

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Guilherme Silveira Baptista

**METODOLOGIA DA CURVA NÚMERO: DETERMINAÇÃO DE
PARÂMETROS PARA SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS EM PORTO
ALEGRE - RS**

Santa Maria, RS
2023

Guilherme Silveira Baptista

**METODOLOGIA DA CURVA NÚMERO: DETERMINAÇÃO DE
PARÂMETROS PARA SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS EM PORTO
ALEGRE - RS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal de Santa Maria
(UFSM, RS), como requisito parcial para
obtenção do título de **Engenheiro Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Gustavo Allasia Picilli

Santa Maria, RS
2023

Guilherme Silveira Baptista

**METODOLOGIA DA CURVA NÚMERO: DETERMINAÇÃO DE
PARÂMETROS PARA SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS EM PORTO
ALEGRE - RS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal de Santa Maria
(UFSM, RS), como requisito parcial para
obtenção do título de **Engenheiro Civil**.

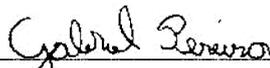
Aprovado em 06 de fevereiro de 2023:



Daniel Gustavo Allasia Piccilli, Dr. (UFSM)



Vitória Tesser Martin, Eng. (UFSM)



Gabriel Sulzbach Pereira, Eng. (UFSM)

Santa Maria, RS
2023

AGRADECIMENTO

Por mais que dinâmica e gratificante, a minha trajetória de formação no curso de Engenharia Civil na UFSM, até este momento, também foi marcada por desafios, incertezas e inseguranças. Se fui capaz de superar tais percalços de maneira positiva e saudável, tenho muito a agradecer à minha mãe, Maria Aparecida, ao meu pai, Evaldo, e aos meus irmãos, Gabriel e Gustavo. Obrigado por serem as minhas principais fontes de alegria, conforto e inspiração.

Agradeço também à minha psicóloga, Luciana, que me ensina a enfrentar situações difíceis de maneira saudável e proporcional. Obrigado pelo carinho e por ter tornado a trajetória mais fácil.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Santa Maria, aos meus professores e aos meus colegas, com quem tive o prazer de aprender e conviver. Sobretudo, agradeço ao Grupo de Pesquisa em Modelagem Hidroambiental e Ecotecnologias, ambiente o qual mais me auxiliou no desenvolvimento dos conhecimentos para a elaboração deste trabalho. Agradeço especialmente ao professor Daniel Gustavo Allasia Piccilli pela orientação ao longo de todo o meu período no grupo e no desenvolvimento deste trabalho, e à mestranda Vitória Tesser Martin, que me ensinou e coorientou, que foi essencial pra o desenvolvimento deste estudo, e que guardo como uma referência de pesquisadora.

RESUMO

METODOLOGIA DA CURVA NÚMERO: DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS PARA SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS EM PORTO ALEGRE - RS

AUTOR: Guilherme Silveira Baptista
ORIENTADOR: Daniel Gustavo Allasia Piccilli

O método da Curva-Número (CN) do Natural Resources Conservation Service (NRCS) se destaca como um dos mais utilizados no cálculo do volume de escoamento superficial para eventos de precipitação, que é fundamental no dimensionamento de obras hidráulicas. Contudo, os valores recomendados para os parâmetros CN e taxa de abstração inicial (λ) utilizados na aplicação do método permanecem como incertezas e pontos de discussão, tendo em vista que ele foi concebido inicialmente a partir de dados hidrológicos de bacias dos Estados Unidos. Dessa forma, o presente trabalho verificou os valores de CN e λ para seis sub-bacias do Arroio Dilúvio em Porto Alegre – RS através de dados hidrológicos monitorados. Com esse objetivo, comparou-se a performance de cinco diferentes métodos para a definição dos valores dos parâmetros na estimativa da chuva efetiva: CN estimado de acordo com tabelas recomendadas pelo NRCS, CN ajustado para λ de 20%, ajustado para λ de 5%, para λ obtido através do método da análise dos eventos e para λ obtido através do método do ajuste do modelo. Os resultados demonstram que os valores de CN tabelado, em geral, foram inferiores aos ajustados para λ de 20%, e que aquele apresentou a pior performance geral na estimativa da lâmina de escoamento superficial. Ainda, os valores da taxa de abstração inicial obtidos pela análise dos eventos apresentam considerável dispersão em algumas sub-bacias, porém, para 83,33% dos eventos, o λ observado é inferior a 20%, se aproximando mais de 5%. Dentre os valores fixos de λ , o que apresentou melhor performance após ajuste do CN foi o de 5%. Já as melhores performances gerais na estimativa da chuva efetiva foram obtidas para λ determinado pelos métodos da análise do evento e do ajuste do modelo para cada sub-bacia. No primeiro, os valores medianos da taxa de abstração inicial variaram de 0,003 até 0,089 entre as sub-bacias, enquanto as medianas dos valores de CN estão entre 26,58 e 95,56. Já no segundo, variaram de zero até 0,011 e os valores de CN estão entre 22,5 e 95,0. A variação de valores λ e CN com melhor ajuste para cada sub-bacia evidencia a importância da calibração regional desses parâmetros a fim de possibilitar maior confiabilidade e segurança no dimensionamento de obras hidráulicas. Apesar disso, o valor de P_{bias} para os parâmetros ajustados não estão não estão dentro dos limites de aceitação para a sub-bacia Cascata-I, o que reforça a necessidade de futura ampliação e aprofundamento do estudo.

Palavras-chave: Escoamento superficial. Curva número. Taxa de abstração inicial.

ABSTRACT

CURVE NUMBER METHOD: PARAMETERS DETERMINATION FOR WATERSHEDS IN PORTO ALEGRE – RS

AUTHOR: Guilherme Silveira Baptista
ADVISOR: Daniel Gustavo Allasia Picilli

The Curve Number method of the Natural Resources Conservation Service (NRCS) stands out as one of the most frequently used in runoff calculation based on rainfall events, which is fundamental to the design of hydraulic works. However, the recommended values for CN and the initial abstraction ratio (λ) remain uncertain and are discussion points in the method, taking into consideration that it was initially conceived using hydrologic data for basins in the United States. Therefore, the present study verified the values of CN and λ for six watersheds of Arroio Dilúvio in Porto Alegre – RS using monitored hydrologic data. With that goal, the performance of five different methods for the definition of the parameter values for runoff estimation were compared: CN based on the NRCS recommended tables, CN fitted for a λ value of 20%, fitted for a λ value of 5%, λ determined using the event analysis method and λ determined using the model fitting method. The results indicate that the tabulated CN values, in general, were lower than the fitted for a λ value of 20%, and that the method resulted in the worst general performance for runoff estimation. The initial abstraction ratio values obtained using the event analysis showed considerable dispersion in some drainage basins, yet, for 83,33% of the events, the observed value of λ is lower than 20%, being closer to 5%. Between the predetermined values of λ , the one that produced the best performance after the CN fitting was 5%. On the other hand, the best general performances for runoff estimation were obtained for λ calculated using the event analysis and the model fitting methods for each drainage basin. In the first, the median values of the initial abstraction ratio ranged from 0,003 to 0,089 between the drainage basins, while the median values of CN ranged from 26,58 to 95,56. In the second, λ ranged from zero to 0,011, and the median values of CN ranged from 22,5 e 95,0. The value variation of the best fitted λ and CN for each drainage basin emphasizes the importance of regional calibration of these parameters in order to add reliability and security to the design of hydraulic projects. Nevertheless, the value of Pbias for the adjusted parameters aren't within the accepted limits for the Cascata-I basin, which reinforces the necessity for future widening and deepening of the study.

Keywords: Runoff. Curve number. Initial abstraction ratio.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Precipitação e profundidade do escoamento superficial para diferentes valores de CN.....	17
Figura 2 - Método da Análise do Evento para determinação de λ	23
Figura 3 - Comportamento padrão de CN assintótico.	25
Figura 4 - Comportamento complacente de CN assintótico.	25
Figura 5 - Comportamento violento de CN assintótico.	26
Figura 6 - Localização e Hidrografia da Bacia do Arroio Dilúvio.....	29
Figura 7 - Sub-bacias da Bacia do Arroio Dilúvio.	30
Figura 8 - Comparação entre traçado do Arroio Dilúvio antes da canalização e após conclusão das obras em 1974.....	31
Figura 9 - Seção transversal do canal do Arroio Dilúvio na ponte de intersecção com a Av. Cel. Lucas de Oliveira. Unidade: metros.	31
Figura 10 - Alagamento nos entornos do Arroio Dilúvio em 2022.	32
Figura 11 - Formações Geomorfológicas no entorno da bacia do Arroio Dilúvio.....	33
Figura 12 - Mapas de relevo e de declividade da bacia do Arroio Dilúvio.	34
Figura 13 - Mapa geológico da bacia do Arroio Dilúvio.	35
Figura 14 - Mapa de solos da bacia do Arroio Dilúvio.	37
Figura 15 - Mapa de uso e cobertura da terra da bacia do Arroio Dilúvio para o ano de 1985.	38
Figura 16 - Normais climatológicas para a estação 83967 do INMET no período de 1961-1991.	40
Figura 17 - Distribuição mensal de eventos de chuva durante os anos de 1970 até 1999.	40
Figura 18 - Localização de Postos Pluviográficos e Linígrafos na bacia do Arroio Dilúvio. P: pluviógrafos; H: linígrafos.....	42
Figura 19 - Exemplo de hidrograma de evento observado com separação do escoamento pelo método da declividade contínua.....	44
Figura 20 - Mapa de Classificação Hidrológico de Solos da Bacia do Arroio Dilúvio.	47
Figura 21 – Resumo da taxa de abstração inicial (λ) estimada nas bacias com o método da análise do evento.	53

Figura 22 - Mediana dos valores de λ pelos métodos de análise do evento e ajuste do modelo.	57
Figura 23 - Dispersão de CN (II) para λ de 20% versus a precipitação.	62
Figura 24 - Dispersão de CN (II) para λ de 5% versus a precipitação.	62
Figura 25 - Comparação de valores de CN tabelado com mediana do calibrado para λ de 20%.	63
Figura 26 - Dispersão de CN (II) para λ obtido pela análise do evento versus a precipitação.	66
Figura 27 - Dispersão de CN (II) para λ obtido pela análise do evento versus a precipitação.	69
Figura 28 - Mediana dos valores de CN definidos por diferentes métodos para as sub-bacias do Arroio Dilúvio.	69
Figura 29 - Valores de Pbias para simulações a partir de medianas dos parâmetros CN e λ	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Descrição dos Grupos Hidrológicos dos solos	18
Tabela 2 -	Classificação conforme 5 dias de precipitação antecedente	20
Tabela 3 -	Unidades Geológicas identificadas na Bacia do Arroio Dilúvio	34
Tabela 4 -	Tipos de solos identificados na Bacia do Arroio Dilúvio.	36
Tabela 5 -	Porcentagem de área de Sub-bacias do Arroio Dilúvio correspondentes a cada classificação de uso e ocupação no ano de 1985.	38
Tabela 6 -	Relações IDF recomendadas para as sub-bacias do Arroio Dilúvio. ...	41
Tabela 7 -	Lista de Linígrafos de dados para a bacia do Arroio Dilúvio.	42
Tabela 8 -	Lista de Pluviógrafos de dados para a bacia do Arroio Dilúvio.	43
Tabela 9 -	Classificação Hidrológica dos solos na Bacia do Arroio Dilúvio.	48
Tabela 10 -	Parâmetro CN para diferentes grupos hidrológicos de solo e Uso e Cobertura da Terra.....	48
Tabela 11 -	Eventos selecionados para calibração dos parâmetros do Método CN.	51
Tabela 12 -	Taxa de abstração inicial (λ) para o método de análise do evento.	53
Tabela 13 -	Correlação de Kendall para a abstração inicial e outros parâmetros dos eventos.....	54
Tabela 14 -	Taxa de abstração inicial (λ) para o método do ajuste do modelo.	56
Tabela 15 -	Taxa de abstração inicial (λ) disponível na literatura.....	57
Tabela 16 -	Resultados de Ferreira (2019) para taxa de abstração inicial para cada sub-bacia do Arroio Dilúvio.	59
Tabela 17 -	CN tabelado para sub-bacias do Arroio Dilúvio.....	60
Tabela 18 -	Parâmetro CN para λ fixado em 20% e em 5%.....	61
Tabela 19 -	Comparação de mediana dos valores de CN para λ de 20% e 5% com outros autores.	64
Tabela 20 -	Parâmetro CN para λ definidos pelo método da análise do evento.	65
Tabela 21 -	Valores de CN para o Arroio Dilúvio disponíveis na literatura.....	67
Tabela 22 -	Parâmetro CN para λ definido pelo método de ajuste do modelo.	68
Tabela 23 -	Resultados de PBIAS na análise de performance dos pares de CN e λ	70
Tabela 24 -	Resultados de RMSE na análise de performance dos pares de CN e λ	72

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	<i>Objetivo geral</i>	<i>13</i>
1.1.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>13</i>
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	MÉTODO DA CURVA-NÚMERO (CN) DO NRCS	15
2.1.1	<i>Determinação do CN sem dados hidrológicos.....</i>	<i>17</i>
2.1.2	<i>Determinação do CN a partir de dados hidrológicos monitorados.....</i>	<i>20</i>
2.1.3	<i>Taxa de abstração inicial.....</i>	<i>21</i>
2.2	MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA TAXA DE ABSTRAÇÃO INICIAL	22
2.3	O MÉTODO ASSINTÓTICO DE DETERMINAÇÃO DO CN.....	24
2.4	CRÍTICAS E LIMITAÇÕES DO MÉTODO.....	26
3	METODOLOGIA.....	28
3.1	BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO DILÚVIO.....	28
3.1.1	<i>Hidrografia</i>	<i>28</i>
3.1.2	<i>Relevo, Geologia e Geomorfologia.....</i>	<i>33</i>
3.1.3	<i>Pedologia.....</i>	<i>35</i>
3.1.4	<i>Uso e Cobertura da terra.....</i>	<i>37</i>
3.1.5	<i>Clima</i>	<i>39</i>
3.1.6	<i>Dados Hidrológicos.....</i>	<i>41</i>
3.2	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MÉTODO DA CURVA-NÚMERO DO NRCS	43
3.2.1	<i>Parâmetro CN para λ de 20% e 5%.....</i>	<i>45</i>
3.2.2	<i>Parâmetro CN e λ a partir de dados observados.....</i>	<i>45</i>
3.2.3	<i>Determinação do parâmetro CN conforme tabelas do NRCS</i>	<i>46</i>
3.3	ANÁLISE DE PERFORMANCE DO MODELO	48
3.3.1	<i>Percent bias (PBIAS).....</i>	<i>49</i>
3.3.2	<i>Raiz do erro quadrático médio (RMSE).....</i>	<i>49</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51

4.1	Eventos Seleccionados	51
4.2	VALORES DA TAXA DE ABSTRAÇÃO INICIAL OBTIDOS A PARTIR DE DADOS OBSERVADOS.....	52
4.2.1	<i>Obtenção de λ a partir da análise dos eventos.....</i>	<i>52</i>
4.2.2	<i>Obtenção de λ a partir do método do Ajuste do Modelo.....</i>	<i>55</i>
4.3	VALORES DO PARÂMETRO CN DEFINIDO POR DIFERENTES MÉTODOS	59
4.3.1	<i>Parâmetro CN definido para valores tabelados do NRCS.....</i>	<i>60</i>
4.3.2	<i>Parâmetro CN para λ fixados de 20% e 5%</i>	<i>60</i>
4.3.3	<i>Parâmetro CN para λ definido pelo método de análise do evento.....</i>	<i>65</i>
4.3.4	<i>Parâmetro CN para λ definido pelo método de ajuste do modelo</i>	<i>67</i>
4.4	ANÁLISE DE PERFORMANCE DOS MODELOS	69
4.4.1	<i>Valores do Percent Bias (Pbias).....</i>	<i>70</i>
4.4.2	<i>Valores da raiz do erro quadrático médio (RMSE)</i>	<i>72</i>
4.5	INCERTEZAS E RECOMENDAÇÕES QUANTO AOS RESULTADOS	73
5	CONCLUSÃO.....	75
	REFERÊNCIAS.....	77
	APÊNDICE A	86
	APÊNDICE B	92
	APÊNDICE C	94
	APÊNDICE D.....	95
	ANEXO A.....	97

1 INTRODUÇÃO

O dimensionamento de obras hidráulicas e de medidas de controle de enchentes dependem da determinação do volume de escoamento superficial decorrente de eventos de precipitação. Na ausência de monitoramento de dados hidrológicos, é comum recorrer a métodos indiretos para determinação do hidrograma total de escoamento superficial em função de dados de chuva. O método da Curva-Número (CN) desenvolvido pelo *Natural Resources Conservation Service* (NRCS) é um dos mais utilizados, e se destaca devido a sua simplicidade, disseminação e aceitação (PONCE; HAWKINS, 1996).

