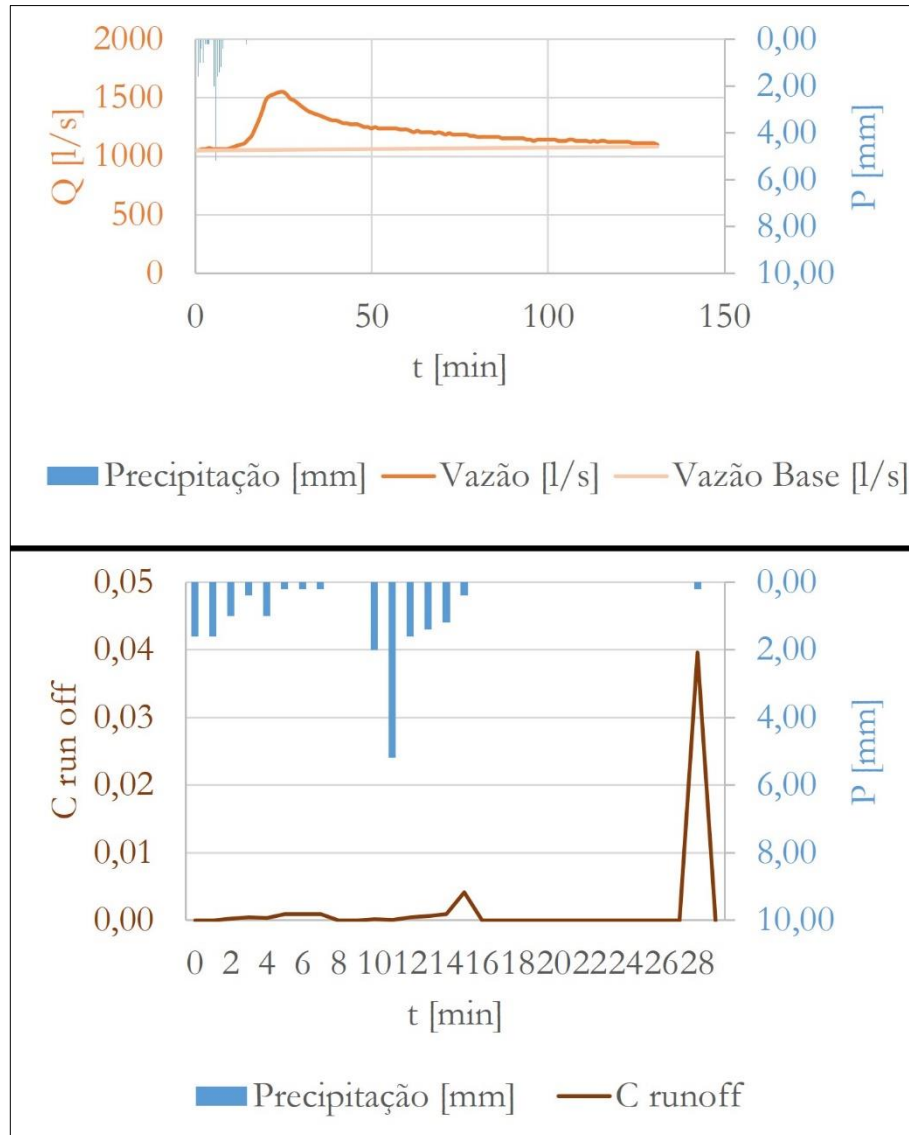
Fonte: Do autor.

Figura 25 – Hidrograma e Comportamento de C do Evento 7.



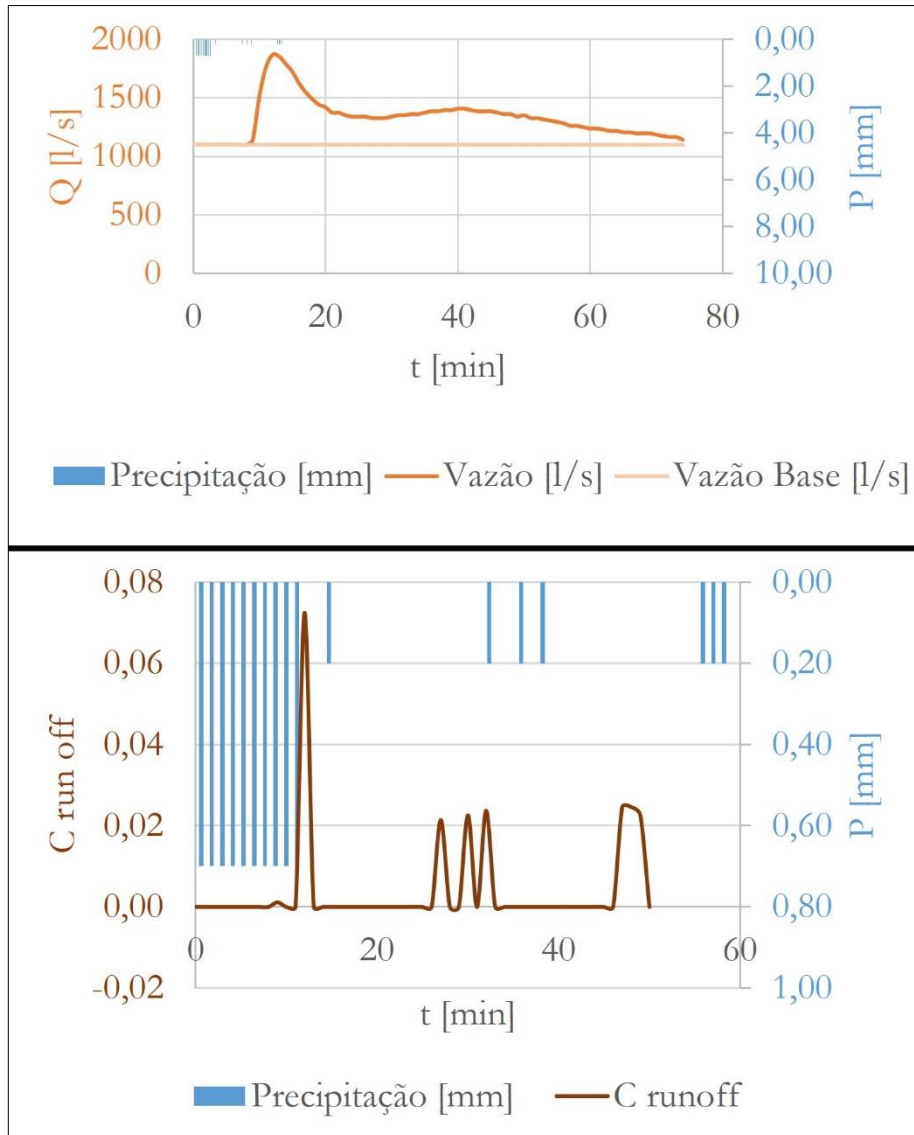
Fonte: Do autor.

Figura 26 – Hidrograma e Comportamento de C do Evento 8.



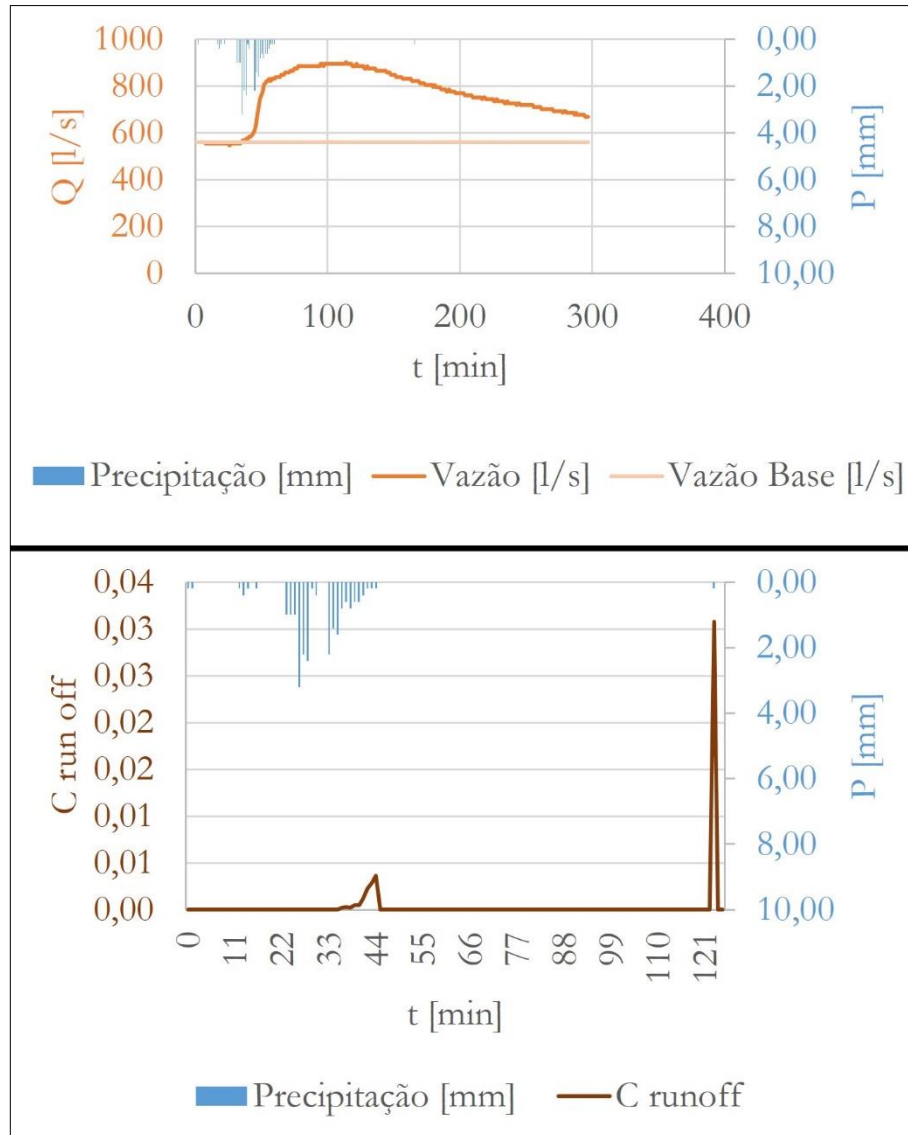
Fonte: Do autor.