O principal parâmetro desse método é o CN, que depende do tipo de solo e do uso e cobertura da terra da bacia, bem como da condição de umidade antecedente para o evento estudado (USDA, 1986). Quando não existem dados disponíveis para a calibração do parâmetro local, recorre-se a valores indicados por tabelas desenvolvidas a partir de estudos em bacias hidrográficas dos EUA (USDA; NRCS, 2004; TUCCI, 2005). No entanto, a estimativa do CN a partir de valores tabelados requer atenção, visto que pode levar a subestimativas da vazão de projeto, conforme apontado por Tassi et al. (2006), ou a superestimativas, conforme demonstrado por Cunha et al. (2015).

Além do CN, outro parâmetro considerado pelo método são as perdas iniciais (ia), as quais podem influenciar a profundidade da lâmina de escoamento superficial e a distribuição temporal na modelagem da propagação de escoamento superficial (BALTAS; DERVOS; MIMIKOU, 2007). Originalmente, o método relaciona ia à capacidade de armazenamento da bacia (S) através de taxa de abstração inicial (λ), a qual é fixada em 20% e representa a condição adotada para a determinação os valores de CN tabelados (HAWKINS *et al.*, 2009). Contudo, diversos estudos realizados em diferentes bacias hidrográficas apontam que esse valor não é uma constante representativa, e que valores próximos a 5% são mais realistas (FERREIRA, 2019; LAUTHARTE, 2015; VALLE JUNIOR; RODRIGUES; OLIVEIRA, 2019).

Erros na estimativa do CN e de λ podem levar a um dimensionamento ineficiente de obras hidráulicas. O incremento de uma unidade no valor de CN estimado, por exemplo, pode gerar um aumento do volume escoado e da vazão de

pico entre 8 e 10% (ALLASIA; VILLANUEVA, 2007). Ademais, conforme estudado por Allasia (2002), o impacto de um erro de 10% na estimativa do CN no custo de instalação de uma rede de macrodrenagem urbana é de 15 a 80% dependendo do cenário analisado.

Dessa forma, a fim de garantir a eficiência de obras hidráulicas e de medidas de controle de enchentes, é importante a utilização de valores de CN e λ adequados para o local de estudo e, portanto, sua verificação a partir de dados hidrológicos monitorados se faz necessária para bacias brasileiras, onde as recomendações acerca destes parâmetros são escassas.

Conforme apontado por Woodward et al. (2003), dois métodos podem ser utilizados para a estimativa da taxa de abstração inicial a partir de dados observados, sendo um deles a Análise do Evento e o outro o Ajuste do Modelo. O estudo aqui apresentado consiste em uma verificação dos valores dos parâmetros CN e λ a partir de cinco métodos para a bacia hidrográfica do Arroio Dilúvio em Porto Alegre - RS. O local do estudo de caso foi definido a partir dos critérios de disponibilidade de dados de precipitação e vazão, importância da bacia em termos de densidade populacional e a frequência de ocorrência de inundações na área.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 **Objetivo geral**

Estimar os parâmetros CN e λ da metodologia da Curva-Número para a bacia do Arroio Dilúvio em Porto Alegre - RS a partir de dados hidrológicos observados.

1.1.2 **Objetivos específicos**

São objetivos específicos deste trabalho:

- I. Determinar a taxa de abstração inicial (λ) e o parâmetro Curva-Número (CN) para eventos de chuva-vazão da bacia hidrográfica do Arroio Dilúvio em Porto Alegre – RS a partir de valores tabelados e a partir de dados observados através dos métodos da Análise do Evento, do Ajuste do Modelo, para λ de 20% e λ de 5%;

- II. Comparar os valores de CN e λ obtidos a partir de cada uma das metodologias de determinação da taxa de abstração inicial;
- III. Comparar os valores de CN e λ estimados a partir de dados observados com os obtidos a partir de valores tabelados, para λ de 20%, e para λ de 5%.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MÉTODO DA CURVA-NÚMERO (CN) DO NRCS

O Método CN foi inicialmente desenvolvido em 1954 pelo atual Serviço de Conservação de Recursos Naturais do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (NRCS-USDA) e documentado em 1956 no *National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology (NEH-4)*, com o objetivo de padronizar a estimativa do volume do escoamento superficial a partir de eventos de chuva (PONCE; HAWKINS, 1996). O método se destaca devido sua simplicidade e estabilidade, além de a estimativa dos seus parâmetros ser dependente das principais características físicas de bacias que contribuem para a produção de escoamento superficial: tipo de solo, uso e cobertura da terra e condição de umidade antecedente. (MISHRA; SINGH, 2003).

Resultado de profusas investigações de campo em pequenas bacias rurais do centro-oeste dos Estados Unidos, o método CN passou por diversas revisões ao longo do tempo, entretanto, os conceitos principais permaneceram os mesmos (HAWKINS *et al.*, 2009; MISHRA; SINGH, 2003). Entre as revisões realizadas, destaca-se a extensão para áreas urbanas com a publicação da *Technical Release 55 (TR-55): Urban Hydrology of Small Watersheds* (USDA, 1986).

O método é baseado na equação de balanço hídrico (Equação 1) considerando a hipótese de proporcionalidade entre a retenção e a lâmina de água do escoamento superficial, de tal forma que o quociente do volume de escoamento superficial direto pelo volume total de precipitação se equivale ao quociente do volume infiltrado pelo potencial máximo de retenção (Equação 2) (CUNHA *et al.*, 2015; HAWKINS *et al.*, 2009; MISHRA; SINGH, 2003).

$$P = Q + F \quad (1)$$

$$\frac{Q}{P} = \frac{F}{S} \quad (2)$$

Sendo P a precipitação total (mm ou pol); Q o escoamento superficial (mm ou pol); F a infiltração (mm ou pol), e S o potencial máximo de retenção (mm ou pol).

A combinação das equações 1 e 2 resulta na primeira forma básica da equação do escoamento superficial (Equação 3) (HAWKINS *et al.*, 2009).

$$Q = P^2 / (P + S) \quad (3)$$

A relação sugerida na equação 3 implica que o escoamento superficial iniciaria simultaneamente ao início da chuva, contudo, a partir da análise de eventos individuais, identificou-se que o escoamento superficial ocorria somente após certo acúmulo de precipitação. Essa observação foi atribuída a diversas perdas ocorridas antes da formação de excedente de água na superfície, que incluem a interceptação vegetal, infiltração, armazenamento superficial, entre outras. Essas perdas foram integradas e denominadas de abstração inicial (I_a). Dessa forma, a relação demonstrada da equação 3 foi adequada para considerar as referidas perdas, conforme equação 4 (HAWKINS *et al.*, 2009):

$$Q = (P - I_a)^2 / (P - I_a + S), \text{ se } P > I_a$$

$$Q = 0, \text{ se } P \leq I_a$$
(4)

A segunda hipótese considerada no método original visa simplificar a equação 4 através da redução de uma variável, presumindo que há uma relação linear entre a abstração inicial (I_a) e o potencial máximo de retenção (S) (Equação 5) (MISHRA; SINGH, 2003; USDA; NRCS, 2004). Inicialmente, a taxa de abstração inicial (λ) foi fixada em 20%, dessa forma a relação para determinação da profundidade do escoamento superficial pelo método CN pode ser reescrita conforme a Equação 6 (PONCE; HAWKINS, 1996; USDA, 1986; USDA; NRCS, 2004;):

$$I_a = \lambda * S$$
(5)

$$Q = (P - 0,2S)^2 / (P + 0,8S), \text{ se } P > I_a$$

$$Q = 0, \text{ se } P \leq I_a$$
(6)

Sendo λ a taxa de abstração inicial (adimensional).

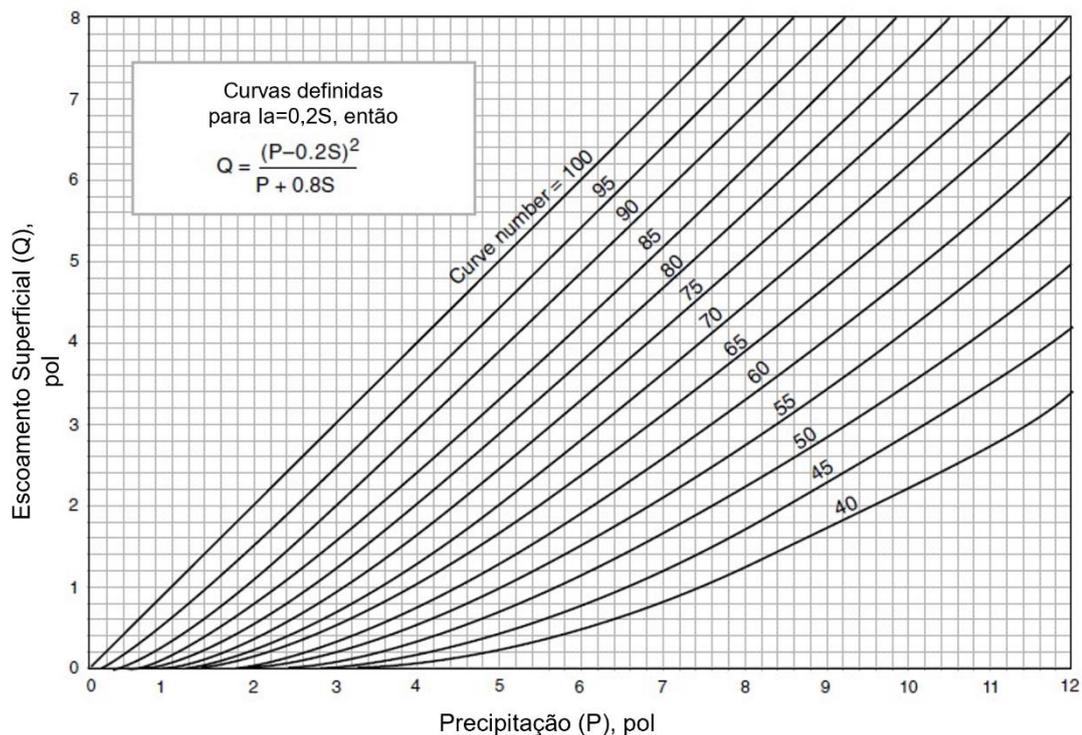
Cabe ressaltar que o potencial máximo de retenção S - também referido na literatura como índice de armazenamento ou perdas máximas potenciais (CUNHA *et al.*, 2015) - pode variar de 0 a ∞ , e esse parâmetro é utilizado para descrever o valor do CN (Equação 7), o qual pode variar entre 0 e 100:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$
(7)

Sendo CN o *curve number* (adimensional).

A relação expressa na Equação 7 é obtida considerando a hipótese da taxa de abstração inicial (λ) igual a 20% e a unidade de S em milímetros (mm). A solução dessa equação para diferentes valores de CN resulta em diferentes relações entre a precipitação (P) e a profundidade do escoamento superficial (Q) conforme apresentado na Figura 1 (USDA, 1986).

Figura 1 - Precipitação e profundidade do escoamento superficial para diferentes valores de CN.



Fonte: USDA (1986).

Segundo Ponce e Hawkins (1996), não existem recomendações diretas sobre os limites das áreas das bacias para as quais o método é aplicável, contudo, recomenda-se cautela para sua utilização em bacias com área superior a 250 km².

2.1.1 Determinação do CN sem dados hidrológicos

A partir de estudos em pequenas bacias dos EUA, os valores de CN foram tabelados para diferentes tipos de solo e uso e cobertura da terra (HAWKINS et al., 2009; USDA, 1986) de tal forma a permitir a estimativa da resposta hidrológica da

bacia em termos de volume de escoamento superficial a partir de suas características físicas.

Considerando a premissa de que perfis de solos com características semelhantes também apresentam similaridade na sua resposta hidrológica (SARTORI; NETO; GENOVEZ, 2005; USBR, 1977), os solos foram classificados em 4 grupos hidrológicos (A, B, C e D) de acordo com a sua taxa mínima de infiltração. Os solos do tipo A apresentam baixo potencial de geração de escoamento superficial, sendo, em geral, mais profundos e porosos, enquanto para os solos do tipo D as taxas de infiltração são as mais baixas (MULLEM et al., 2002; USDA, 1986) (Tabela 1).

Tabela 1 - Descrição dos Grupos Hidrológicos dos solos

Grupo Hidrológico	Descrição do Solo	Taxa Mínima de Infiltração (mm/h)
A	Solos com baixo potencial de escoamento e alta taxa de infiltração quando molhados, sendo solos profundos e excessivamente drenados, consistindo principalmente de areias ou cascalhos.	Maior do que 7,62.
B	Solos com moderada taxa de infiltração quando completamente molhados, sendo solos profundos, moderadamente a bem drenados e textura moderadamente fina a moderadamente grossa.	Entre 3,81 e 7,62.
C	Solos com baixa taxa de infiltração quando molhados, com camadas que dificultam a movimentação de água de camadas superiores para inferiores, ou com textura moderadamente fina.	Entre 1,27 e 3,81.
D	Solos com alto potencial de escoamento e taxa de infiltração muito baixa quando molhados, sendo solos com argila dura, permanência de lençol freático elevado, solos argilosos e/ou expansivos próximos a superfície.	Menor do que 1,27.

Fonte: adaptado de Sartori, Neto e Genovez (2005); USDA (1989).

Na especificação de solos brasileiros nos grupos hidrológicos, deve-se considerar o comportamento diferenciado que esses apresentam quando comparados com os solos norte-americanos para os quais o método foi desenvolvido inicialmente (POTT; DE MARIA, 2003; SARTORI; NETO; GENOVEZ, 2005). Sartori (2004) sugere uma classificação hidrológica para solos brasileiros baseada em suas características podológicas conforme apresentado no ANEXO A.