Figura 27 – Hidrograma e Comportamento de C do Evento 9.



Fonte: Do autor.

Figura 28 – Hidrograma e Comportamento de C do Evento 10.



Fonte: Do autor.

Uma análise das Figuras 19 a 28 indica que a precipitação tem influência no valor de  $C$ . Conforme a precipitação acontece, o valor do coeficiente de escoamento aumenta, e logo que a precipitação diminui ou cessa o valor de  $C$  também atenua-se ou se anula. Esse comportamento acontece de maneira geral nas Figura 19 a Figura 28, mas pode observado com maior facilidade nas Figura 19, Figura 20, Figura 21 e Figura 23.

A Tabela 10 resume os dados dos eventos erosivos, trazendo informações das precipitações acumuladas anteriormente, a precipitação total, a intensidade de precipitação, além do valor do coeficiente máximo de escoamento superficial.

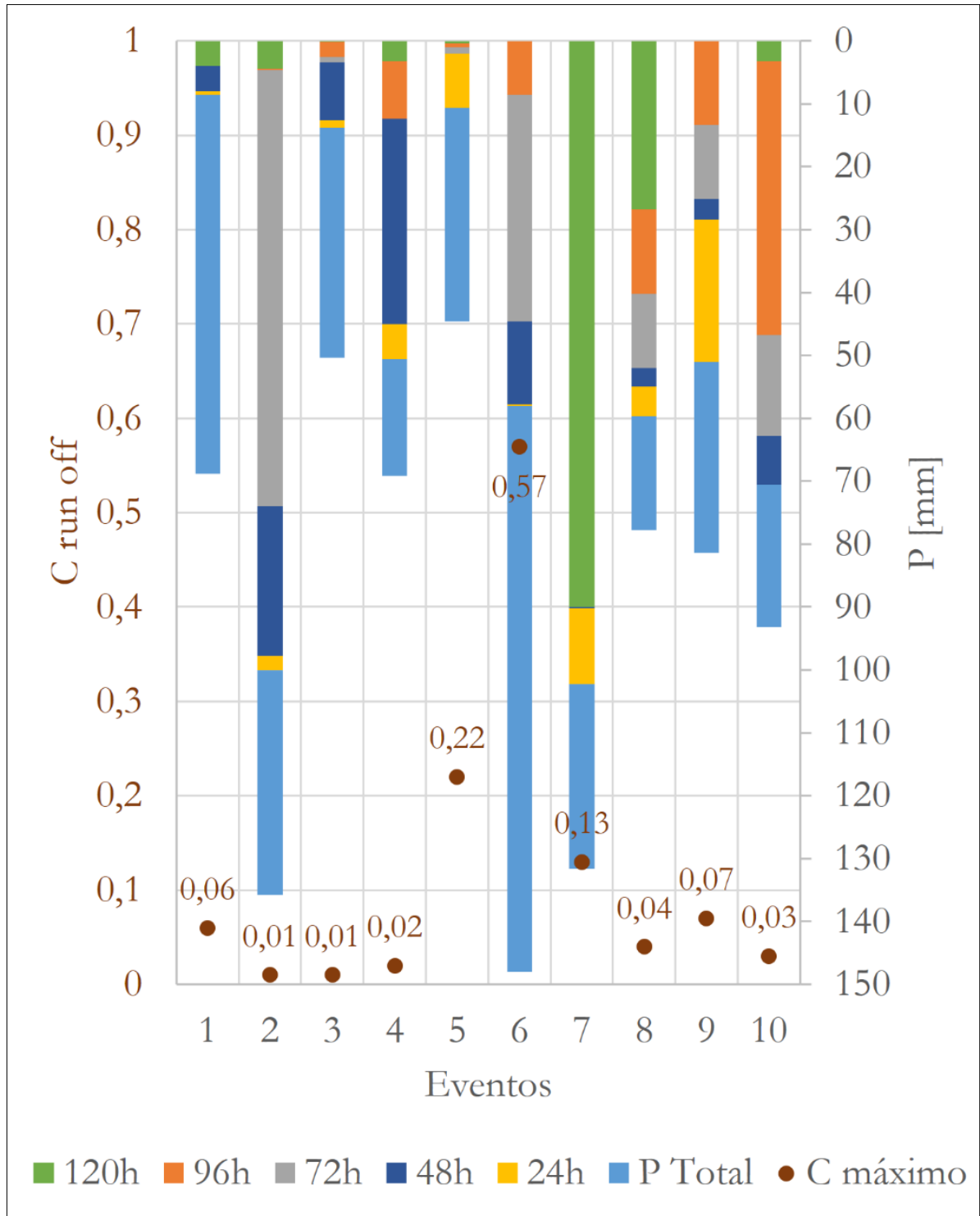
Tabela 10 – Resumo dos dados dos Eventos Erosivos.

	Precipitação Anterior [mm]					P Total [mm]	I [mm/h]	$C_{\text{máx}}$
	120h	96h	72h	48h	24h			
<b>Evento 1</b>	8,6	4,6	4,6	4,6	0,6	60,2	6,1	0,06
<b>Evento 2</b>	100	95,6	95,4	26	2,2	35,8	7,7	0,01
<b>Evento 3</b>	13,8	13,6	11,2	10,4	1,2	36,6	1,5	0,01
<b>Evento 4</b>	50,6	47,4	38,2	38,2	5,6	18,6	0,7	0,02
<b>Evento 5</b>	10,6	10,2	9,6	8,6	8,6	34,0	2,0	0,22
<b>Evento 6</b>	58,0	58,0	49,4	13,4	0,2	90,0	1,0	0,57
<b>Evento 7</b>	102,2	12,2	12,2	12,2	12,0	29,4	1,7	0,13
<b>Evento 8</b>	59,6	32,8	19,4	7,6	4,6	18,2	1,7	0,04
<b>Evento 9</b>	51,0	51,0	37,6	25,8	22,6	30,4	4,9	0,07
<b>Evento 10</b>	70,6	67,4	23,8	7,8	0	22,6	0,7	0,03

Fonte: Do autor.

Ao dispor os dados da Tabela 10 em forma gráfica, fica evidente que a precipitação anterior a um evento e a precipitação total (P Total) deste evento são muito influentes no valor de  $C$ , e quanto mais recente a precipitação anterior, mais o valor de  $C$  é aumentado.

Figura 29 – Precipitação Total e anterior relacionado ao coeficiente de escoamento superficial.



Fonte: Do autor.

De acordo com as Figuras 19 a 29, uma combinação dos fatores de precipitação anterior e precipitação total é responsável pelo aumento no valor de  $C$ , e como mostrado na Tabela 10, a intensidade ( $I$ ) do evento não diz muito respeito a



ascensão desse fator. Isso é indicado observando-se na Figura 29, por exemplo, chuvas com precipitação total semelhantes, como as dos eventos 2 e 9, que apresentam uma diferença significativa no valor máximo atingido por *C*, podendo ser explicada pela quantidade precipitada 24h antes. O evento 2, possui a segunda maior precipitação acumulada nas 120h que o antecede, porém a maior contribuição para este ocorrido se dá a partir de 72h antes do evento e apenas 2,2 mm foram precipitados nas 24h anteriores. Já o evento 9 não possui um precipitado acumulado nas 120h anteriores tão elevado em comparação ao evento 2, mas possui uma precipitação nas últimas 24h antes do evento cerca de 10 vezes maior, 22,6 mm. Ainda que a precipitação total e intensidade sejam menores no evento 9, o valor máximo atingido por *C* foi 7 vezes maior do que no evento 2, evidenciando a importância da precipitação acumulada, principalmente a mais recente, no valor de *C*.

A segunda maior precipitação total, no evento 1, apresentou um valor máximo de *C* baixo quando comparado aos valores encontrados desse fator nos outros eventos. Esse dado pode ser explicado pela baixíssima precipitação anterior nas últimas 120h, de apenas 8,6 mm, dos quais 8 mm foram precipitados mais de 96 h antes do evento e somente 0,6 mm nas últimas 24h.

Ao analisar o Evento 6, de acordo com a Tabela 10, a intensidade foi a segunda mais baixa entre os eventos, mas como a precipitação total foi a mais elevada e o acumulado anterior alto, o valor de *C* foi o maior encontrado. Isso indica que a intensidade tem pouca ou nenhuma relação com o valor de *C*.

O Evento 7, mesmo apresentando um baixo valor de precipitação total, por ter um acumulado anterior alto decorrente da precipitação do Evento 6, que aconteceu 120 h antes, acabou apresentando um elevado valor de *C* quando comparado aos demais.

Vale ressaltar que a comparação entre os valores de *C* encontrados cria termos como “*C* baixo”, “elevado valor de *C*”, e outros, mas estes devem ser entendidos como a comparação entre os valores apenas aqui analisados, devido a condição específica da bacia hidrográfica, pois se tratando de uma bacia hidrográfica rural com grande percentual de cobertura vegetal, os valores de *C* são baixos quando comparados a outros locais com características diferentes, tais como bacias hidrográficas com alto percentual de urbanização, que possuem grande área impermeável, como apresentado por Tucci (1993) e por Reis (2015).

### 5.5 Escoamento superficial pelo Método do Curva-Número

Na Tabela 11 estão apresentados os dados de precipitação acumulada nas últimas 120 horas, a precipitação total do evento erosivo, a condição de umidade antecedente e a lâmina de escoamento superficial estimada pelo Método do Curva-Número.

Tabela 11 – Resumo dos dados do Método da Curva-Número para os eventos classificados como erosivos.

	<b>P 120h anteriores [mm]</b>	<b>P Total [mm]</b>	<b>Condição de Umidade Anterior</b>	<b>Escoamento Superficial [mm]</b>
<b>Evento 1</b>	8,6	60,2	AMC I	0
<b>Evento 2</b>	100	35,8	AMC III	0,03
<b>Evento 3</b>	13,8	36,6	AMC I	0
<b>Evento 4</b>	50,6	18,6	AMC II	0
<b>Evento 5</b>	10,6	34,0	AMC I	0
<b>Evento 6</b>	58	90,0	AMC III	14,2
<b>Evento 7</b>	102,2	29,4	AMC III	0
<b>Evento 8</b>	59,6	18,2	AMC III	0
<b>Evento 9</b>	51	30,4	AMC II	0
<b>Evento 10</b>	70,6	22,6	AMC III	0

Fonte: Do autor.