Nas primeiras versões do NEH (USDA, 1969, 1976, 1985), um outro fator apontado como um dos principais na variação do valor de CN foi a condição de umidade antecedente (*Antecedent Moisture Condition* ou AMC), determinado a partir da precipitação correspondente aos 5 dias antecedentes ao evento (HAWKINS *et al.*, 2009). Contudo, após estudos com 86 diferentes tipos de solos nos EUA, concluiu-se que a precipitação antecedente explica parcialmente a variação de CN, dessa forma a terminologia foi alterada para condição de escoamento antecedente (*Antecedent Runoff Condition* ou ARC) (MULLEM *et al.*, 2002). As condições de ARC são classificadas de acordo com a probabilidade de excedência do escoamento direto estimado para uma dada precipitação: condições secas de baixa umidade com probabilidade de ocorrência de valores inferiores de escoamento direto de 12% (ARC I); condições médias (ARC II); e condições úmidas com probabilidade de ocorrência de valores superiores de escoamento direto de 88% (ARC III) (HAWKINS *et al.*, 2009).

Apesar da AMC explicar apenas parte da variação do CN, a condição de umidade antecedente do solo ainda é considerada uma das fontes primárias de variação do CN e continua sendo aplicada devido a sua simplicidade e facilidade de aplicação (HAWKINS *et al.*, 2009; MISHRA *et al.*, 2008; MISHRA; SINGH, 2003).

Nesse sentido, foram definidas três classes para a condição de umidade antecedente (AMC), cada uma correspondendo a uma faixa de precipitação dos 5 dias antecedentes, conforme detalhado na Tabela 2 (HAWKINS *et al.*, 2009; MULLEM *et al.*, 2002; USDA; NRCS, 2004). As tabelas do método CN foram desenvolvidas para uma condição de umidade antecedente II, portanto os valores de CN para as demais condições devem ser corrigidos de acordo com as equações 8 e 9 (HAWKINS; HJELMFELT; ZEVENBERGEN, 1985; PONCE; HAWKINS, 1996).

$$CN(I) = \frac{CN(II)}{2,281 - 0,01281 * CN(II)} \quad (8)$$

$$CN(III) = \frac{CN(II)}{0,427 + 0,00573 * CN(II)} \quad (9)$$

Sendo CN(I) para solos com condição de umidade seca; CN(II) para solos com condição de umidade normal, e CN(III) para solos com condição de umidade úmida.

Tabela 2 - Classificação conforme 5 dias de precipitação antecedente

AMC	5 dias de precipitação antecedente (Estação Seca)	5 dias de precipitação antecedente (Estação Úmida)
I	Menor do que 12,7 mm	Menor do que 35,6 mm
II	De 12,7 mm até 28,0 mm	De 35,6 mm até 53,4 mm
III	Maior do que 28,0 mm	Maior do que 53,4 mm

Fonte: adaptado de Boughton (1989).

O terceiro fator que se destaca na determinação do CN a partir de valores tabelados é o uso e ocupação da terra: o tipo de cobertura, tratamento da terra e a condição hidrológica do solo – que representa os efeitos dos demais fatores na capacidade de infiltração e geração de escoamento (USDA, 1986).

Através da *Technical Release 55* (USDA, 1986), o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos divulgou as tabelas dos valores de CN para os diferentes tipos de cobertura, tratamento, condição hidrológica e grupos hidrológicos dos solos. Dessa forma, o CN pode ser estimado a partir da combinação dessas características físicas da bacia, e o seu valor médio estimado a partir de ponderação pela área correspondente a cada valor de CN (BERTOTTO *et al.*, 2021; SARTORI; NETO; GENOVEZ, 2005).

2.1.2 Determinação do CN a partir de dados hidrológicos monitorados

Quando existem dados hidrológicos monitorados, sobretudo dados de precipitação e vazão, é possível determinar diferentes variáveis isoladas, dentre elas o CN conforme equação 10 a partir das informações observadas (HAWKINS *et al.*, 2009). Caso o comportamento do escoamento superficial na bacia também seja conhecido, as perdas iniciais podem ser definidas pelo usuário, conforme descrito no item 2.2 e, assim, o CN pode ser definido pela equação 11 (TUCCI, 2012).

$$CN = \frac{25400}{254 + 5 [(P+2Q) - (\sqrt{4Q^2 + 5PQ})]} \quad (10)$$

$$CN = \frac{25400}{\{(P-I_a) \left[\frac{(P-I_a)}{Q} - 1 \right] + 254\}} \quad (11)$$

Sendo o CN para solos com condição de umidade normal; P a precipitação total (mm); Q o escoamento superficial (mm) e I_a a abstração inicial (mm).

Para a determinação do volume do escoamento superficial observado, é necessária a utilização de métodos de separação do escoamento superficial (TUCCI, 2012). Os métodos de separação de escoamento são classificados conforme três categorias: analíticos, de balanço de massa e empíricos. Os métodos empíricos são amplamente utilizados devido a facilidade de aplicação e por apresentarem resultados que não diferem significativamente dos obtidos por metodologias mais complexas, dentre eles, os métodos gráficos se destacam pela simplicidade (BAHRAMI *et al.*, 2022; ZHANG *et al.*, 2013).

Dentre os métodos gráficos para a separação do escoamento superficial, o método da declividade constante consiste na identificação de dois pontos no hidrograma do evento: o ponto de início do escoamento superficial – demarcando o início da ascensão do hidrograma devido à contribuição do escoamento superficial – e o ponto de inflexão, o qual indica o fim do escoamento superficial. A reta resultante da união desses dois pontos separa o escoamento superficial do escoamento de base (THOMAS; MONDE; DAVIS, 2000; TUCCI, 2012).

Para a identificação do ponto de inflexão, uma prática recomendada é a plotagem do hidrograma em escala mono-logarítmica, visto que a recessão pode ser descrita a partir de uma expressão exponencial e, portanto, tenderá para uma reta, sendo que o ponto de mudança de declividade corresponde ao ponto de inflexão (THOMAS; MONDE; DAVIS, 2000).

Já as perdas iniciais podem ser definidas a partir de diferentes métodos que serão explorados no item 2.2.

2.1.3 Taxa de abstração inicial

Conforme apresentado anteriormente, o método CN originalmente indica que o quociente entre as abstrações iniciais (I_a) e o máximo potencial de retenção (S), ou seja, a taxa de abstração inicial (λ), poderia ser fixada em 20% para as aplicações do método (PONCE; HAWKINS, 1996; USDA, 1986). Contudo, estudos posteriores indicaram valores de λ inferiores a 20% (ASSAYE *et al.*, 2021; BERTOTTO *et al.*, 2021; FERREIRA, 2019; LAUTHARTE, 2015; WOODWARD *et al.*, 2003).

Estudos em diferentes bacias indicam que o valor de 5% seria mais representativo para o valor de λ (PONCE; HAWKINS, 1996; WOODWARD *et al.*, 2003) inclusive para bacias brasileiras, conforme demonstrado por Ferreira (2019), Alves (2016) e Valle Junior, Rodrigues e Oliveira (2019). Contudo, Cunha *et al.* (2015) e Ponce e Hawkins (1996) apontam que o valor de λ pode ser interpretado como um parâmetro regional, e verificam que a abstração inicial pode não ser linearmente proporcional ao máximo potencial de retenção (ELHAKEEN; PAPANICOLAOU, 2009). Assaye *et al.* (2021), por exemplo, ao analisar o parâmetro para a bacia do Rio Nilo Azul na Etiópia identificou que o valor mais adequado seria de 1%. Já Bertotto *et al.* (2021), ao investigar o valor de CN e λ para um solo argiloso do município de Pato Branco - PR usando modelos de infiltração e dados medidos, encontrou λ variando entre 0% e 58% para em uma condição intermediária de umidade do solo antes da precipitação, sendo que os resultados indicaram que a relação entre I_a e S pode ser considerada linear somente quando $I_a > 37$ mm e $S > 113$ mm. Esses estudos corroboram a recomendação de calibração regional para o valor de λ .

2.2 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA TAXA DE ABSTRAÇÃO INICIAL

Em relação à estimativa da taxa de abstração inicial quando há disponibilidade de dados hidrológicos monitorados, Woodward *et al.* (2003) e Jiang, R. (2001) indicam duas técnicas que podem ser aplicadas: a Análise do Evento e o Ajuste do Modelo.

A determinação da taxa de abstração inicial através do método da Análise do Evento consiste na divisão da chuva entre o período anterior ao início do escoamento superficial, e o posterior. O volume de precipitação anterior ao início do escoamento superficial corresponde à abstração inicial (I_a). Esse valor pode ser substituído na equação 4 para a obtenção de S . Dessa forma, λ é calculado para cada evento conforme a equação 5 e a mediana de λ é utilizada para caracterizar a bacia (JIANG, 2001; SHI *et al.*, 2009; WOODWARD *et al.*, 2003). A Figura 2 ilustra esse procedimento.

Já o Ajuste do Modelo é um método iterativo que consiste na determinação dos valores de λ e S que melhor se ajustam para a equação 12, que foi obtida a partir da combinação das equações 4 e 5. A função objetivo para a determinação dos parâmetros λ e S é o mínimo da soma do quadrado dos resíduos, conforme indicado

na equação 13. Cada par de P e Q, portanto, apresenta uma única solução (JIANG, 2001; WOODWARD *et al.*, 2003).

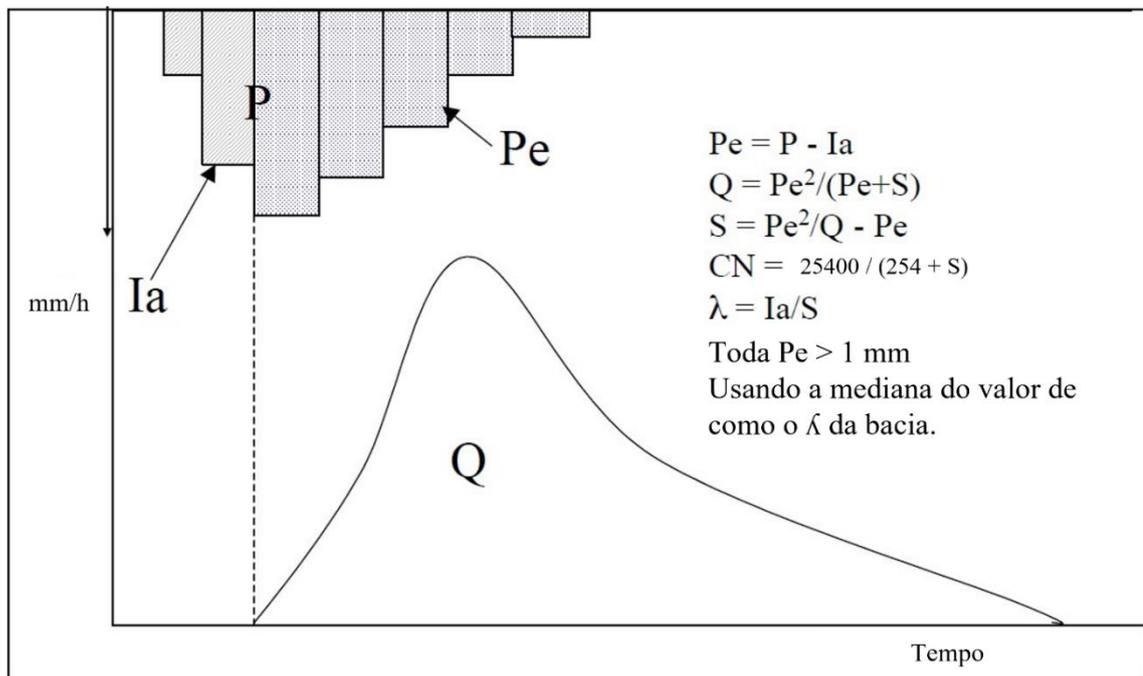
$$Q_{sim} = (P - \lambda S)^2 / [P + (1 - \lambda) * S], \text{ se } P > \lambda S \quad (12)$$

$$Q_{sim} = 0, \text{ se } P \leq \lambda S$$

$$\sum \{Q_{obs} - [\frac{(P - \lambda S)^2}{(P + (1 - \lambda) S)}]\}^2 \quad (13)$$

Sendo P a precipitação total (mm); Qsim o escoamento superficial simulado (mm); Qobs o escoamento superficial observado (mm); S o potencial máximo de retenção (mm), e λ a taxa de abstração inicial (adimensional).

Figura 2 - Método da Análise do Evento para determinação de λ .



Fonte: Woodward *et al.* (2003).

Os resultados obtidos por Woodward *et al.* (2003) e por Jiang, R. (2001) indicam uma grande variabilidade no valor de λ para diferentes eventos em uma mesma bacia, e que os valores de λ determinados a partir do Ajuste do Modelo variaram mais do que os obtidos a partir da Análise do Evento, no entanto isso pode decorrer de um número maior de eventos utilizados na aplicação do primeiro.

Convém ressaltar que os valores de CN tabelados foram determinados para um λ igual a 20% e, portanto, para diferentes valores de λ o CN deve ser determinado de acordo com a equação 7.

2.3 O MÉTODO ASSINTÓTICO DE DETERMINAÇÃO DO CN

Apesar da ampla disseminação do método da Curva-Número desenvolvido pelo NRCS (HAWKINS *et al.*, 2009; PONCE; HAWKINS, 1996), Hawkins (1993) chama atenção para o fato de que a sensibilidade do método ao parâmetro CN é superior à precipitação observada. Dessa forma, erros na estimativa do parâmetro CN implicam em maiores consequências na determinação da chuva efetiva do que erros na precipitação.

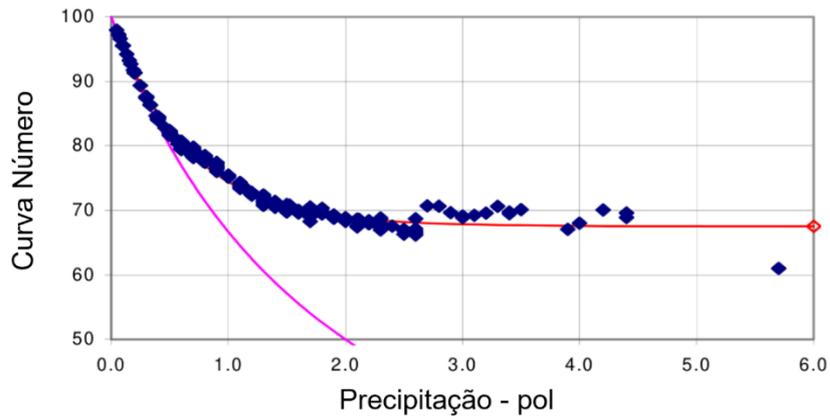
O método assintótico de determinação do CN, descrito por Hawkins (1993), se apresenta como uma alternativa para a estimativa do parâmetro como uma relação entre a distribuição de frequência de eventos de precipitação e a distribuição de frequência de escoamento superficial para uma determinada bacia (MULLEM *et al.*, 2002).

Para a determinação do CN assintótico, Hawkins (1993) recomenda o tratamento dos dados de precipitação e de escoamento superficial de forma que os dados observados de P e Q sejam ordenados em ordem decrescente. Após isso, são associados em pares que apresentam a mesma frequência de ocorrência, apesar de possivelmente não terem sido observados em um mesmo evento (HAWKINS, 1993).

O valor de CN calculado para cada um dos pares de P e Q ordenados descreve a relação entre a distribuição de frequência de eventos de chuva e do escoamento superficial. Através de estudos em diversas bacias nos Estados Unidos, Hawkins (1993) observou que podem ser identificados três comportamentos distintos entre CN e a precipitação que variam para cada bacia: o padrão, o violento e o complacente.

O comportamento padrão (*standart behaviour*), observado na Figura 3, foi identificado como o mais comum, no qual o CN calculado diminui para o aumento da precipitação, até apresentar estabilidade para grandes precipitações (HAWKINS, 1993). Para bacias que apresentam esse comportamento, a determinação do CN para pequenos eventos de precipitação tendência o CN para altos valores (MULLEM *et al.*, 2002).