Para as condições de umidade anterior AMC I, AMC II e AMC III, os valores de *CN* e da infiltração potencial (*S*) foram, respectivamente, 22,23 e 888,6 mm, 44,60 e 315,5 mm, 60,18 e 168,1 mm.

Isso confirma a alta capacidade do solo da região na absorção da precipitação, em favor do aumento da infiltração, e explica os baixos valores do coeficiente de escoamento superficial (*runoff*) encontrados. Mais uma vez, a caracterização morfológica e características da BHCC é responsável por tais resultados: bacia hidrográfica rural, com uma grande área de latossolo vermelho amarelo, que possui elevada permeabilidade como indicado por Benda et al (2012), e com grande percentual de cobertura vegetal, além de um relevo em que sua maior parte varia entre suavemente ondulado a ondulado.

Com a aplicação do Método do Curva-Número também foi possível evidenciar a baixíssima correlação (nula) entre a intensidade da chuva e o escoamento superficial na região estudada. Afinal, mesmo para um evento com alta intensidade de precipitação a umidade no solo mostrou-se muito mais importante para geração de escoamento superficial, devido as suas características morfológicas. Além disso, excetuando-se os dois eventos de maior magnitude e que apresentavam condição

anterior de umidade no solo elevada, os eventos o método do curva-número retornou um valor nulo para o escoamento superficial, devido aos altos valores de infiltração potencial advindos das características da bacia. Esses valores são muito diferentes dos observados nos hidrogramas, de acordo com Cunha et al (2015), que analisou o método do curva-número em bacias com características distintas ao que o método propõe, este não apresenta bom desempenho em tais locais por conta de sua formulação e parametrização e as vantagens decorrentes de sua aplicação se contrapõem a erros que podem acarretar até mesmo a maiores custos às obras hidráulicas.

### 5.6 Comparação de resultados do ES por diferentes métodos

Na Tabela 12 estão apresentados os resultados encontrados para o Escoamento Superficial para as diferentes metodologias:

Tabela 12 – Comparação dos resultados para Escoamento Superficial entre diferentes metodologias.

	<b>ES<sub>hidrograma</sub> [mm]</b>	<b>ES<sub>racional</sub> [mm]</b>	<b>ES<sub>curva-número</sub> [mm]</b>
<b>Evento 1</b>	0,33	0,21	0,00
<b>Evento 2</b>	0,09	0,01	0,03
<b>Evento 3</b>	0,40	0,06	0,00
<b>Evento 4</b>	0,84	0,02	0,00
<b>Evento 5</b>	1,61	0,32	0,00
<b>Evento 6</b>	25,04	3,81	14,17
<b>Evento 7</b>	2,36	0,08	0,00
<b>Evento 8</b>	0,34	0,01	0,00
<b>Evento 9</b>	0,32	0,04	0,00
<b>Evento 10</b>	1,23	0,01	0,00

Fonte: Do autor.

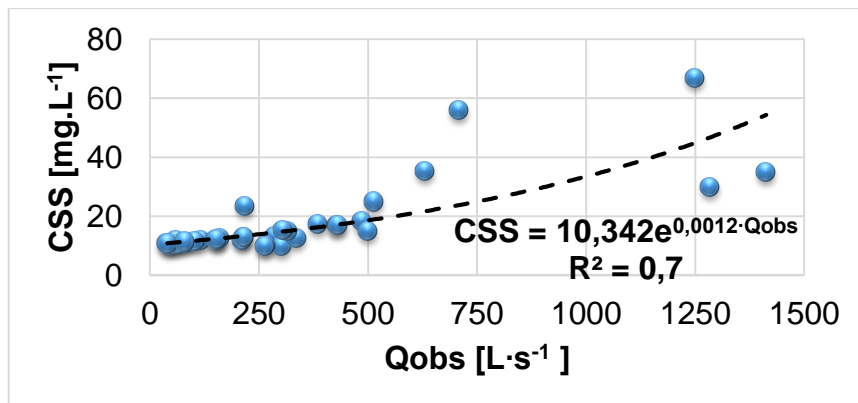
Pode-se observar as diferenças nas lâminas escoadas de acordo com cada método utilizado, relacionadas às condições de contorno e, ou, aos parâmetros de cada um. Como o Método Racional e o Curva-Número consideram que a precipitação ocorre em toda a área da bacia hidrográfica, ambos tendem a gerar uma lâmina de escoamento superficial menor, especialmente no caso do Curva-Número, por considerar as características de umidade do solo em áreas com grande capacidade de infiltração potencial, como no caso de bacias hidrográficas rurais, essa condição do método provoca o resultado nulo. No caso do hidrograma, a análise é feita com base no volume escoado diretamente na seção de controle, gerando valores mais próximos da realidade estudada neste trabalho. Além disso,

calculou-se um valor de C para cada intervalo de registro, como pode ser observado nas Figura 19 a Figura 28, e usou-se a lâmina provocada por esses valores para a totalização do escoamento superficial provocado pelo Método Racional. Já no Método do Curva-Número, os valores de CN e S são fixos.

### 5.7 Curva de descarga de sedimentos

Na Figura 30 está apresentada a Curva de Descarga de Sedimentos em Suspensão (Concentração de Sólidos Suspensos (*CSS*) por Vazão) elaborada a partir dos dados de *CSS* advindos das amostragens com o USDH-48, apresentadas no Apêndice B.

Figura 30 – Curva de descarga de sedimentos de Concentração de Sólidos Suspensos por Vazão.



Fonte: Do autor.

É importante conhecer não só a *CSS*, mas também a Massa de Sólidos Suspensos Transportados (*MSST*). Por essa razão comparou-se na Tabela 13, a *MSST* com a precipitação e o deflúvio mensal.

Tabela 13 – Interação Massa de Sólidos Suspensos Transportados, Precipitação e Deflúvio.

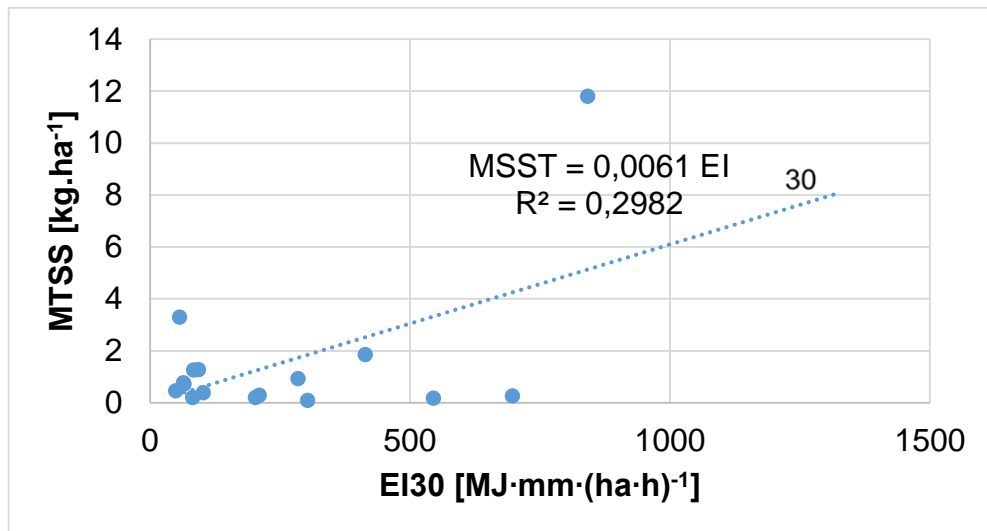
Data	MSST [t/mês]	Precipitação Total Mensal [mm]	Deflúvio Total Mensal [mm]
dez/17	11,7	143,2	62,0
jan/18	14,3	333,0	88,5
fev/18	4,2	187,6	44,5
mar/18	- -	325,6	131,5
abr/18	11,5	46,0	45,4
mai/18	6,0	28,8	26,7
jun/18	4,3	8,2	20,1
jul/18	3,7	10,6	17,3
ago/18	2,4	80,3	18,5
set/18	1,8	62,3	15,2

Fonte: Do autor.

O valor de *MSST* encontrado em março foi milhares de vezes mais elevado que os valores apresentados na Tabela 13, extrapolando em muito a curva de descarga de sedimentos. Isso pode ser explicado pela não observação em campo do evento de maior cheia do período, no dia 10 de março. Essa não observação gera demasiada extrapolação nas condições de contorno da curva de descarga de sedimentos, fazendo com que o dado calculado seja inconsistente.

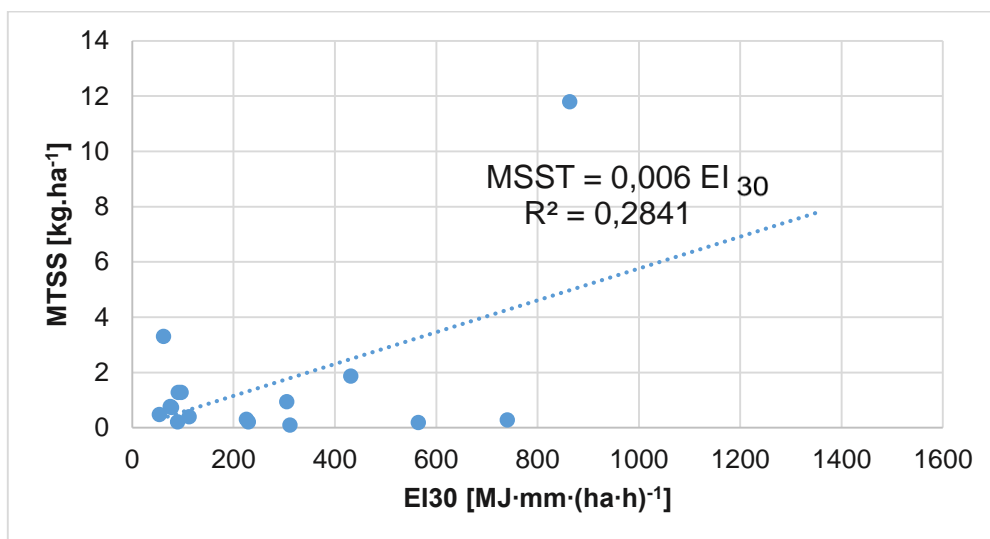
Na Figura 31 e 32 estão apresentadas à disposição dos dados de *MSST* em função da erosividade, pela metodologia de Wisheier e Smith (1958) e por Wagner e Massambani (1988), respectivamente.

Figura 31 – *MSST* em função do  $EI_{30}$  calculado pela metodologia de Wisheier e Smith (1958).



Fonte: Do autor.

Figura 32 – *MSST* em função do  $EI_{30}$  calculado pela metodologia de Wagner e Massambani (1988).



Fonte: Do autor.

Tanto na Figura 31 quanto na Figura 32 observa-se um baixo valor para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), ainda assim, os valores apresentados pelos coeficientes angulares do ajuste linear, que representa o fator de erodibilidade do solo (K), 0,0061 e 0,006 respectivamente, não encontram-se tão longe do esperado.

Como o solo na região de estudo possui um elevado percentual de latossolo vermelho-amarelo é esperado que a erodibilidade encontre-se próxima ao valor deste tipo de solo, que de acordo com Eduardo, 2012, é  $0,01 \text{ Mg}\cdot\text{ha}\cdot\text{h}\cdot(\text{ha}\cdot\text{MJ}\cdot\text{mm})^{-1}$ , valor observado em latossolo vermelho-amarelo para uma bacia hidrográfica com características semelhantes. Em tempo, os valores apresentados nas Figura 31 e Figura 32 podem ser explicados pelas características da bacia hidrográfica, devido ao relevo ser ondulado e suave ondulado em sua maior parte, e também por possuir boa cobertura vegetal, seja por reflorestamento, mata ripária ou culturas, a taxa de transferência de sedimentos advindos da perda de solo provavelmente é muito baixa, dessa forma mantendo a maior parte dos sedimentos gerados dentro da própria bacia. Mais estudos nesse sentido são necessários para evidenciar se essa inferência está correta. Mas vale a pena ressaltar que para a bacia vizinha, a BHCG, Ferreira (2019) estimou taxas de transferência de sedimentos da ordem de 11,4%, tendo por base dados de perda de solo por erosão hídrica junto à parcelas experimentais de perda de solo e água. O autor estimou também taxas de transferência de sedimentos da ordem de 0,5% quando utilizados os dados de perda de solo média anual simulados pela Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE – Revised Universal Soil Loss Equation). Passos (2019) também chegou a mesma conclusão, que a BHCG possui uma baixa taxa de transporte de sedimentos avaliada em relação a concentração de sedimentos suspensos amostrada na seção de controle do Córrego do Gigante, com valores de 0,69% e 8,65%, e também a turbidez medida na seção, com valores de 16,97% e 1,35%, de acordo com as considerações feitas em seu trabalho.

## 6 CONCLUSÕES

A presente pesquisa realizou a caracterização hidrológica com ênfase no comportamento do coeficiente de escoamento superficial ( $C$ ) de uma bacia hidrográfica com características rurais, a Bacia Hidrográfica do Córrego do Chapadão (BHCC). Realizou-se ainda a aplicação do método do curva-número para verificação dos valores de escoamento superficial e comparação destes com hidrogramas de eventos erosivos construídos a partir de observações em campo e definidos como erosivos por metodologia Wischmeier e Smith (1958) e Wagner e Massambani (1988). Estimou-se a massa de sólidos suspensos transportada mensalmente de acordo com as vazões e verificou-se ainda uma possível correlação entre essa massa e a erodibilidade do solo a partir da Equação Universal da Perda de Solo.

A caracterização da área de estudo indica que a BHCC é uma bacia de grande porte com baixa tendência a enchentes, o que foi corroborado pelos valores de coeficiente *runoff* encontrados até mesmo para as situações de eventos de grande magnitude, como no caso do Evento 6 (10 de março de 2018), e confirmado pelo alto grau de infiltração potencial da região devido a suas características morfológicas.

A erosividade das chuvas, expressas pelo  $EI_{30}$ , estimadas pela metodologia de Wischmeier e Smith (1958) e Wagner e Massambani (1988) foram respectivamente 6528,4 e 6883,5  $MJ \cdot mm \cdot (ha \cdot h)^{-1}$ , valores que estão de acordo com o estimado por Melo Neto et al (2017), para a BHCG.

Apresentou-se o comportamento do coeficiente *runoff* nos eventos erosivos classificados, mostrando-se dependente diretamente da precipitação, aumentando quando esta se eleva, e atenuando-se quando ela diminui. Os valores do coeficiente encontrados mostraram-se muito dependentes da condição de umidade anterior, principalmente as advindas de precipitações mais próximas ao evento analisado.

A aplicação do Método Curva-Número confirma a alta capacidade do solo da região em favorecer a infiltração de água, apresentando infiltração potencial bastante elevada, evidenciando que para as condições da bacia hidrográfica estudada a intensidade da chuva não apresenta relação com o escoamento superficial.

A comparação dos resultados encontrados de Escoamento Superficial indica que o Hidrograma é o método mais recomendado para a estimativa do Escoamento Superficial na BHCC.

A curva de descarga de sedimentos suspensos tornou possível a estimativa da massa de sólidos suspensos transportada mensalmente de acordo com as vazões, apresentando valores bem próximos dos encontrados para a BHCG por Melo Neto et al (2017). Ao associar os valores de *MSST* encontrados para os eventos erosivos com os respectivos valores de erosividade ( $EI_{30}$ ) destes observou-se que pode-se avaliar alguma correlação entre os dados, independente do coeficiente de determinação retornado, uma vez que o fator de erodibilidade do solo encontrado não ficou tão distante do valor observado por Eduardo (2012) para uma bacia com características semelhantes. Todavia, mais estudos são necessários nesse sentido para melhorar tal estimativa.



## 7 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES

O leito da seção de controle deve ser aferido em todas as campanhas por possuir muitos sedimentos soltos, o que dificulta a correlação entre vazão e nível da régua.

Limpar a régua centimétrica pode ser uma boa maneira de evidenciar o nível máximo atingido pela água no intervalo entre um campo e outro, uma vez que folhas e galhos arrastados pela correnteza ficam presas ao suporte. Essa informação pode corroborar os dados coletados pelo sensor e eliminar dúvidas do bom funcionamento deste, principalmente em casos de grandes volumes de escoamento.

Pode ser interessante o desenvolvimento de um trabalho sobre a erodibilidade do solo com base nas perdas de solo observadas na bacia e sua relação com a erosividade da chuva.

As informações iniciais contidas neste trabalho são importantes para começar a entender a dinâmica hidrológica da região e para o início da geração de um banco de dados para possibilitar trabalhos futuros baseados em séries históricas mais longas, como aqueles relativos ao estudo de vazões de permanência, vazão mínima de 7 dias e 10 anos de período de retorno ( $Q_{7,10}$ ) etc.

## REFERÊNCIAS

- ARCOVA, F. C. S.; CICCIO, V. D.; ROCHA, P. A. B. Precipitação efetiva e interceptação das chuvas por floresta de mata atlântica em uma microbacia experimental em Cunha-SP. **Árvore**, Viçosa-MG, v. 27, p. 257-262, 2003.
- BENDA, F.; ALVES, M. D. G.; OLIVEIRA, C. H. R. Favorabilidade de áreas para implantação de aterros controlados no município de Campos dos Goytacazes/RJ utilizando sistemas de informação geográfica. **Revista Brasileira de Cartografia**, Campo dos Goytacazes-RJ, v. 64, n. 1, p. 33-44, Fevereiro 2012.
- BROOKS, K. N.; FFOLIOTT, P. F.; MANER, J. A. **Hydrology and the management of watersheds**. Ames: Wiley-Blackwell, v. I, 2003.
- CABRAL, J. B. P. Estudo do processo de assoreamento em reservatórios. **Caminhos da Geografia**, Jataí, v. 6, p. 62-69, fev. 2005.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciências, 2008.
- CARVALHO, N. O. et al. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. Brasília: ANEEL, v. 1, 2000a.
- CARVALHO, N. O. et al. **Guia de práticas sedimentométricas**. Brasília: ANEEL, v.1, 2000b.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1981.
- COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: ABRH, 2013.
- COUTO JÚNIOR, A. A. **Erosão hídrica e transporte de sedimentos na Bacia Do Ribeirão Cachoeirinha, Rio Claro (SP)**. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Rio Claro, 2016.
- CUNHA, S. F.; SILVA, F. E. O.; MOTA, T. U.; PINHEIRO, M. C. Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 20, n.4, p. 837-848, Porto Alegre, out./dez. 2015.
- DHAKAL, N. **Development of guidance for runoff coefficient selection and Modified Rational, Unit Hydrograph Method for hydrologic design**. Thesis (Doctorate in Philosophy). Faculty of Auburn University. Auburn, Alabama. 2012.
- EDUARDO, E. N. **Determinação da erodibilidade e do fator cobertura e manejo do solo sob condições de chuva natural e simulada**. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo). UFRRJ - Instituto de Agronomia. Seropédica, RJ, 2012.

EMÍLIO, L. **Apostila de fluviometria do centro técnico em hidrologia**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA - EMBRAPA. **Súmula da X reunião técnica de levantamento de solos**. Serviço nacional de levantamento e conservação de solos. Rio de Janeiro, 1979.

FERREIRA, A. M. **Modelagem da erosão hídrica dos solos: aplicação do modelo WEPP na Bacia do Gigante – Poços de Caldas - MG**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Alfenas. Poços de Caldas, 2019.

JCTM COMÉRCIO E TECNOLOGIA. Amostrador de sedimento em suspensão DH-48. **Site da JCTM Comércio e Tecnologia**, 2015. Disponível em: <<https://bit.ly/2UhLic0>>. Acesso em: 04 jan. 2019.