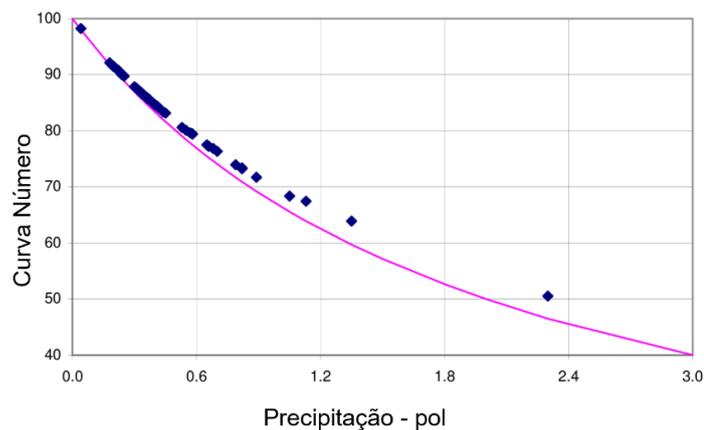
Figura 3 - Comportamento padrão de CN assintótico.



Fonte: Mullem et al. (2002).

Já para as bacias que apresentam comportamento complacente (*complacent*), apresentado na Figura 4, o CN decresce com o aumento da precipitação, mas não apresenta tendência a se estabilizar (HAWKINS, 1993). Hawkins (1993) e Mullem et al. (2002) indicam que o método CN não é o mais adequado a ser utilizado em tais bacias, tendo em vista a dificuldade de ajuste da equação.

Figura 4 - Comportamento complacente de CN assintótico.

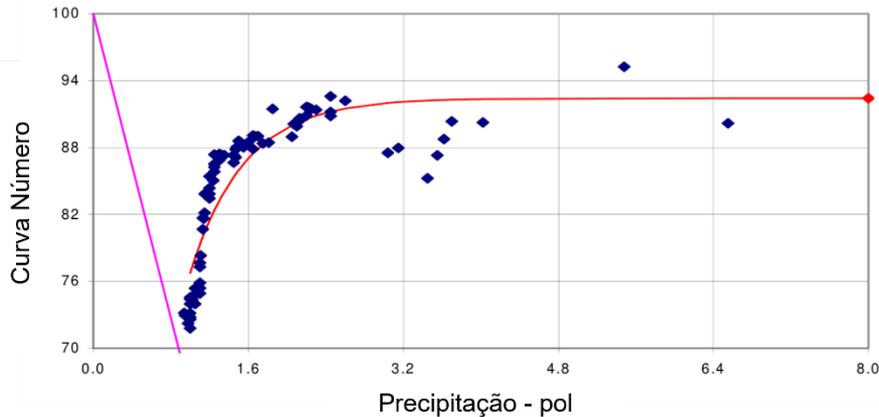


Fonte: Mullem et al. (2002).

Por fim, o comportamento violento (*violent*) em bacias se aproxima do complacente para pequenos eventos de precipitação, contudo, observa-se uma repentina elevação do valor de CN com o aumento da precipitação até que o

parâmetro se estabiliza (Figura 5) (HAWKINS, 1993). Para tais bacias, a determinação do CN para pequenos eventos de precipitação pode subestimar o parâmetro.

Figura 5 - Comportamento violento de CN assintótico.



Fonte: Mullem et al. (2002).

Para a adoção do procedimento de determinação do CN assintótico, recomenda-se a exclusão de pequenos eventos de precipitação e análise de um número significativo eventos, incluindo grandes volumes de precipitação, a fim de identificar o comportamento da bacia (MULLEM *et al.*, 2002).

O método descrito por Hawkins (1993) sugere equações para o ajuste de CN para os comportamentos padrão e violento, sendo esse ajuste representativo para toda a bacia. Contudo a capacidade do ajuste de estima o escoamento superficial para pequenos eventos de chuva é questionável, não sendo confiável para pequenos e médios eventos (ENDALE *et al.*, 2015).

2.4 CRÍTICAS E LIMITAÇÕES DO MÉTODO

Assim como as divergências quanto ao valor da taxa de abstração inicial, diversas críticas e inconsistências do método da CN foram apresentadas por estudos ao longo do tempo. Algumas delas, apontadas por Cunha et al. (2015) e Ponce e Hawkins (1996), são destacadas a seguir:

- a) O método foi desenvolvido a partir de estudos em bacias dos EUA, portanto a extrapolação da sua utilização para outras localidades requer cautela, sendo importante o desenvolvimento de estudos locais;

- b) Em geral, e sobretudo para menores valores de CN e profundidade do escoamento superficial, o método apresenta elevada sensibilidade ao CN e à condição de umidade antecedente, sendo que não há clareza quanto à interferência dessa última na variação do CN;
- c) O método não apresenta resultados tão satisfatórios em bacias florestais quanto em rurais ou urbanas;
- d) O método é mais adequado em locais em que a vazão de base é negligenciável, ou seja, há uma predominância da contribuição do escoamento superficial para a vazão;
- e) Não há indicação explícita de limites de área da bacia para a aplicação do método, contudo, desaconselha-se a sua utilização para bacias com mais de 250 km²;
- f) Apesar do método original recomendar a utilização de uma taxa de abstração inicial igual a 20%, não existe clareza quanto a linearidade da relação entre I_a e S e, em geral estudos indicam que o valor de 5% é mais representativo;
- g) As magnitudes dos tempos de retorno dos eventos usados para o desenvolvimento do método não são conhecidas, portanto não é possível determinar o limite de magnitude para o qual o método é aplicável.

3 METODOLOGIA

3.1 BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO DILÚVIO

Conforme citado anteriormente, os critérios adotados para a seleção da área de estudo foram a disponibilidade de dados hidrológicos, importância da bacia para a região e a frequência de ocorrência de inundações na área (BURIN, 2008; SANTOS, 2019).

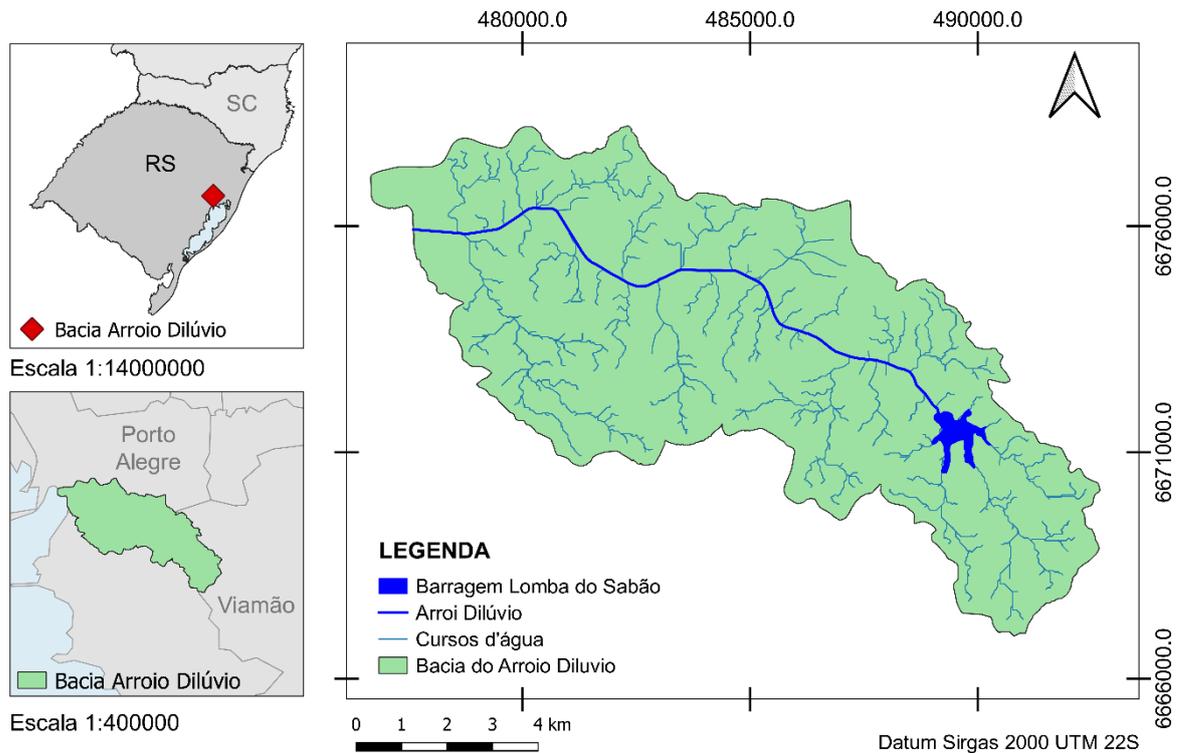
Localizada na Região Metropolitana de Porto Alegre, com uma população de cerca de 4,4 milhões de habitantes (SPGG, 2020), a bacia hidrográfica do Arroio Dilúvio apresenta diversos pontos suscetíveis a inundações (DEP, 2014).

3.1.1 Hidrografia

O Arroio Dilúvio faz parte da bacia hidrográfica do Lago Guaíba (G80), a qual compõe a Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba (SEMA, 2022), e a sua bacia apresenta uma área de drenagem de cerca de 80 km², cuja maior parte – cerca de 80% – está localizada no município de Porto Alegre, e o restante no município de Viamão (SILVEIRA *et al.*, 2012). O corpo hídrico possuiu diversos nomes ao longo da sua história - Rio Jacarey, Arroio Sabão, Arroio da Azenha, Arroio Cascata, “Riacho” -, contudo, ficou conhecido como Arroio Dilúvio devido às recorrentes inundações que ocorriam ao longo de seu talvegue original (MORANDI; FARIA, 2000; SANTOS; ANDRADE; CAMARGO, 2021; SILVA, 2019).

Com uma extensão total de cerca de 18 km, sendo que aproximadamente 10 km são canalizados, o arroio nasce no Parque Nacional Municipal Saint’Hilaire, que possui uma área de Preservação Permanente de 9,5 km² (SMAM, 2022), ultrapassa o limite entre os municípios de Viamão e Porto Alegre, e atravessa esse último no sentido leste-oeste, desaguando no Rio Guaíba conforme apresentado na Figura 6. Próximo à nascente, as águas do arroio se acumulam na Barragem da Lomba do Sabão, que possui uma área inundada de cerca de 0,75 km² (SANTOS, 2019).

Figura 6 - Localização e Hidrografia da Bacia do Arroio Dilúvio.



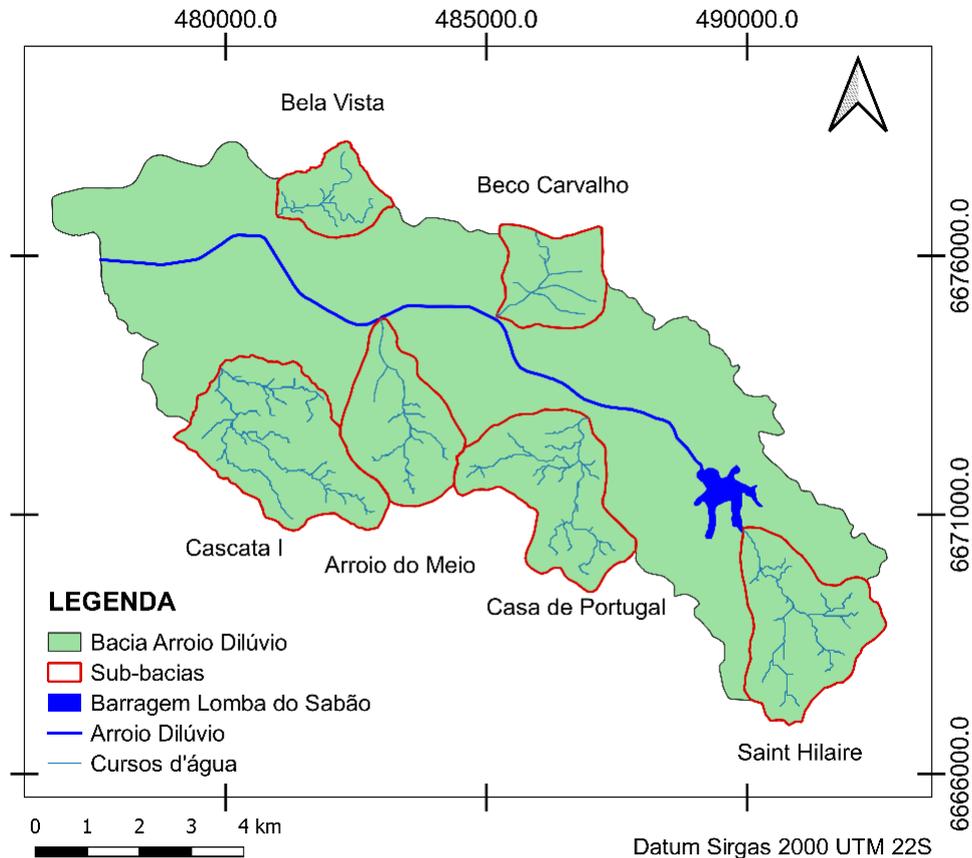
Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma proposta de discretização da Bacia Hidrográfica do Arroio Dilúvio em 28 sub-bacias foi apresentada por Campana (1995), contudo, o autor chama atenção para o fato de que essa proposta foi elaborada considerando a topografia da bacia, portanto, desconsidera a distribuição das águas pluviais na rede de drenagem urbana, o que pode alterar a transferência de vazões. Neste trabalho, no entanto, apenas seis sub-bacias serão objeto de estudo devido à disponibilidade de dados hidrológicos, conforme exposto no item 3.1.6. As sub-bacias apresentadas na Figura 7 são denominadas: Bela Vista, Beco Carvalho, Cascata I, Arroio do Meio, Casa de Portugal e Saint-Hilaire.

Antes da intensificação do processo de antropização da bacia, a região próxima à foz do arroio era formada por campos úmidos alagáveis devido às constantes inundações em tempos de cheias (MORANDI; FARIA, 2000; SANTOS, 2019). A fim de resolver os problemas decorrentes das inundações, foi proposto, através do Plano de Melhoramentos e Orçamentos de 1914, a canalização do arroio com retificação do seu leito em uma porção e aterramento do leito original (MACIEL, 1914). Após

revisões no projeto de canalização - que ocorreram nos anos de 1925, 1930 e 1935 - , em 1939, as obras foram iniciadas.

Figura 7 - Sub-bacias da Bacia do Arroio Dilúvio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do ano de 1938, iniciou-se a idealização do plano de urbanização que resultou na ampliação da canalização, construção da Av. Ipiranga ao longo do canal e urbanização do Bairro Praia de Belas com o aterramento da orla, com obras concluídas em 1974 (BURIN, 2008; SANTOS; ANDRADE; CAMARGO, 2021; SILVA, 2019). A Figura 8 ilustra as alterações no leito do Arroio Dilúvio decorrente das obras de canalização.

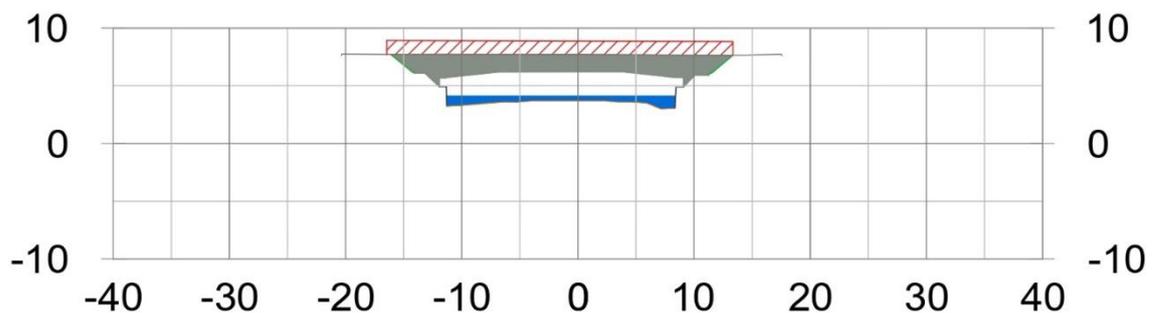
Figura 8 - Comparação entre traçado do Arroio Dilúvio antes da canalização e após conclusão das obras em 1974.