LIMA, J. C. D. S. **Caracterização da fauna de macroinvertebrados bentônicos da represa Águas Claras, Caldas, Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Alfenas. Poços de Caldas, 2014.

MELLO, C. R. D.; SILVA, A. M. D. **Hidrologia: Princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Lavras: UFLA, 2013.

MELO NETO, J. O.; SILVA, A. M.; FERREIRA, A. M.; MENEZES, P. H. B. J.; GUIMARAES, D. V. Vulnerabilidade dos solos à erosão em bacia hidrográfica minerada no sul de Minas Gerais. In: Congresso Internacional de Hidrossedimentologia, 2, 2017, Foz do Iguaçu. **Anais do II Congresso Internacional de Hidrossedimentologia**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2017. v. 1.

MORAES, M. F. D. **Estimativa do balanço hídrico na bacia experimental/representativa de Santa Maria/Cambiocó-município de São José de Ubá**. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro-RJ, 2007.

MOREIRA, F. H. D. S. **Interações entre escoamento superficial, hidrossedimentos e radionuclídeos (<sup>210</sup>Pb, <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Ra, Th e U) no Alto Ribeirão das Antas, Poços De Caldas-MG**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Alfenas, UNIFAL. Poços de Caldas, 2017.

MOTA, A. D. A. et al. Instalação de uma pequena bacia experimental florestal: estudo de caso da bacia do Rio Araponga. **Eng Sanitária Ambiental**, v. 22, p. 73-80, jan. 2016.

PALMIER, L. R. A necessidade das bacias experimentais para a avaliação da eficiência de técnicas alternativas de captação de água na região semi-árida do Brasil. In: Simpósio Brasileiro de captação de água de chuva no semi-árido, 3, 2002. Campina Grande-PB. **Anais do III Simpósio Brasileiro de captação de água de chuva no semi-árido**, Campina Grande-PB, 2002.

PASSOS, C. A. D. **Interação entre o regime de escoamento superficial e hidrossedimentológico do Córrego do Gigante – Poços de Caldas – MG.**

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Alfenas. Poços de Caldas, 2019.

PONCE, V. M. **Engineering hydrology: Principles and practices.** New Jersey: Prentice Hall, 1989.

PORTO, R. L. L.; FILHO, K. Z.; MARCELLINI, S. S. **Hidrologia aplicada.**

Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da USP. São Carlos, 1999.

PRUSKI, F. F. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica.** 2<sup>a</sup>. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, UFV, 2006.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. D. S.; SILVA, D. D. **Escoamento superficial.** 2<sup>a</sup>. ed. Viçosa: UFV, 2004.

PRUSKI, F. F.; GRIEBELER, N. P.; SILVA, D. D. Comparação entre dois métodos para determinação do volume de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 25, n. 2, p. 403-410, 2001.

PURCINO, M. D. **Estimativa da erosão hídrica nos solos da Bacia do Córrego do Gigante, Poços de Caldas-MG, a partir da equação universal da perda de solo.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Alfenas. Poços de Caldas-MG, 2017.

REIS, E. A. D. **Avaliação da viabilidade econômica do pagamento pelos serviços ambientais (PSA) na bacia do ribeirão do cipó, manancial estratégico de Poços de Caldas-MG.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Alfenas. Poços de Caldas, 2014.

REIS, S. S. D. **Influência da densidade e da altura de edificações na transformação de precipitação-escoamento utilizando chuva simulada em modelo reduzido de bacia hidrográfica urbana com diferentes declividades.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Alfenas. Poços de Caldas, 2015.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e recursos hídricos.** São Carlos: EESC/USP, 1998.

SAGARA, F. T. **Estudo hidrológico de uma pequena bacia hidrográfica experimental no município de General Carneiro-PR, através de monitoramento e modelagem.** Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2001.

SANTOS, I. E. A. **Hidrometria Aplicada.** [S.l.]: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LATEC, 2001.

SILVA, M. L. N. et al. Índices de erosividade das chuvas da região de Goiânia, GO. **Pesq. agropecuária brasileira**, Brasília, v. 32, n. 10, p. 977-985, out. 1997.

Souza, E. R.; Fernandes, M. R. Sub-bacias hidrográficas: Unidades básicas para o planejamento e a gestão sustentáveis das atividades rurais. **Informe Agropecuário**, v.21, p.15-20, 2000.

TAVARES, R. **Estudo da percepção ambiental sobre recursos hídricos na Universidade Federal De Alfenas – Campus Avançado de Poços de Caldas/MG**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Alfenas. Poços de Caldas, 2016.

TINÓS, T. M. **Mapeamento geológico-geotécnico a partir de metodologia de análise integrada: ensaio de aplicação no município de Poços de Caldas - MG**. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente). Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 2011.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia - Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Universidade – UFRGS, Universidade de São Paulo – USP, Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, 1993.

TUCCI, C. E. M. Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 5, n.1, p. 61-68, Jan-Mar 2000.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. [S.l.]: Editora da UFRGS, 2005.

VALLE JUNIOR, R. F. D. **Diagnóstico de áreas de risco de erosão e conflito de uso dos solos na bacia do rio Uberaba**. Tese (Doutorado em Produção Vegetal). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. Jaboticabal, 2008.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: McGraw Hill do Brasil LTDA, 1975.

WAGNER, C. S.; MASSAMBANI, O. Análise da relação intensidade de chuva energia de Wischmeier & Smith e sua aplicabilidade à região de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, p. 197-203, 1988.

WELLS, L. G. et al. Comparison of four infiltration models in characterizing infiltration through surface mine profiles. **Trans. Am. Soc. Agric. Eng.**, v. 29, n. 3, p. 785-793, 1986.

WISCHMEIER, W. H.; SMJTH, D. D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. **Transactions of the American Geophysical Union**, Washington, v. 39, n. 2, p. 285-291, 1958.

## APÊNDICES

### Apêndice A - Equipamentos utilizados

Foi desenvolvido um equipamento simples para aferição do nível d'água na seção de controle, apresentado na Figura 33. O equipamento consiste em duas hastes metálicas, uma encostada na outra. Enquanto uma toca o fundo do leito, a outra é puxada até o nível d'água. O quanto aquela que é levantada excede a que toca o fundo do leito indica o nível d'água.

Figura 33 – Aferição do nível d'água com equipamento desenvolvido pelo autor.



Fonte: Do autor.

A Figura 34 apresenta o micromolinetete da Vernier® que foi utilizado para medição da velocidade do fluxo de escoamento na seção de controle:

Figura 34 – Medidor de velocidade de escoamento de água tipo micromolinetete da Vernier®



Fonte: Do autor.

A Figura 35 mostra um USDH-48, equipamento utilizado para amostragem de sedimentos em suspensão na seção de controle:

Figura 35 – Amostrador USDH-48.



Fonte: Moreira, 2017.

Posteriormente à amostragem de sólidos suspensos, as amostras foram armazenadas em embalagens de vidro apropriadas e a quantificação dos hidrossedimentos, ou seja, a quantificação da concentração dos sólidos suspensos, realizadas nos laboratórios da UNIFAL. Utilizou-se para tal, filtros de 47mm no aparato de filtragem com uma bomba a vácuo e kitasato, ilustrado na Figura 36.

Figura 36 – Aparato de filtragem das amostras de hidrossedimento.



Fonte: Do autor.

## Apêndice B - Tabelas de dados

Os dados brutos registrados com intervalos de 5 minutos, as tabelas apresentadas neste apêndice, a base de dados usados em ambiente SIG para caracterização da área e tabelas com os dados tabulados e outras análises de resultados podem ser encontradas no link: <http://bit.ly/DadosTabelasResult>

A Tabela 14 apresenta as medidas de nível d'água e vazão observadas em campo utilizada para elaboração da curva-chave, e a Tabela 15 mostra os dados de concentração e vazão utilizados para construção da curva de descarga de sedimentos.

Tabela 14 – Medidas de nível d'água e vazão observadas em campo.

<b>Data</b>	<b><i>h</i> - Régua [m]</b>	<b><i>Q</i><sub>obs</sub> [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>]</b>	<b>Data</b>	<b><i>h</i> - Régua [m]</b>	<b><i>Q</i><sub>obs</sub> [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>]</b>
<b>19/10/2017</b>	0,22	0,021	<b>03/04/2018</b>	0,46	0,428
<b>09/11/2017</b>	0,24	0,082	<b>10/04/2018</b>	0,41	0,315
<b>11/12/2017</b>	0,33	0,117	<b>17/04/2018</b>	0,45	0,431
<b>13/12/2017</b>	0,34	0,218	<b>24/04/2018</b>	0,34	0,216
<b>19/12/2017</b>	0,36	0,211	<b>10/05/2018</b>	0,32	0,153
<b>04/01/2018</b>	0,50	0,708	<b>24/05/2018</b>	0,34	0,216
<b>09/01/2018</b>	0,70	1,250	<b>07/06/2018</b>	0,19	0,104
<b>16/01/2018</b>	0,33	0,486	<b>05/07/2018</b>	0,26	0,040
<b>23/01/2018</b>	0,26	0,287	<b>19/07/2018</b>	0,27	0,050
<b>30/01/2018</b>	0,33	0,630	<b>16/08/2018</b>	0,27	0,060
<b>06/02/2018</b>	0,17	0,301	<b>30/08/2018</b>	0,24	0,064
<b>15/02/2018</b>	0,23	0,266	<b>27/09/2018</b>	0,24	0,040
<b>21/02/2018</b>	0,32	0,336	<b>19/10/2018</b>	0,44	0,385
<b>27/02/2018</b>	0,38	0,500	<b>26/10/2018</b>	0,31	0,081
<b>06/03/2018</b>	0,31	0,264	<b>08/11/2018</b>	0,28	0,160
<b>13/03/2018</b>	1,00	1,413	<b>22/11/2018</b>	0,25	0,152
<b>20/03/2018</b>	0,95	1,284	<b>06/12/2018</b>	0,39	0,306
<b>27/03/2018</b>	0,51	0,514			

Fonte: Do autor.



Tabela 15 - Dados de Concentração e Vazão observados em campo.

<b>Data</b>	<b>Qobs [l·s-1 ]</b>	<b>Concentração [mg/l]</b>	<b>Data</b>	<b>Qobs [l·s-1 ]</b>	<b>Concentração [mg/l]</b>
<b>11/12/2017</b>	117	12,0	<b>10/04/2018</b>	315	15,0
<b>13/12/2017</b>	218	23,4	<b>17/04/2018</b>	431	17,0
<b>19/12/2017</b>	211	11,9	<b>24/04/2018</b>	216	13,0
<b>04/01/2018</b>	708	56,0	<b>10/05/2018</b>	153	12,0
<b>09/01/2018</b>	1250	67,0	<b>24/05/2018</b>	216	13,0
<b>16/01/2018</b>	486	18,5	<b>07/06/2018</b>	104	11,5
<b>23/01/2018</b>	287	13,3	<b>05/07/2018</b>	40	10,9
<b>30/01/2018</b>	630	35,4	<b>19/07/2018</b>	50	10,1
<b>06/02/2018</b>	301	9,8	<b>16/08/2018</b>	60	12,0
<b>15/02/2018</b>	266	10,2	<b>30/08/2018</b>	64	10,5
<b>21/02/2018</b>	336	12,8	<b>27/09/2018</b>	40	10,8
<b>27/02/2018</b>	500	15,0	<b>19/10/2018</b>	385	17,5
<b>06/03/2018</b>	264	10,0	<b>26/10/2018</b>	81	11,4
<b>13/03/2018</b>	1413	35,0	<b>08/11/2018</b>	160	12,7
<b>20/03/2018</b>	1284	30,0	<b>22/11/2018</b>	152	12,3
<b>27/03/2018</b>	514	25,0	<b>06/12/2018</b>	306	15,5
<b>03/04/2018</b>	428	17,0			

Fonte: Do autor.

Para os eventos erosivos que aconteceram a partir das campanhas de coleta de dados na seção de controle, ou seja, a partir de 11 de dezembro de 2017, calcularam-se alguns parâmetros. A Tabela 16 resume esses dados.

Tabela 16 – Resumo dos parâmetros hidrológicos dos eventos erosivos.

(continua)

Data	29/12/2017	30/12/2017	01/01/2018	03/01/2018	07/01/2018
<b>Precipitação 24h anteriores [mm]</b>	0,6	69,4	2,2	4,4	13,8
<b>Precipitação 48h anteriores [mm]</b>	4,6	69,4	26	56	13,8
<b>Precipitação 72h anteriores [mm]</b>	4,6	74	95,4	57,2	17,4
<b>Precipitação 96h anteriores [mm]</b>	4,6	74	95,6	81	40
<b>Precipitação 120h anteriores [mm]</b>	8,6	74	100	149,8	53,6
<b>Precipitação [mm]</b>	60,2	21,8	35,8	19,4	43,4
<b>Duração [h]</b>	6,9	6,8	2,2	4,7	22,2
<b>Intensidade [mm.h<sup>-1</sup>]</b>	8,7	3,2	16,5	4,2	2,0
<b><i>Q<sub>a</sub></i> [L·s<sup>-1</sup>]</b>	353	480	467	495	460
<b><i>Q<sub>b</sub></i> [L·s<sup>-1</sup>]</b>	1581	604	811	683	776
<b><i>Q<sub>c</sub></i> [L·s<sup>-1</sup>]</b>	467	545	480	627	618
<b><math>(\Delta Q/\Delta t) * 5</math> [(L·s<sup>-1</sup>)/5min]</b>	1,00	0,17	0,33	1,57	0,52
<b><math>\Sigma DSD</math> [L·s<sup>-1</sup>]</b>	17384,3	5791,3	4615,7	4302,2	13004,8
<b>Deflúvio escoado [L]</b>	5215297,8	1737404,0	1384708,7	1290651,7	3901432,2
<b><i>QE máxima</i> [L.s.km<sup>2</sup>]</b>	99,4	38,0	51,0	43,0	48,8
<b><i>QE mínima</i> [L.s.km<sup>2</sup>]</b>	22,2	18,3	29,4	31,1	28,5
<b><i>QE média</i> [L.s.km<sup>2</sup>]</b>	35,2	34,3	35,8	38,5	36,6
<b><i>MTSS total</i> [kg]</b>	439,5	336,2	149,8	337,6	1157,0
<b><i>MTSS por hectare</i> [kg.ha<sup>-1</sup>]</b>	0,3	0,2	0,1	0,2	0,7

Tabela 16 – Resumo dos parâmetros hidrológicos dos eventos erosivos.

(continuação)

Data	08/01/2018	11/01/2018	23/1/2018	13/2/2018	26/2/2018
<b>Precipitação 24h anteriores [mm]</b>	48,4	0			1,2
<b>Precipitação 48h anteriores [mm]</b>	68	0			10,4
<b>Precipitação 72h anteriores [mm]</b>	68,4	19,8			11,2
<b>Precipitação 96h anteriores [mm]</b>	72	63,8			13,6
<b>Precipitação 120h anteriores [mm]</b>	83,2	92,8	sem sensor	sem sensor	13,8
<b>Precipitação [mm]</b>	35,6	49,8	26	30,8	33,8
<b>Duração [h]</b>	15,7	3,7	2,0	3,3	4,8
<b>Intensidade [mm.h<sup>-1</sup>]</b>	2,3	13,6	13,0	9,5	7,0
<b><i>Qa</i> [L·s<sup>-1</sup>]</b>	811	516	-	-	191
<b><i>Qb</i> [L·s<sup>-1</sup>]</b>	882	573	-	-	361
<b><i>Qc</i> [L·s<sup>-1</sup>]</b>	811	522	-	-	278
<b><math>(\Delta Q/\Delta t) * 5</math> [(L·s<sup>-1</sup>)/5min]</b>	0,00	0,07	-	-	0,32
<b><math>\Sigma DSD</math> [L·s<sup>-1</sup>]</b>	6863,8	6099,5	-	-	33144,9
<b>Deflúvio escoado [ L]</b>	2059149,0	1829849,4	-	-	9943462,6
<b><i>QE máxima</i> [L.s.km<sup>2</sup>]</b>	55,5	36,0	-	-	22,7
<b><i>QE mínima</i> [L.s.km<sup>2</sup>]</b>	38,0	31,5	-	-	15,1
<b><i>QE média</i> [L.s.km<sup>2</sup>]</b>	50,3	34,0	-	-	22,9
<b><i>MTSS total</i> [kg]</b>	1228,3	298,9	-	-	477,4
<b><i>MTSS por hectare</i> [kg.ha<sup>-1</sup>]</b>	0,8	0,2	-	-	0,3

Tabela 16 – Resumo dos parâmetros hidrológicos dos eventos erosivos.

(continuação)

Data	27/2/2018	07/03/2018	10/03/2018	15/3/2018	16/3/2018
<b>Precipitação 24h anteriores [mm]</b>	5,6	8,6	0,2	12	0
<b>Precipitação 48h anteriores [mm]</b>	38,2	8,6	13,4	12,2	41,4
<b>Precipitação 72h anteriores [mm]</b>	38,2	9,6	49,4	12,2	41,4
<b>Precipitação 96h anteriores [mm]</b>	47,4	10,2	58	12,2	41,6
<b>Precipitação 120h anteriores [mm]</b>	50,6	10,6	58	102,2	46,6
<b>Precipitação [mm]</b>	18,6	34	89,6	29,4	13,4
<b>Duração [h]</b>	2,9	2,8	4,7	3,4	2,5
<b>Intensidade [mm.h<sup>-1</sup>]</b>	6,4	12,0	19,2	8,6	5,4
<b><i>Q<sub>a</sub></i> [L.s<sup>-1</sup>]</b>	293	222	299	1455	1154
<b><i>Q<sub>b</sub></i> [L.s<sup>-1</sup>]</b>	600	3029	13594	2947	1407
<b><i>Q<sub>c</sub></i> [L.s<sup>-1</sup>]</b>	310	423	1051	1455	1154
<b><math>(\Delta Q/\Delta t) * 5</math> [(L.s<sup>-1</sup>)/5min]</b>	0,07	1,16	0,69	0,00	0,00
<b><math>\Sigma DSD</math> [L.s<sup>-1</sup>]</b>	44629,6	85271,0	1326898,8	124955,7	40521,4
<b>Deflúvio escoado [L]</b>	13388870,6	25581306,7	398069652,9	37486705,2	12156429,4
<b><i>QE máxima</i> [L.s.km<sup>2</sup>]</b>	37,7	190,5	855,0	185,3	88,5
<b><i>QE mínima</i> [L.s.km<sup>2</sup>]</b>	18,4	14,0	18,8	90,7	71,8
<b><i>QE média</i> [L.s.km<sup>2</sup>]</b>	28,4	46,6	117,6	130,4	82,1
<b><i>MTSS total</i> [kg]</b>	751,0	2968,0	--	18768,2	5251,0
<b><i>MTSS por hectare</i> [kg.ha<sup>-1</sup>]</b>	0,5	1,9	--	11,8	3,3

Tabela 16 – Resumo dos parâmetros hidrológicos dos eventos erosivos.