Fonte: Burin (2008).

Atualmente, o arroio é um importante componente do sistema de drenagem urbana de Porto Alegre sendo um dos principais canais de macrodrenagem do município. A sua calha central é revestida lateralmente e, ao longo de seu comprimento, apresenta variações de largura e altura, especialmente nos trechos de intersecção com pontes, onde há redução nas seções de escoamento (CAMPANA; TUCCI, 1999; DEP, 2014). Na Figura 9 é apresentada uma seção representativa do canal do Arroio Dilúvio.

Figura 9 - Seção transversal do canal do Arroio Dilúvio na ponte de intersecção com a Av. Cel. Lucas de Oliveira. Unidade: metros.



Fonte: adaptado de DEP (2014).

As vazões típicas no canal variam de cerca de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ em períodos secos, podendo atingir mais de $17 \text{ m}^3/\text{s}$ em eventos de chuva (BASSO; MOREIRA; PIZZATO, 2011), mas além da contribuição de águas pluviais, há descarga de esgoto doméstico e industrial de forma irregular no arroio. O despejo de efluentes gera o aumento dos

níveis de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e metais pesados no Dilúvio, assim como contribui para o lançamento de sedimentos no leito do arroio. Somados com os originados de erosão e degradação das margens, parte dos sedimentos se depositam no fundo do canal, interferindo no seu regime de escoamento, o que ocasiona a necessidade de dragagens periódicas no arroio. A dragagem realizada entre outubro de 2018 e fevereiro de 2019, por exemplo, retirou cerca de 76.000 m³ de sedimentos do canal (SANTOS, 2019).

A intervenção antrópica também se manifesta na bacia pela ampliação da ocupação irregular de suas margens, o que evidencia a pressão para ocupação das áreas verdes. Esse tipo de ocupação amplia os problemas sanitários do arroio, e amplia a erosão e degradação das margens, além de expor a população a riscos de deslizamento e inundações (SILVA, 2019; SILVEIRA *et al.*, 2012). Conforme destacado por Santos (2019), a degradação do Arroio Dilúvio é consequência de tal intervenção antrópica, com aumento da área impermeabilizada, escassez de vegetação ciliar e poluição. Essa degradação se manifesta, por exemplo, em eventos de alagamentos ainda registrados próximos à foz do arroio (Figura 10) devido a problemas de drenagem do canal (GONZATTO, 2022).

Figura 10 - Alagamento nos entornos do Arroio Dilúvio em 2022.

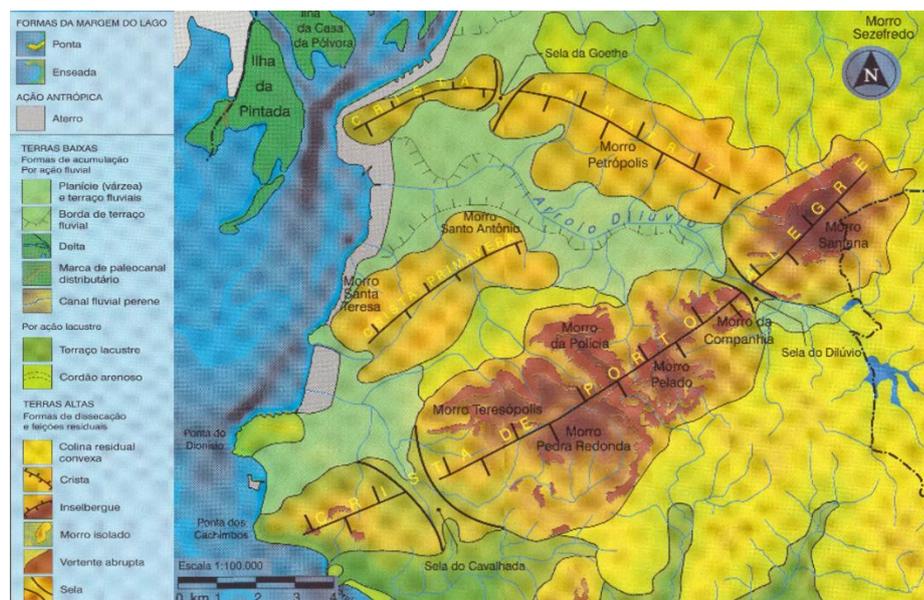


Fonte: Marco Favero, Agência RBS (2022).

3.1.2 Relevo, Geologia e Geomorfologia

A bacia é demarcada a norte e sul por divisores de águas declivosos que ladeiam a planície fluvial e, próximo à sua foz, predominam terras baixas de 4 m – 10 m de altitude (MORANDI; FARIA, 2000; SANTOS, 2019). Os terrenos declivosos fazem parte das formações geomorfológica conhecidas como Crista de Porto Alegre e Crista da Matriz, onde ao norte da bacia se destaca o Morro Santana – principal elevação da região com 311 m de altitude - e, ao sul, os Morros Pelado e da Polícia (290 m), conforme pode ser observado na Figura 11 (MENEGAT *et al.*, 1999; PHILIPP; VARGAS; BENEDETTI, 2009; SANTOS, 2019).

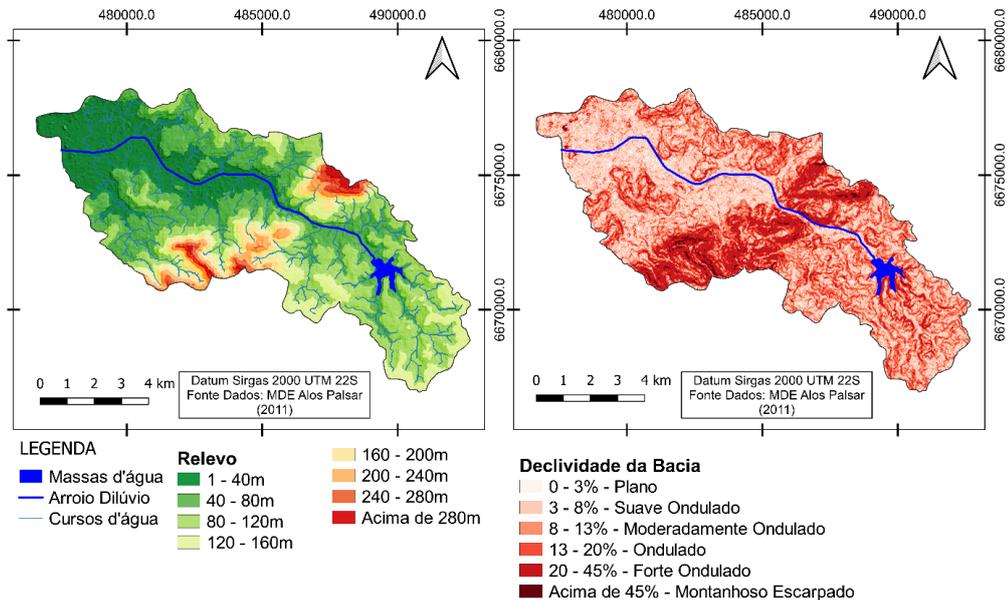
Figura 11 - Formações Geomorfológicas no entorno da bacia do Arroio Dilúvio.



Fonte: Adaptado de Menegat *et al.* (1999).

A declividade média na bacia é de 3,05%, o que caracteriza uma superfície topográfica suavemente ondulada, contudo, conforme apresentado na Figura 12, nas regiões de cadeias de morros, a declividade chega a um valor máximo de 120%, o que caracteriza uma superfície escarpada (EMBRAPA, 1979).

Figura 12 - Mapas de relevo e de declividade da bacia do Arroio Dilúvio.



Fonte: Elaborado pelo autor com dados de modelo digital de elevação do satélite Alos Palsar (2011).

As principais unidades geológicas identificadas na bacia são apresentadas na Tabela 3 e o mapa geológico da bacia é apresentado na Figura 13.

Tabela 3 - Unidades Geológicas identificadas na Bacia do Arroio Dilúvio

(continuação)

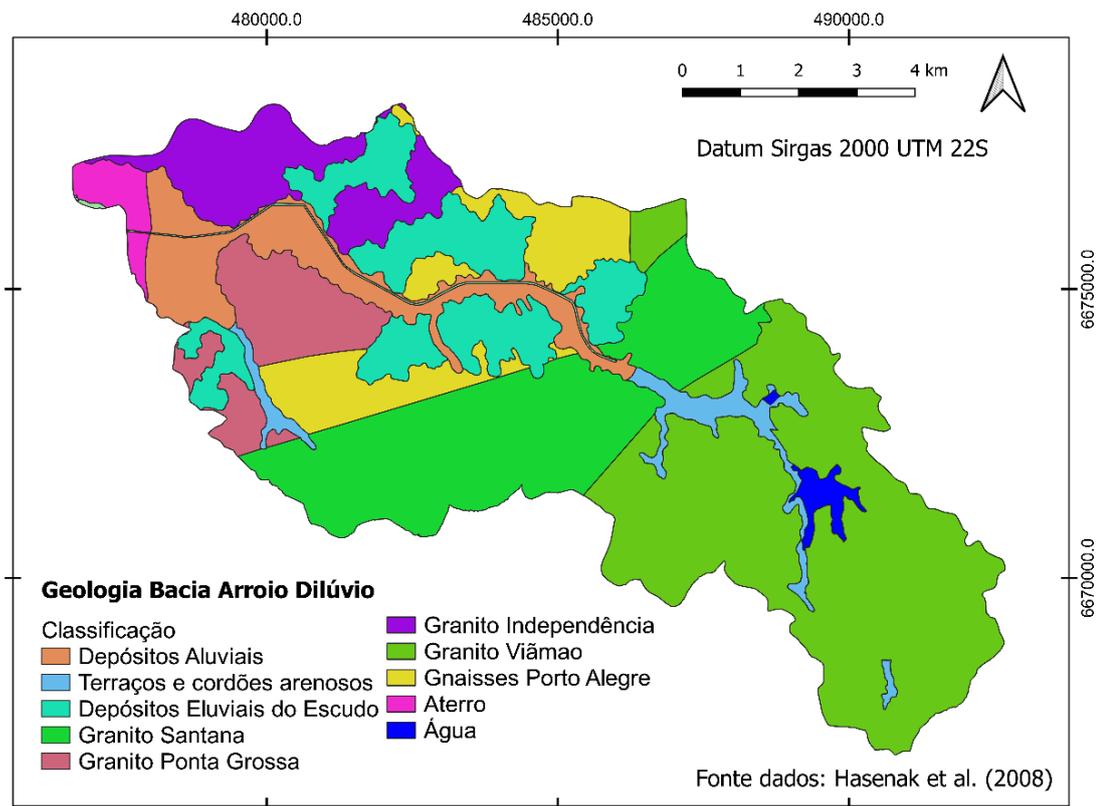
Unidade Geológica	Descrição
Gnaiss de Porto Alegre	Constitui áreas de relevo plano representadas, principalmente, por gnaisses tonalíticos e granodioríticos. Os gnaisses encontram-se alterado, com perfil de alteração com espessura entre 10m e 35m.
Granito Viamão	Apresenta relevo constituído por coxilhas, com afloramentos de migmatitos homogêneos em pequenos campos de matações com forma arredondada com diâmetros de 1m - 6m.
Granito Ponta Grossa	Apresenta relevos de morros e cristas de corpos graníticos com afloramentos de matações com diâmetro entra 4m e 20m, com minerais de quartzo, K-feldspato e plagioclásio. Os solos possuem grau de alteração médio, arenosos e com pequenas espessuras em encostas e topos de morros e até 3m em vales.
Granito Sanatana	Compõe a área elevada da Crista de Porto Alegre (Morro Santana, da Polícia, Pelado, entre outros), sendo um granito ortoclásio-microclinio, com minerais de quartzo e feldspato. Normalmente pouco intemperizado, apresentando um raso litossolo arenoso.
Granito Independência	Constitui a área elevada do Morro Petrópolis com pequenos morros escalonados. Constitui-se de sienogranitos com termos monzograníticos, com minerais de quartzo, K-feldspato e plagioclásio. O solo apresenta profundidade de 2m - 15m.

(conclusão)

Unidade Geológica	Descrição
Terraços e cordões arenosos (S. Laguna - barreira II e III)	Sedimentos areno-argilosos que ocorrem em banhados na forma de aluviões que formam feixes de restinga às margens do Guaíba.
Depósitos aluviais	Depósitos de fluxos de detritos originando sedimentos argilo-conglomeráticos e conglomeráticos, recobertos por mantos coluviais e aluviais de paleossolos ferralíticos.
Depósitos Eluviais do Escudo	Depósitos de areias grossas, médias, finas e conglomerados ortoquartzídicos intercalados com lâminas areno-argilosas nas calhas aluvionares.

Fonte: adaptado de Hasenak *et al.* (2008) e Silva (2019).

Figura 13 - Mapa geológico da bacia do Arroio Dilúvio.



Fonte: adaptado de Hasenak *et al.* (2008).

3.1.3 Pedologia

As variações na geomorfologia da bacia prenunciam a composição dos solos, que variam entre Neossolos Litólicos ou Cambissolos Háplicos nas formações graníticas pouco ou medianamente intemperizadas, Planossolos Hidromórficos e

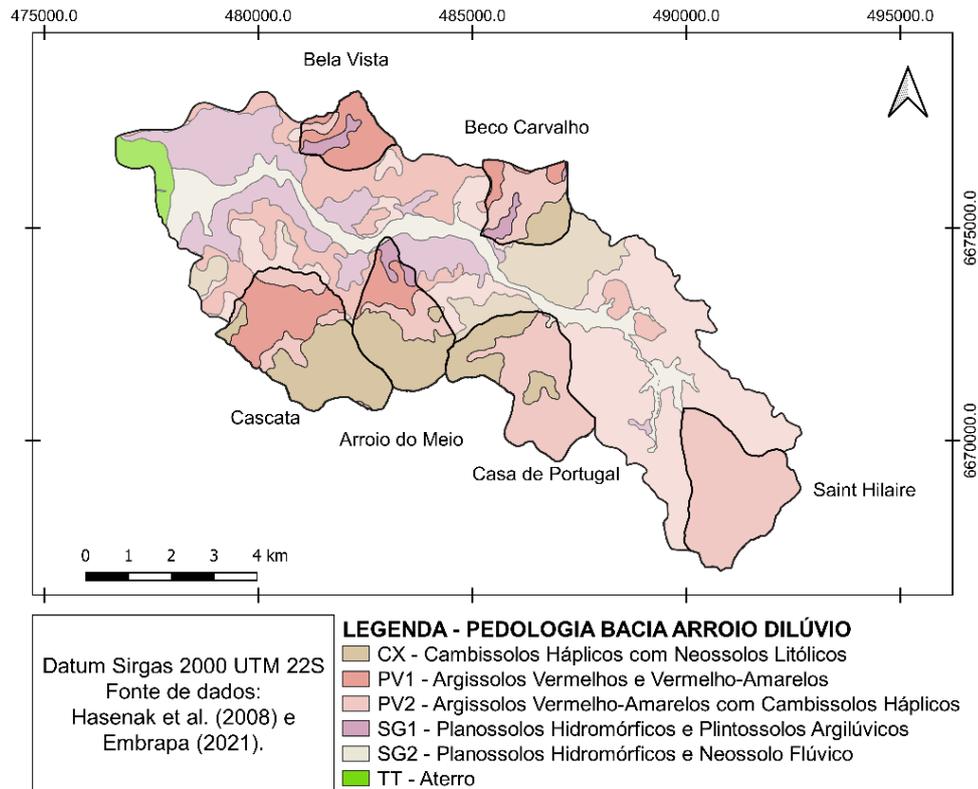
Neossolos Flúvicos na planície fluvial e Argissolos mais profundos nos entornos da Crista de Porto Alegre e Crista da Matriz (EMBRAPA, 2009; HASENAK et al., 2008). As descrições dos tipos de solos característicos da bacia são apresentados na Tabela 4, e o mapa de solos da bacia é apresentado na Figura 14.