(conclusão)

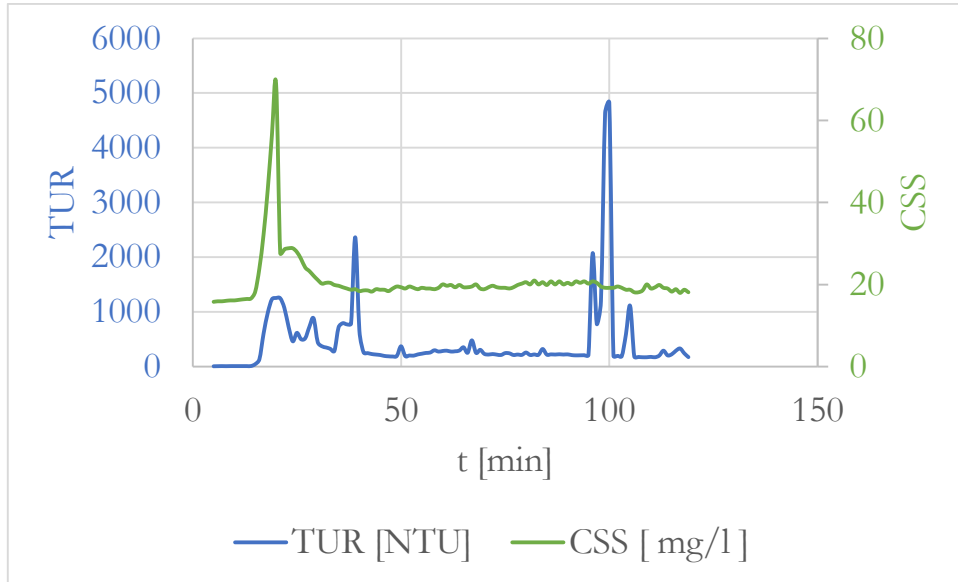
Data	20/3/2018	20/3/2018	23/3/2018	03/04/2018
<b>Precipitação 24h anteriores [mm]</b>	4,6	22,6	0	1,6
<b>Precipitação 48h anteriores [mm]</b>	7,6	25,8	7,8	4,4
<b>Precipitação 72h anteriores [mm]</b>	19,4	37,6	23,8	5,4
<b>Precipitação 96h anteriores [mm]</b>	32,8	51	67,4	5,4
<b>Precipitação 120h anteriores [mm]</b>	59,6	51	70,6	5,4
<b>Precipitação [mm]</b>	18	30,4	22,4	20,6
<b>Duração [h]</b>	1,3	4,2	4,8	4,1
<b>Intensidade [mm.h<sup>-1</sup>]</b>	13,5	7,3	4,7	5,0
<b><i>Q<sub>a</sub></i> [L·s<sup>-1</sup>]</b>	1070	1142	569	411
<b><i>Q<sub>b</sub></i> [L·s<sup>-1</sup>]</b>	1548	1868	904	469
<b><i>Q<sub>c</sub></i> [L·s<sup>-1</sup>]</b>	1100	1142	569	411
<b><math>(\Delta Q/\Delta t) * 5</math> [(L·s<sup>-1</sup>)/5min]</b>	0,25	0,00	0,00	0,00
<b><math>\Sigma DSD</math> [L·s<sup>-1</sup>]</b>	18183,4	17093,5	65243,8	0,0
<b>Deflúvio escoado [L]</b>	5455032,4	5128050,2	19573141,9	0,0
<b><i>QE máxima</i> [L.s.km<sup>2</sup>]</b>	97,4	117,5	56,9	29,5
<b><i>QE mínima</i> [L.s.km<sup>2</sup>]</b>	67,3	71,8	35,8	25,4
<b><i>QE média</i> [L.s.km<sup>2</sup>]</b>	76,6	85,5	47,1	28,1
<b><i>MTSS total</i> [kg]</b>	2034,8	1487,8	2028,9	635,7
<b><i>MTSS por hectare</i> [kg.ha<sup>-1</sup>]</b>	1,3	0,9	1,3	0,4

Fonte: Do autor.

Notas: *Q<sub>a</sub>* = Vazão no horário de início da ascensão; *Q<sub>b</sub>* = Vazão de pico; *Q<sub>c</sub>* = Vazão no horário de início da recessão;  $\Delta t$  é a diferença temporal entre os tempos observados para *Q<sub>c</sub>* e *Q<sub>a</sub>*; *QE* = Vazão específica.

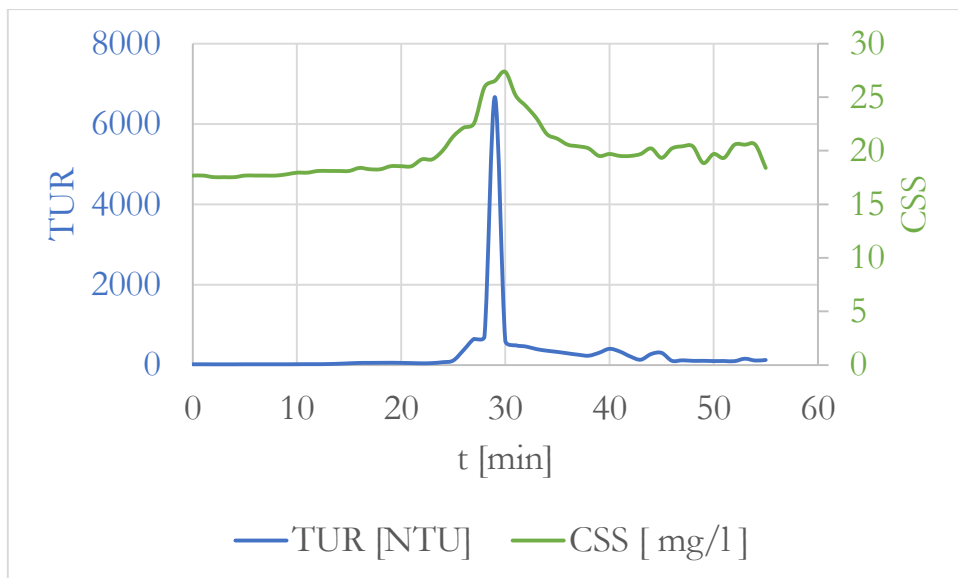
Realizou-se uma comparação entre os dados de *TUR* e *CSS* para os eventos classificados, apresentados nas Figura 37 a Figura 45.

Figura 37 - Comparação entre *TUR* e *CSS* do Evento 1.



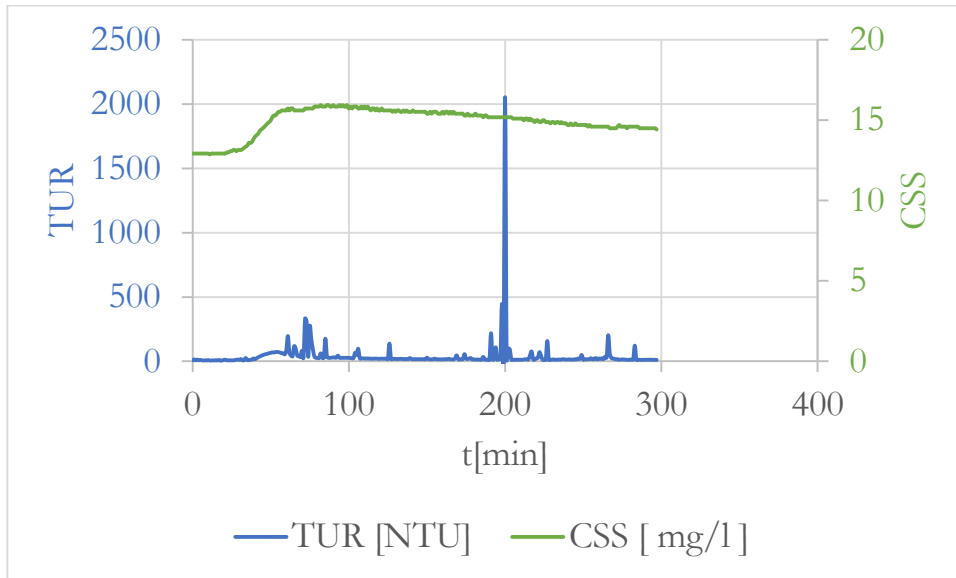
Fonte: Do autor.

Figura 38 - Comparação entre *TUR* e *CSS* do Evento 2.



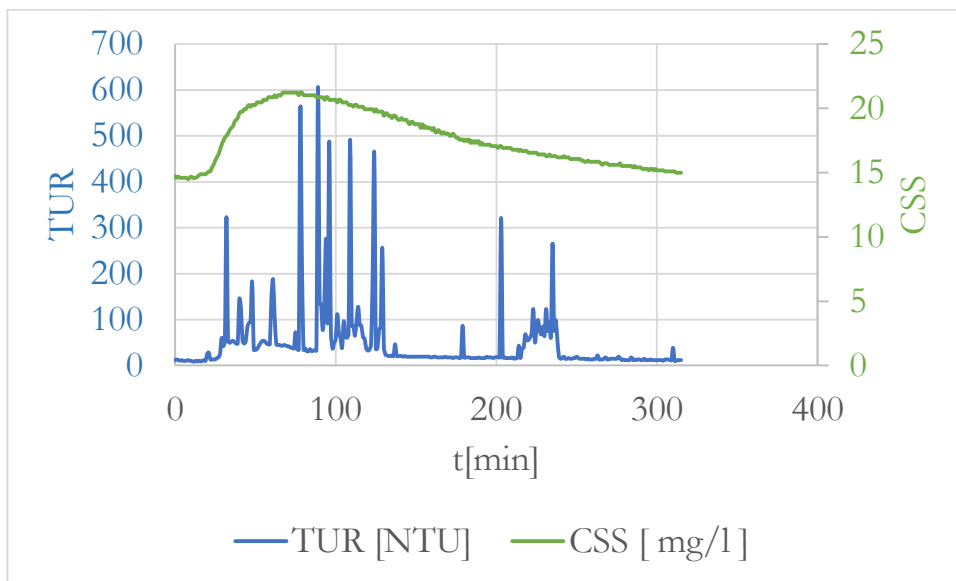
Fonte: Do autor.

Figura 39 - Comparação entre *TUR* e *CSS* do Evento 3.



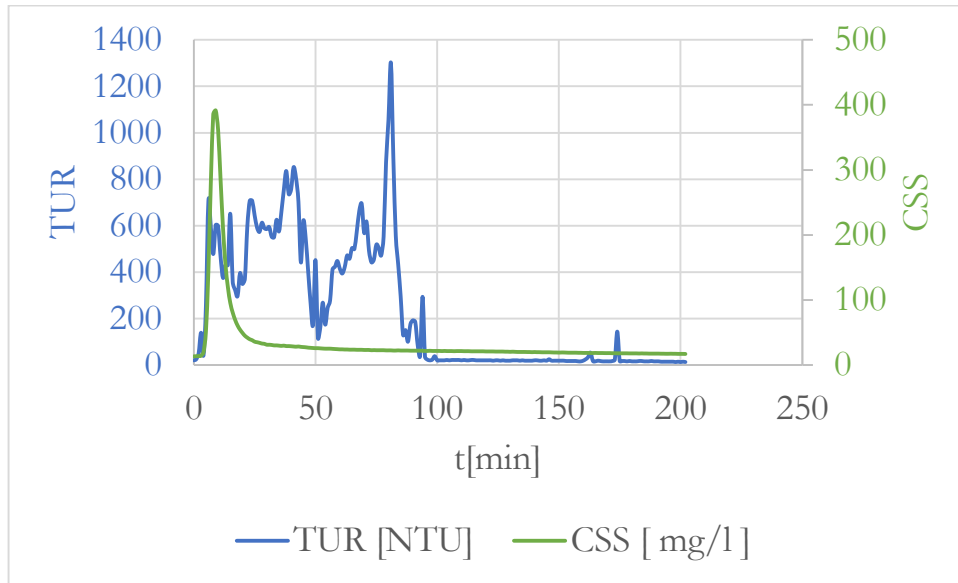
Fonte: Do autor.