Tabela 4 - Tipos de solos identificados na Bacia do Arroio Dilúvio.

Símbolo	Descrição Unidade de Mapeamento	Ocorrência e Características
CX	Cambissolo Háplico e Neossolo Litólico	Encostas e topos de morro com relevo ondulado. Solos rasos (menos de 1m) bem a moderadamente drenados, associado a solos rasos bem drenados.
PV1	Argissolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos	Encostas e topos de elevações em relevo suavemente ondulado e ondulado. Solos profundos (1,5 m ou mais) e bem drenados.
PV2	Argissolos Vermelho-Amarelos e Cambissolo Háplico	Encostas e topos de elevações em relevo ondulado e fortemente ondulado. Solos profundos (1,5 m ou mais) e moderadamente drenados combinados com solos rasos (menos de 1m) bem a moderadamente drenados.
SG1	Planissolo Hidromórfico e Plintossolo Argilúvico	Planícies aluviais e lagunares. Solos imperfeitamente a mal drenados, com retenção da água.
SG2	Planissolo Hidromórfico e Neossolo Flúvico	Áreas marginais ao longo de arroios em relevo plano. Solos profundos com estratificação de sedimentos de diferentes granulometrias, apresentando variações nas suas características físicas.

Fonte: adaptado de Hasenak *et al.* (2008).

Figura 14 - Mapa de solos da bacia do Arroio Dilúvio.

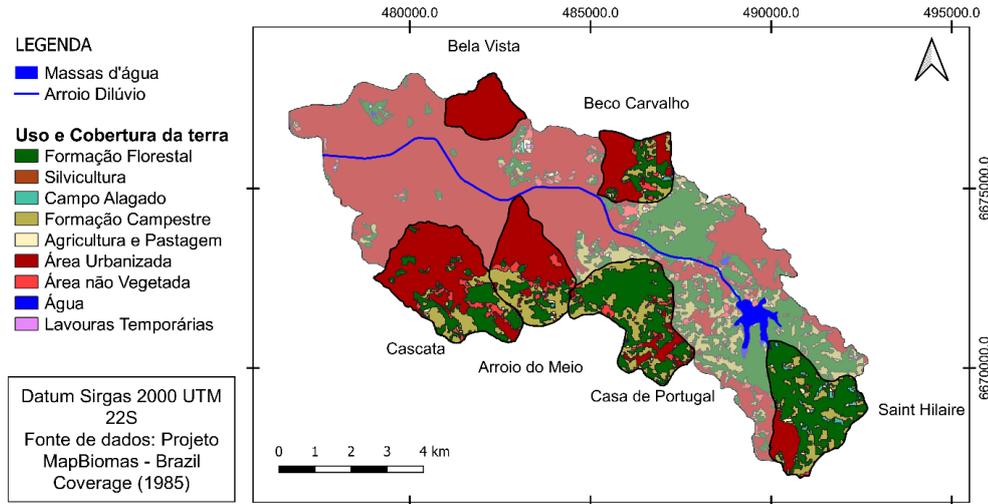


Fonte: adaptado de Hasenak *et al.* (2008).

3.1.4 Uso e Cobertura da terra

Os dados hidrológicos disponíveis para a bacia de estudo, sobretudo os dados de linígrafos, correspondem ao período entre 1978 e 1982, conforme apresentado no item 3.1.6. Por isso, a fim de obter uma classificação de uso e cobertura da terra na bacia em condições similares às observadas no período de obtenção dos dados, os dados de satélite para a classificação apresentada na Figura 15 correspondem ao uso e cobertura da terra no ano de 1985, obtidos a partir da Coleta 7 do projeto MapBiomias (PROJETO MAPBIOMAS, 2022), que é a mais próxima do período de monitoramento. Na Tabela 5 são apresentadas as porcentagens de áreas das sub-bacias correspondentes a cada classificação.

Figura 15 - Mapa de uso e cobertura da terra da bacia do Arroio Dilúvio para o ano de 1985.



Fonte: adaptado de Projeto MapBiomas (2022).

Tabela 5 - Porcentagem de área de Sub-bacias do Arroio Dilúvio correspondentes a cada classificação de uso e ocupação no ano de 1985.

Uso e Cobertura da terra	Porcentagem área correspondente					
	Sub-bacias					
	Bela Vista	Beco Carvalho	Arroio do Meio	Saint-Hilaire	Casa de Portugal	Cascata I
3 Formação Florestal	0.20%	22.82%	13.25%	60.81%	55.68%	20.98%
9 Silvicultura	-	-	-	0.30%	-	-
11 Campo Alagado	-	0.84%	0.19%	4.03%	-	0.10%
12 Formação Campestre	-	16.10%	23.98%	18.90%	28.33%	12.37%
21 Agricultura e Pastagem	-	0.84%	0.79%	1.79%	0.33%	0.53%
24 Área Urbanizada	99.80%	52.51%	53.65%	13.15%	9.48%	59.10%
25 Área não Vegetada	-	6.69%	7.93%	0.85%	5.87%	6.92%
33 Água	-	0.20%	0.02%	0.19%	0.08%	-
41 Lavouras Temporárias	-	-	0.19%	-	0.23%	-
Área Total	2.48 km²	3.45 km²	5.18 km²	6.38 km²	6.59 km²	7.94 km²

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.5 Clima

A região metropolitana de Porto Alegre está localizada em uma região de clima subtropical úmido, dessa forma, o clima na região é marcado por grande variabilidade dos elementos climáticos ao longo do ano (MENEGAT *et al.*, 1999; SILVA, 2019).

Apesar disso, pode-se perceber pelas normais climatológicas (Figura 16) para a estação de código 83967 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada em Porto Alegre – RS, que a cidade possui um regime de precipitação bem distribuído ao longo do ano para o período de 1961 até 1990 (WESCHENFELDER *et al.*, 2019). Ademais, é possível observar que o período entre junho e outubro é o que apresentou a maior média de precipitação mensal para o período.

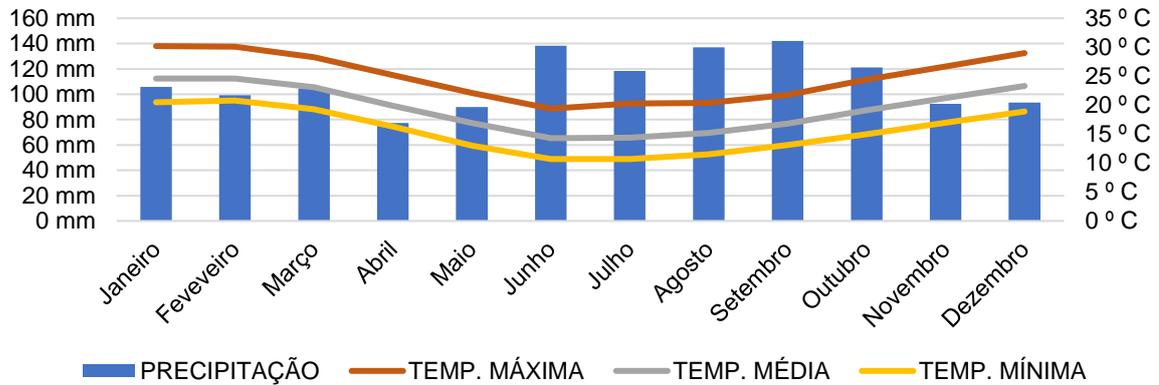
A precipitação anual média registrada no posto 83967 para os anos entre 1961 e 1991 foi de 1494,6 mm, e as precipitações anuais registradas nos anos de 1979 e 1980 – ano de ocorrência dos eventos utilizados neste estudo – foram de 1209,4 mm e 1330,9 mm, respectivamente (INMET, 2022). Portanto não diferem em mais de 20% do comportamento médio anual das precipitações observadas no período.

Os mecanismos formadores das chuvas no município de Porto Alegre podem ser locais ou regionais, sendo que aqueles correspondem principalmente às chuvas convectivas, que costumemente apresentam maior intensidade, menor duração e maior variabilidade espacial (LIMA, 2010; NETTO, 1996; TUCCI, 2005a).

Já os mecanismos regionais estão relacionados à variabilidade pluviométrica sazonal (LIMA, 2010). As massas de ar polares que entram na região, o que ocorre principalmente no inverno, mas são observadas ao longo de todo o ano, se confrontam com massas mais quente e úmidas, ocasionando o fenômeno de frentes frias. Essas frentes ocasionam chuvas duradoras no inverno, e chuvas mais intensas e curtas no verão (LIMA, 2010).

De acordo com Nery, Vargas e Martins (1997) a variabilidade das precipitações no Rio Grande do Sul ao longo dos anos está relacionada ao fenômeno El Niño, sendo que, no período de disponibilidade de dados, os anos em que se identificou precipitações mais intensas foram 1982, 1983 e 1984.

Figura 16 - Normais climatológicas para a estação 83967 do INMET no período de 1961-1991.

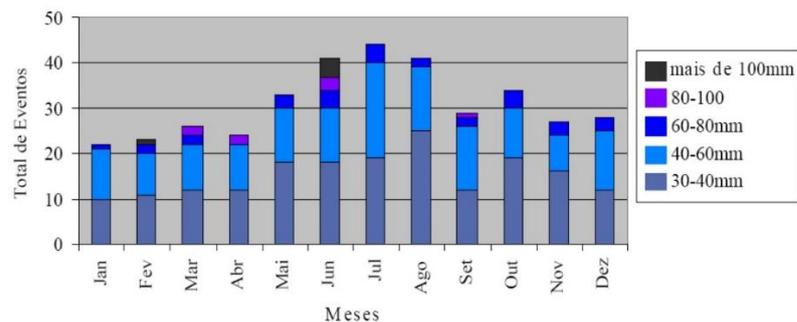


Fonte: INMET (2022).

A distribuição mensal dos principais eventos diários de chuva para o período entre 1970 até 1999 é apresentada na Figura 17, pelo qual pode-se identificar que os eventos de volume acumulado de 30-40mm ocorrem com mais frequência, seguido pelos eventos de 40-60mm (FUJIMOTO, 2002; LIMA, 2010).

Quanto à distribuição espacial da chuva na bacia, Allasia (2002) indicou a existência de variações significativas entre as precipitações geradas por IDF's de postos no município de Porto Alegre - RS com menos de 10km de distância. Em relação a essa variabilidade, Silveira (1997), a partir de estudo sobre os efeitos da urbanização no regime hidrológico da bacia do Arroio Dilúvio, também indicou a existência de diferenças espaciais significativas nas relações IDF e no volume precipitado entre a porção urbana da bacia e a porção rural, com intensidades e volumes ligeiramente superiores na porção urbanizada da bacia.

Figura 17 - Distribuição mensal de eventos de chuva durante os anos de 1970 até 1999.



Fonte: Fujimoto (2002) apud Lima (2010).

O tempo de retorno (TR) dos eventos selecionados é uma característica importante para a análise dos resultados obtidos, podendo ser determinado a partir das equações IDF para a região estudada. No Manual de Drenagem Urbana de Porto Alegre (PMPA; IPH, 2005) são indicadas as relações IDF para os bairros do município, a partir das quais pode-se obter a relação IDF para os bairros compreendidos pelas sub-bacias do arroio Dilúvio.

Os bairros compreendidos por cada uma das sub-bacias, bem como a relação IDF indicada, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Relações IDF recomendadas para as sub-bacias do Arroio Dilúvio.

Sub-bacias	Bairros	Relação IDF indicada
Bela Vista	Bela Vista e Petrópolis	
Beco Carvalho	Jardim Carvalho	$i = \frac{1297,9T^{0,171}}{(t + 11,6)^{0,85}}$
Arroio do Meio	Cascata, Cel. Aparício Borges, Vila João Pessoa e São José	8º Distrito
Cascata-I	Cascata, Glória, Teresópolis e Partenon	
Saint Hilaire	Lomba do Pinheiro	$i = \frac{509,859T^{0,196}}{(t + 10)^{0,72}}$
Casa Portugal	Lomba do Pinheiro e Agronomia	IPH

Sendo i a intensidade da precipitação em mm/h; T o tempo de retorno em anos e t a duração do evento em minutos.

Fonte: adaptado do Manual de Drenagem Urbana de Porto Alegre (PMSM; IPH, 2005)

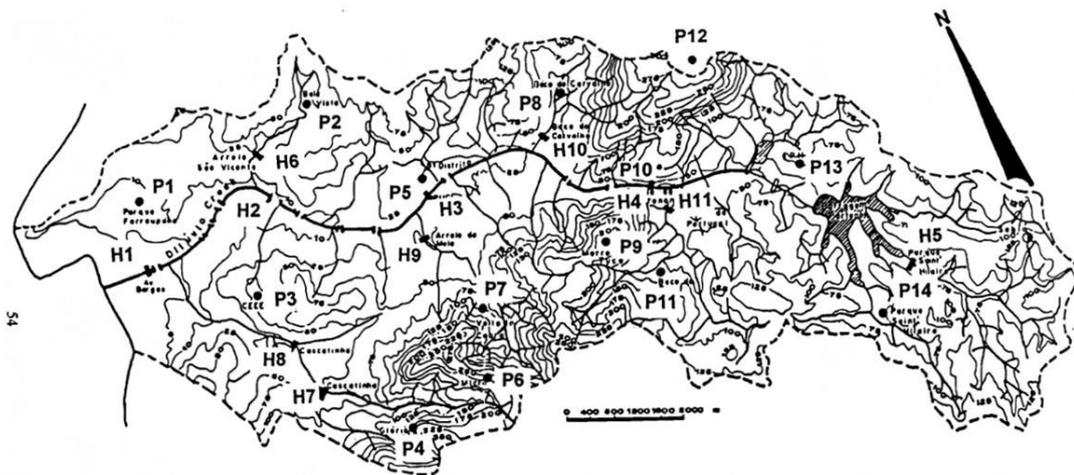
3.1.6 Dados Hidrológicos

Os dados de linígrafos, pluviógrafos e pluviômetros para esta bacia são oriundos, em maior parte, de estudo iniciado em 1978 no contexto do Projeto Dilúvio (ALVAREZ; SANCHEZ, 1979; LOPES; SANCHEZ, 1986). Os dados de precipitação e vazão encontram-se disponíveis no Banco de Eventos de Cheias de Bacias Urbanas Brasileiras – BECBUB (TUCCI; VILLANUEVA; CRUZ, 1998), e foram obtidos através do monitoramento da bacia com 11 linígrafos (Tabela 7) e 14 pluviógrafos (Tabela 8). Nas Tabelas 7 e 8, as estações destacadas correspondem aos postos de

monitoramento dos dados utilizados neste estudo. As localizações das estações de monitoramento são indicadas por Silveira (1996) conforme Figura 18.

Os dados do estudo foram obtidos a partir de estações automáticas e o tempo de registro é de 30 min.

Figura 18 - Localização de Postos Pluviográficos e Linígrafos na bacia do Arroio Dilúvio. P: pluviógrafos; H: linígrafos.



Fonte: Silveira (1996).

Tabela 7 - Lista de Linígrafos de dados para a bacia do Arroio Dilúvio.

Linígrafo	Arroio	Nome Posto	Área (km ²)	Monitoramento
H1	Dilúvio	Av. Borges	80,9	jan 1978 - mai 1980
H2	Dilúvio	Ipiranga (CPRM)	57,00	Desde 1972
H3	Dilúvio	PUC	50,4	jan 1978 - dez 1981
H4	Dilúvio	Agronomia	31,5	jan 1978 - nov 1983
H5	Dilúvio	Saint-Hilaire	5,9	mai 1978 - sei1982
H6	São Vicente	Bela Vista	2,6	jan 1978 - fev1984
H7	Cascata	Cascata I	4,2	lev 1978 - jun 1980
H8	Cascata	Cascata II	7,6	mar 1978 - mar 1981
H9	Moinho	PUC Moinho	4,7	jan 1978 - abr 1980
H10	Beco do Carvalho	Beco do Carvalho	3,4	abr 1978 - nov 1979
H11	Agronomia	Casa de Portugal	6,5	dez 1977 - nov 1979

Fonte: Silveira (1996) *apud* Ferreira (2019).

Tabela 8 - Lista de Pluviógrafos de dados para a bacia do Arroio Dilúvio.

Pluviógrafo	Nome Posto	Monitoramento
P1	Redenção	set 1977 - set 1982
P2	Bela Vista	dez 1977 - dez 1983
P3	Cepa-3	out 1977 - set 1982
P4	Glória	mai 1978 -mar 1982
P5	8º Distrito	Desde ago 74
P6	Microondas	mai 1978 - nov 1982
P7	Volta da Cobra	dez 1977 - set 1982
P8	Beco Carvalho	dez 1978 - nov 1981
P9	Morro da Tuca	fev 1978 - fev 1984
P10	Agronomia	jun 1979 - out 1982
P11	Beco David	set 1977 - fev 1984
P12	Morro Santana	abr 1979 - set 1981
P13	IPH-DEPRC	1964 - 1983
P14	Saint Hilaire	dez 1977 - out 1983

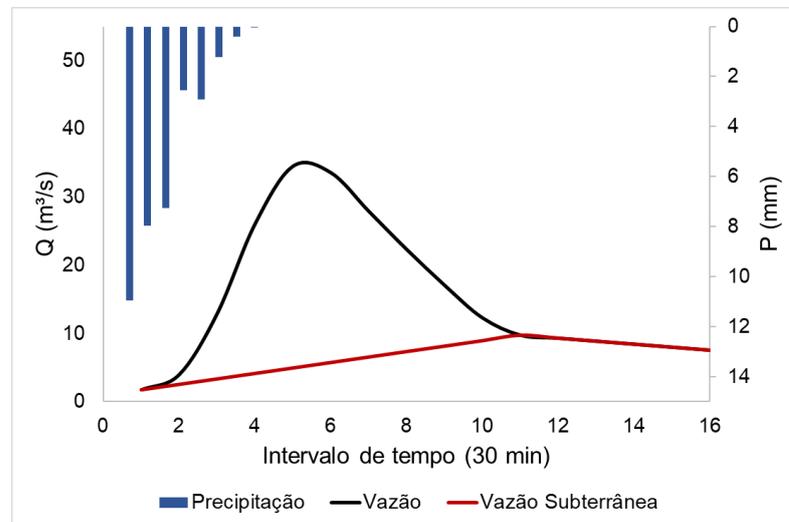
Fonte: Silveira (1996) *apud* Ferreira (2019).

3.2 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MÉTODO DA CURVA-NÚMERO DO NRCS

Fazem parte dos objetivos deste trabalho a determinação dos parâmetros da taxa de abstração inicial (λ) e do CN a partir de dados observados, e a sua comparação com os valores de CN obtidos para λ de 20% e 5%. Para tanto, conforme apresentado no item 2.1.2, é necessária a determinação do volume de escoamento superficial direto para cada evento expressa em mm.

O escoamento superficial foi obtido a partir da separação do escoamento de base pelo método gráfico da declividade constante conforme descrito no item 2.1.2, e exemplificado na Figura 19.

Figura 19 - Exemplo de hidrograma de evento observado com separação do escoamento pelo método da declividade contínua.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o presente trabalho foram selecionados seis eventos para cada uma das seis sub-bacias do Arroio Dilúvio, obtidos do Banco de Eventos de Cheias de Bacias Urbanas Brasileiras – BECBUB. Convêm ressaltar três considerações feitas durante a seleção de eventos para este estudo:

- a) Foram desconsiderados eventos complexos com hidrogramas que apresentam mais de um pico com magnitudes similares, pois eventos complexos demandam a adequação dos parâmetros de separação do escoamento às características e hidrologia da bacia para descrever o fenômeno com maior acurácia (NEJADHASHEMI *et al.*, 2009);
- b) Também foram desconsiderados os eventos em que a precipitação acumulada (P) fosse igual à abstração inicial, pois, uma vez que o escoamento superficial direto (Q) seria nulo, a determinação do parâmetro CN não seria possível (MULLEM *et al.*, 2002);
- c) Por fim, foram desconsiderados eventos em que, no período de duração disponível no banco de dados, não fosse possível a identificação clara dos pontos de início do hidrograma e do ponto de inflexão na recessão, o que dificultaria a aplicação do método de separação do escoamento descrito anteriormente.

Após a análise quanto aos critérios de exclusão, foram selecionados os seis eventos restantes para cada sub-bacia que apresentavam maior volume total de precipitação, tendo em vista que os valores da taxa de abstração inicial, assim como os valores de CN, podem ser tendenciados para pequenos eventos (JIANG, 2001; SOULIS; VALIANTZAS, 2012; WOODWARD *et al.*, 2003). Dos eventos selecionados,

três foram utilizados para a calibração dos parâmetros, e os demais foram utilizados para a avaliação de performance.

3.2.1 Parâmetro CN para λ de 20% e 5%

Uma vez determinados os dados do escoamento superficial direto (Q) e da precipitação acumulada observada durante o evento (P), o potencial máximo de retenção para a taxa de abstração de 20% pode ser calculado pela equação 6, utilizando a ferramenta *Solver* do *Software Microsoft Excel* para calcular iterativamente o valor de S para que o valor do escoamento superficial calculado se aproxime ao máximo do valor observado. Obtido o valor do potencial máximo de retenção (S), o parâmetro CN para a taxa de abstração inicial de 20% pode ser calculado pela equação 7.

Já para o cálculo do parâmetro CN para a taxa de abstração inicial de 5%, adota-se o mesmo método, contudo, para a obtenção do potencial máximo de retenção utiliza-se a equação 14:

$$Q = (P - 0,05S)^2 / (P + 0,95S) \quad (14)$$

Sendo P a precipitação total (mm); Q o escoamento superficial (mm), e S o potencial máximo de retenção (mm).

Cabe ressaltar que a precipitação antecedente acumulada em 5 dias foi determinada a partir do posto pluviométrico do 8º Distrito, os eventos foram classificados de acordo com a Tabela 2 e os valores de CN ajustado conforme equações 8 e 9.

3.2.2 Parâmetro CN e λ a partir de dados observados

A definição da taxa de abstração inicial a partir dos dados hidrológicos monitorados ocorreu a partir dos dois diferentes métodos apresentados no item 2.2 e recomendados por Woodward *et al.* (2003): a Análise do Evento, e a o Ajuste do Modelo.

No método da análise do evento, a abstração inicial (I_a) corresponde ao volume de precipitação anterior ao início do escoamento superficial (em mm). Esse valor é

substituído na equação 4 para a obtenção de S, e λ é calculado para cada evento conforme a equação 5.

Já para o método de ajuste do modelo, determinados os valores do escoamento superficial direto do evento (Q) e da precipitação acumulada (P), os valores de λ e S são calculados, para cada evento, iterativamente para que o somatório do quadrado dos resíduos da diferença do escoamento superficial direto observado (Q) e do resultado da equação 12 se aproxime de zero, conforme equação 13. Esse cálculo iterativo foi realizado com a utilização da ferramenta *Solver* do *Software Microsoft Excel*.

Cabe ressaltar que, após a realização do cálculo iterativo, os valores do potencial máximo de retenção (S) foram ajustados à condição unidade antecedente II (AMC). Para isso, são utilizadas as equações 15 e 16 recomendadas por Hawkins et al. (2009).

$$S(I) = 2,281 * S(II) \quad (15)$$

$$S(III) = 0,427 * S(II) \quad (16)$$

Sendo S(I) o potencial máximo de retenção para a condição de AMC I (mm); S(II) o potencial máximo de retenção para a condição de AMC II (mm); S(III) o potencial máximo de retenção para a condição de AMC III (mm).

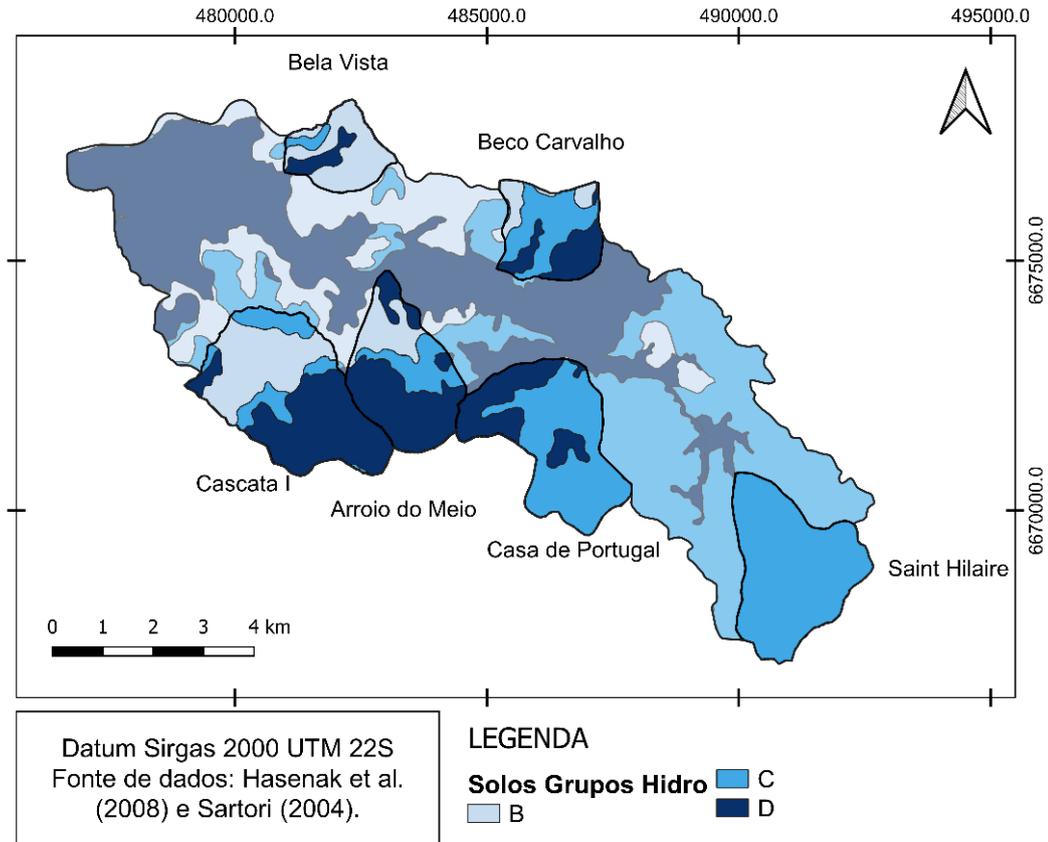
As equações 15 e 16 também podem ser utilizadas para converter os valores do potencial máximo de retenção para a condição de AMC I e III, assim o CN(I) e CN(III) pode ser obtido diretamente através da equação 7.

3.2.3 Determinação do parâmetro CN conforme tabelas do NRCS

Os valores de CN determinados para os eventos também serão comparados com o valor do parâmetro determinado a partir de valores tabelados dos grupos hidrológicos do solo e uso e cobertura da terra conforme apresentado no item 2.1.1.

Para a determinação da classificação dos solos nos grupos hidrológicos, foram observadas as recomendações apresentadas por Sartori (2004) para a classificação hidrológica de solos brasileiros (ANEXO A). A Tabela 9 mostra a classificação hidrológica dos solos da bacia adotados para o estudo e, na Figura 20, é apresentado o mapa de classificação hidrológicos dos solos da bacia.

Figura 20 - Mapa de Classificação Hidrológico de Solos da Bacia do Arroio Dilúvio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a sugestão de Sartori (2004), as Associações de Cambissolo Háplico e Neossolo Litólico, Planissolo Hidromórfico e Plintossolo Argilúvico, e Planissolo Hidromórfico e Neossolo Flúvico foram categorizadas como pertencentes ao Grupo Hidrológico D de solos que possuem alto potencial de escoamento. Por sua vez, a Associação de Argissolos Vermelho-Amarelos e Cambissolo Háplico foram categorizadas como pertencentes ao Grupo Hidrológico C, de baixa taxa de infiltração. Por fim, a Associação de Argissolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos, por serem solos profundos e que podem apresentar proporção significativa de fração grosseira (quartzo), foram categorizadas como Grupo Hidrológico B (HASENAK *et al.*, 2008).

Tabela 9 - Classificação Hidrológica dos solos na Bacia do Arroio Dilúvio.

TIPO SOLO	GRUPO HIDROLÓGICO
CX	D
PV1	B
PV2	C
SG1	D
SG2	D

Fonte: Adaptado de Sartori (2004).

Já para a definição do parâmetro CN de acordo com os diferentes usos e coberturas da terra, adotou-se as recomendações da TR-55 (USDA, 1986). Com base nisso, na Tabela 10 são apresentados os valores de CN para os diferentes grupos hidrológicos do solo e Uso e Cobertura da Terra da bacia. Dessa forma, o CN médio de cada sub-bacia foi definido através da média ponderada pela área dos valores de CN para cada associação de grupo hidrológico de solo e uso e cobertura da terra conforme valores da Tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetro CN para diferentes grupos hidrológicos de solo e Uso e Cobertura da Terra.

CLASSES USO E COBERTURA		GRUPOS HIDROLÓGICOS DO SOLO			
CLASSE	USO	A	B	C	D
3	Formação Florestal	36	60	70	76
9	Silvicultura	46	68	78	84
11	Campo Alagado	47	67	81	88
12	Formação Campestre	36	60	73	79
21	Agricultura e Pastagem	49	69	79	84
24	Área Urbanizada	89	92	94	95
25	Áreas não Vegetadas	68	79	86	89
33	Água	100	100	100	100
41	Lavouras Temporárias	64	76	84	88

Fonte: Adaptado de USDA (1986).

3.3 ANÁLISE DE PERFORMANCE DO MODELO

A fim de possibilitar análise da adequação dos diferentes métodos de determinação dos parâmetros CN e λ para a determinação da lâmina de escoamento superficial para bacia estudada, foram utilizadas duas técnicas estatísticas de erro: o

Percent bias (PBIAS) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) por serem estatísticas comumente utilizadas para avaliação de modelos (MORIASI *et al.*, 2007).