Figura 40 - Comparação entre *TUR* e *CSS* do Evento 4.



Fonte: Do autor.

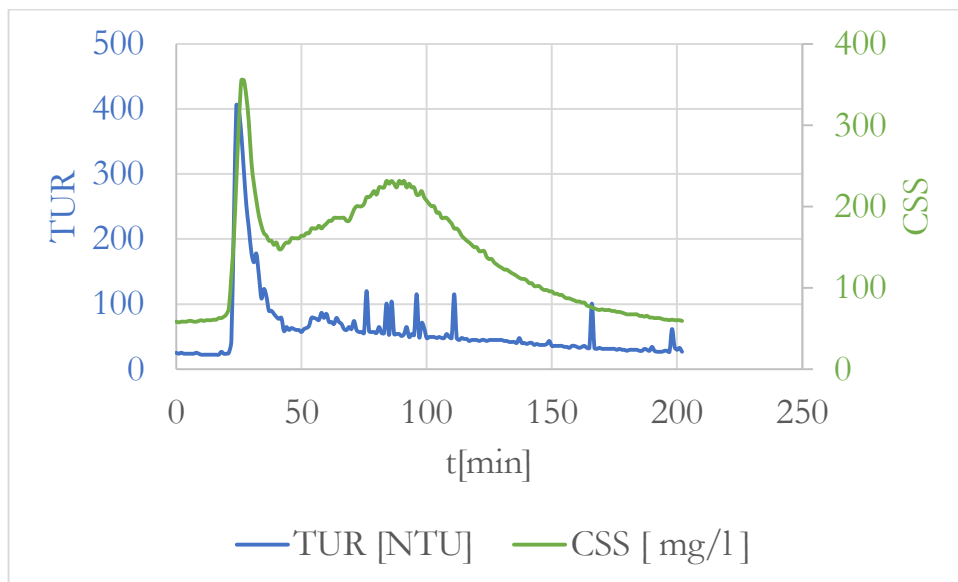
Figura 41 - Comparação entre *TUR* e *CSS* do Evento 5.



Fonte: Do autor.

Os dados do evento 6 foram os do dia 10 de março de 2018, evento em que a curva de descarga de sedimentos retornou um valor muito fora da realidade, não possibilitando comparação.

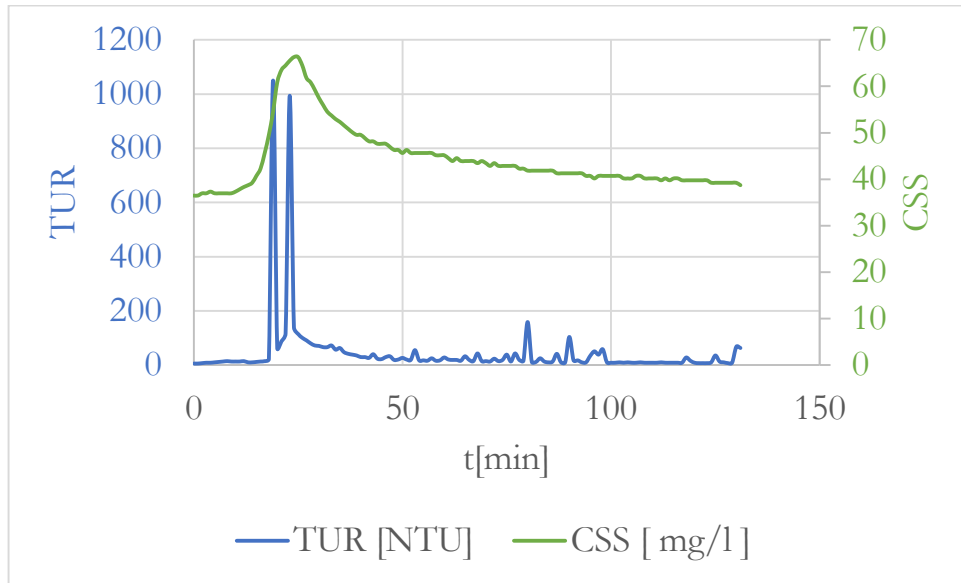
Figura 42 - Comparação entre *TUR* e *CSS* do Evento 7.



Fonte: Do autor.

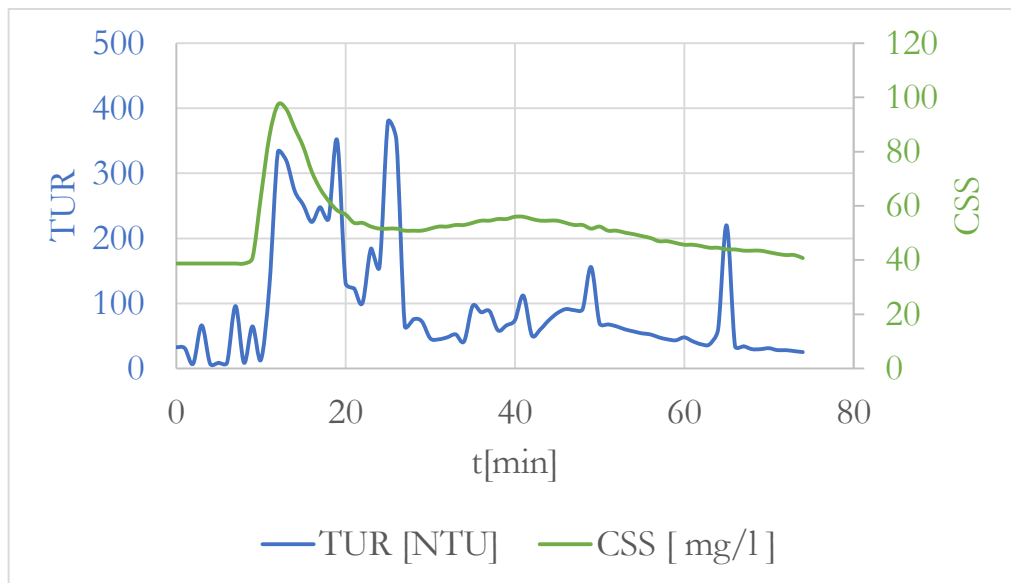


Figura 43 - Comparação entre *TUR* e *CSS* do Evento 8.



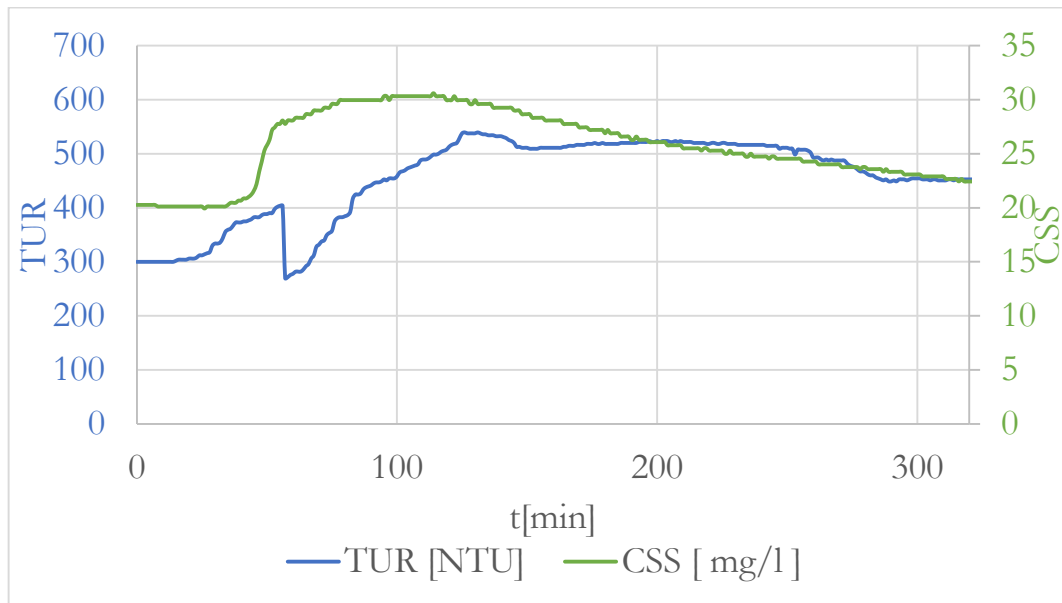
Fonte: Do autor.

Figura 44 - Comparação entre *TUR* e *CSS* do Evento 9.



Fonte: Do autor.

Figura 45 - Comparação entre *TUR* e *CSS* do Evento 10.



Fonte: Do autor.

A comparação entre *TUR* e *CSS* permite visualizar que o sensor de turbidez pode indicar qualitativamente a concentração de sólidos suspensos, pois na maior parte do tempo, a curva de *TUR* acompanha a curva de *CSS*, mas esse acompanhamento não é suficiente para indicações quantitativas, para essa última indicação são necessários mais ajustes e estudos envolvendo essas variáveis. Em alguns momentos são observados picos nas curvas de *TUR* em todos os gráficos, esses valores podem ser explicados pela passagem de algum obstáculo na frente do sensor, como folhas ou galhos mais grossos, e como seu princípio de funcionamento é quantificar a refletância do feixe de luz por ele emitido, estas situações podem gerar tais picos.

No trabalho de Passos (2019), o autor percebeu um ajuste melhor aos dados de *TUR* e *CSS* ao retirar os valores de turbidez muito elevados (acima de 500 NTU de acordo com o autor).