3.3.1 *Percent bias* (PBIAS)

Conforme indicado por Gupta, Sorooshian e Yapo (1999), o PBIAS é uma estatística que indica a tendência média do modelo em superestimar ou subestimar o escoamento superficial simulado. A estatística foi adotada por possibilitar a identificação clara de uma performance inadequada dos modelos e a análise de padrões para as metodologias adotadas (GUPTA; SOROOSHIAN; YAPO, 1999; MORIASI *et al.*, 2007).

A estatística é calculada de acordo com a Equação 17:

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - Qsim_i)}{\sum_{i=1}^n (Qobs_i)} \right] * 100 \quad (17)$$

Sendo Qobs o valor do escoamento superficial observado e Qsim o valor do escoamento superficial simulado.

O Valor de PBIAS é expresso em porcentagem, e o zero é o valor ótimo para a estatística, enquanto valores positivos indicam subestimativa do escoamento, e valores negativos, a superestimativa.

Apesar de não indicar limites do valor de PBIAS para a estimativa do escoamento superficial, Moriasi *et al.* (2007) indica os limites de $\pm 25\%$ para valores satisfatórios na simulação de vazões, e tais limites podem ser adotados como referência.

3.3.2 Raiz do erro quadrático médio (RMSE)

O *Root Mean Square Error*, ou raiz do erro quadrático médio, é uma estatística comumente utilizada na avaliação de modelos, e avalia a precisão do modelo na estimativa do escoamento superficial gerado, e se destaca por apresentar resultados na mesma unidade do fenômeno simulado (MORIASI *et al.*, 2007).

A estatística é calculada de acordo com a Equação 18:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - Qsim_i)^2}{n}} \quad (18)$$

Sendo Q_{obs} o valor do escoamento superficial observado e Q_{sim} o valor do escoamento superficial simulado.

Como o valor de RMSE depende da magnitude dos eventos analisados, não existe a indicação de uma faixa de valores aceitáveis, contudo, Singh et al. (2005) indica que valores inferiores à metade do desvio padrão dos dados medidos podem ser considerados baixos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 EVENTOS SELECIONADOS

Os dezoito eventos – três eventos para cada uma das seis sub-bacias – selecionados conforme os critérios descritos no item 3.2 para o ajuste da taxa de abstração inicial (λ) e o parâmetro CN para as sub-bacias do Arroio Dilúvio são apresentados na Tabela 11, assim como os respectivos valores da precipitação (P), da lâmina de escoamento superficial observado (Q), a partir da separação do escoamento, da condição de umidade antecedente (AMC) e do TR da precipitação máxima no intervalo de tempo de coleta dos dados de 30 minutos (TR). Os hidrogramas observados para cada evento são apresentados no APÊNDICE A.

Tabela 11 - Eventos selecionados para calibração dos parâmetros do Método CN.

Sub-bacia	Data do Evento	P (mm)	Q (mm)	AMC	Duração evento (min)	TR 30 min mais intensos (anos)
Bela Vista	18/10/1980	17.50	6.27	I	150	0.00
	28/05/1980	28.57	15.81	I	300	0.04
	08/07/1980	23.02	4.50	I	420	0.00
Beco Carvalho	20/07/1979	54.52	4.83	I	570	0.00
	21/05/1979	44.07	6.32	III	720	0.00
	18/05/1979	33.51	1.37	I	570	0.00
Arroio do Meio	20/07/1979	61.43	23.17	I	570	0.00
	22/10/1979	26.81	3.93	I	390	0.00
	09/05/1979	32.91	6.73	I	540	0.00
Saint-Hilaire	18/05/1979	32.82	0.52	I	570	0.00
	12/04/1980	78.00	1.10	I	600	2.26
	03/08/1979	28.44	0.59	I	390	0.01
Casa Portugal	09/05/1979	47.53	4.80	I	540	0.03
	24/09/1979	53.03	8.53	I	300	0.89
	18/05/1979	35.02	3.77	I	570	0.00
Cascata-I	09/05/1979	32.33	2.07	I	540	0.00
	12/12/1979	52.84	4.77	II	150	16.65
	25/09/1979	39.60	3.28	I	240	0.01

Fonte: elaborado pelo autor a partir de dados do BECBUB (TUCCI; VILLANUEVA; CRUZ, 1998).

Apesar de não terem sido considerados eventos com precipitação inferior a 15 mm, tendo em vista que a determinação do CN para pequenos eventos tendencia o valor do parâmetro (MULLEM *et al.*, 2002; SOULIS; VALIANTZAS, 2012), pode-se observar na Tabela 11 que o tempo de retorno dos 30 minutos mais intensos dos eventos selecionados são, em maioria, inferiores a um ano. Portanto os resultados obtidos para a calibração dos parâmetros dependem de estudos futuros com um número maior de eventos, e que apresentem maiores tempos de retorno, para serem considerados conclusivos.

4.2 VALORES DA TAXA DE ABSTRAÇÃO INICIAL OBTIDOS A PARTIR DE DADOS OBSERVADOS

4.2.1 Obtenção de λ a partir da análise dos eventos

Os resultados obtidos de acordo com a análise dos eventos (Tabela 12), indicam uma grande variação dos valores de λ para algumas sub-bacias, sobretudo aquelas com menores áreas de drenagem e com mais de 50% de área urbanizada – Bela Vista, Beco Carvalho e Arroio do Meio. Para essas sub-bacias também foram observados os três eventos com maiores valores de λ , sendo os únicos que superaram o valor de 0,2, inicialmente recomendado pelo método CN (HAWKINS *et al.*, 2009; USDA; NRCS, 2004).

Por outro lado, as sub-bacias Cascata-I e Saint-Hilaire apresentaram menor dispersão de resultados, assim como menores valores para a taxa de abstração inicial, conforme evidenciado na Figura 21. Destacam-se valores que se aproximam de zero, o que também já foi observado em outros trabalhos para a bacia do Arroio Dilúvio (COSTA, 2017; FERREIRA, 2019; VEECK, 2018) e para diferentes bacias brasileiras (ALVES, 2016; BERTOTTO *et al.*, 2021; VALLE JUNIOR; RODRIGUES; OLIVEIRA, 2019).

Cabe ressaltar que para as bacias Bela Vista, Beco Carvalho, Arroio do Meio e Casa de Portugal, um evento apresentou um valor de λ que se destacou como superior aos demais. Para as bacias Bela Vista, Beco Carvalho e Casa de Portugal, tais eventos também foram os que apresentaram maior tempo de retorno para os 30 minutos de maior precipitação, o que não ocorre para a bacia Arroio do Meio. A fim de

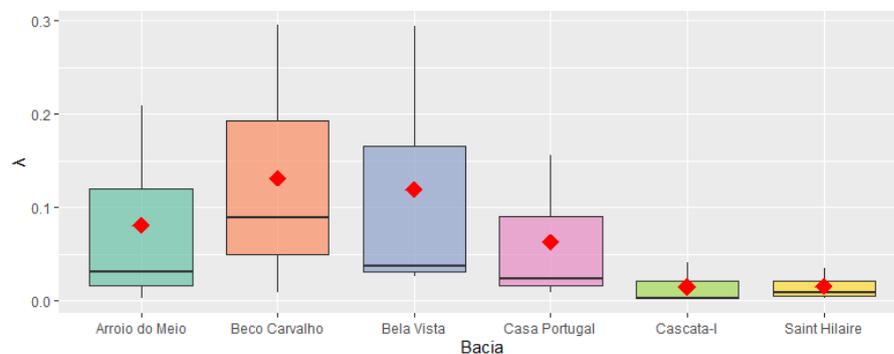
identificar se essa é uma resposta característica das bacias a precipitações mais intensos, é necessária a análise de um número maior de eventos com TR superiores.

Tabela 12 - Taxa de abstração inicial (λ) para o método de análise do evento.

Sub-bacia	Evento	P (mm)	Q (mm)	TR 30 min mais intensos (anos)	Ia (mm)	S (mm)	λ
Bela Vista	18/10/1980	17.50	6.27	0.004	1.00	26.94	0.037
	28/05/1980	28.57	15.81	0.044	4.01	13.60	0.295
	08/07/1980	23.02	4.50	0.000	2.00	77.25	0.026
Beco Carvalho	20/07/1979	54.52	4.83	0.000	19.50	218.94	0.089
	21/05/1979	44.07	6.32	0.003	20.01	67.60	0.296
	18/05/1979	33.51	1.37	0.000	5.01	563.03	0.009
Arroio do Meio	20/07/1979	61.43	23.17	0.000	2.81	89.71	0.031
	22/10/1979	26.81	3.93	0.000	10.60	50.70	0.209
	09/05/1979	32.91	6.73	0.000	0.26	125.77	0.002
Saint-Hilaire	18/05/1979	32.82	0.52	0.001	3.62	1600.29	0.002
	12/04/1980	78.00	1.10	2.257	22.80	2708.99	0.008
	03/08/1979	28.44	0.59	0.007	13.22	378.80	0.035
Casa Portugal	09/05/1979	47.53	4.80	0.030	3.00	368.35	0.008
	24/09/1979	53.03	8.53	0.890	17.50	112.52	0.156
	18/05/1979	35.02	3.77	0.001	5.01	209.08	0.024
Cascata-I	09/05/1979	32.33	2.07	0.001	1.16	438.19	0.003
	12/12/1979	52.84	4.77	16.647	0.64	519.31	0.001
	25/09/1979	39.60	3.28	0.010	9.80	241.09	0.041

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 – Resumo da taxa de abstração inicial (λ) estimada nas bacias com o método da análise do evento.



Fonte: Elaborado pelo autor através do *software* RStudio (RSTUDIO TEAM, 2020).

De maneira geral, 83,33% dos eventos analisados para as seis sub-bacias apresentaram uma taxa de abstração inicial inferior a 0,2, porém, 72,22% dos eventos também apresentaram valores inferiores a 0,05, e a mediana observada para os dezoito eventos foi de 0,029. Esses resultados se assemelham aos encontrados por Alves (2016), Assaye et al. (2021), Ferreira (2019) e Woodward et al. (2003), que também identificaram valores de mediana inferiores a 0,05, conforme apresentado na Tabela 15. Embora os valores medianos encontrados por Bertotto et al. (2021) e Elhakeen e Papanicolaou (2009) se aproximam mais de 0,2, os próprios autores chamam atenção para a inexistência de uma proporcionalidade linear entre I_a e S , especialmente para eventos de precipitação inferiores a 150 mm, ou com duração inferior a 24 horas (BERTOTTO *et al.*, 2021).

Apesar da quantidade limitada de eventos (apenas três para cada sub-bacia) não permitir uma análise conclusiva acerca da relação entre S e a abstração inicial para os dados apresentados, procedeu-se a análise de correlação a fim de identificar possíveis indicações do comportamento dos parâmetros para a bacia estudada.

Através do teste de Shapiro-Wilk, recomendado para a verificação da aderência de dados à distribuição normal (LEOTTI; COSTER; RIBOLDI, 2012), observou-se que não é possível afirmar que os valores da abstração inicial (I_a) dos eventos analisados para a bacia do Arroio Dilúvio seguem uma distribuição normal. Portanto, a fim de estudar a existência de correção entre os valores de I_a e o potencial máximo de retenção (S), a precipitação (P) e a vazão observada (Q_{obs}), recorreu-se ao teste não-paramétrico de correlação de Kendall, para o qual a correlação é dada pelo valor de Tau (τ). Os resultados do teste são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Correlação de Kendall para a abstração inicial e outros parâmetros dos eventos.

		S(mm)	P(mm)	Qobs(mm)
I_a (mm)	Tau (τ)	0.0524	0.2754	-0.1443
	p-valor	0.7617	0.1114	0.4043

Fonte: Elaborado pelo autor através do *software* RStudio (RSTUDIO TEAM, 2020).

Verifica-se que, para os eventos analisados, não foram identificadas correlações significativas entre a abstração inicial e os demais parâmetros hidrológicos.

Considerando que a abstração inicial (I_a) pelo método da análise do evento é determinada pela precipitação que antecede a ascensão do hidrograma (item 2.2), essa medida é influenciada pela resolução temporal dos dados coletados. Para bacias com resposta rápida, como a sub-bacia Bela Vista, Tucci, Villanueva e Cruz (1998) ressaltam que a resolução de 30 min dos eventos disponíveis no Banco de Eventos de Cheias de Bacias Urbanas Brasileiras (BECBUB), utilizados para a análise em questão, pode não ser suficiente para descrever a variação de descarga, o que é um dos fatores que implicam em incertezas na análise de I_a . Outras incertezas associadas às análises deste trabalho são discutidas no item 4.5.

4.2.2 Obtenção de λ a partir do método do Ajuste do Modelo

Para o método de ajuste do modelo, determinou-se o par de valores de λ e S que resultaram na menor soma do quadrado dos resíduos para cada um dos três eventos de cada bacia na simulação do volume escoado superficialmente (Q_{sim}). Cabe ressaltar que, como existiam eventos com diferentes condições de umidade antecedente (AMC) para uma mesma sub-bacia, o valor do par calibrado corresponde ao potencial máximo de retenção para AMC II, porém, no cálculo de Q_{sim} para cada evento, o valor de S foi convertido a partir das Equações 15 e 16 para a condição de umidade antecedente indicada na Tabela 12.

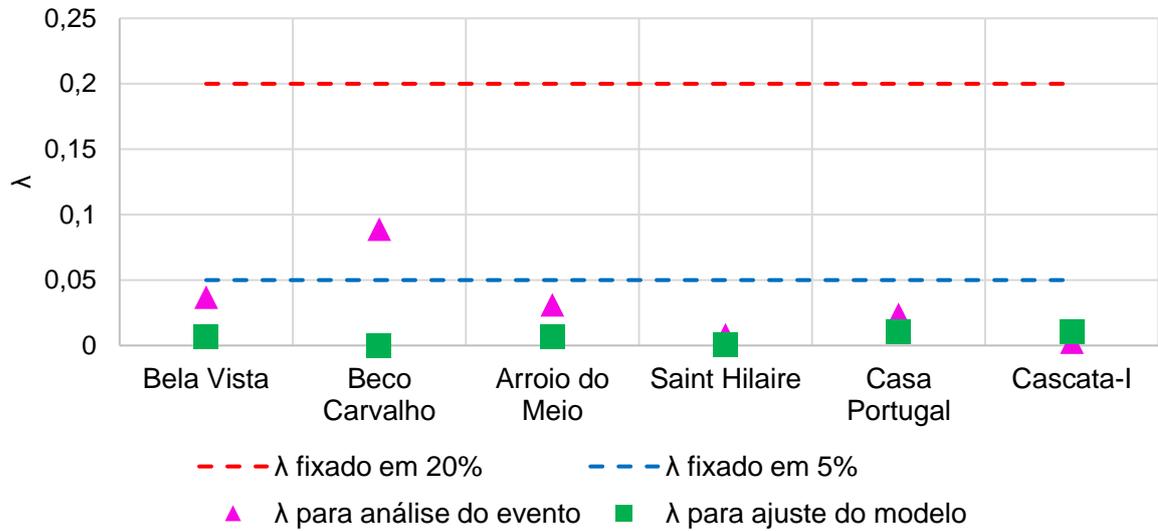
Na Tabela 14 são apresentados os resultados para valores de λ , que, em geral, apresentam medianas e médias inferiores às obtidas pelo método da análise dos eventos (Figura 22). A exceção é a sub-bacia Cascata-I, a que possui maior área.

Tabela 14 - Taxa de abstração inicial (λ) para o método do ajuste do modelo.

Sub-bacia	Eventos	P (mm)	Q (mm)	TR 30 min mais intensos (anos)	λ	λ Médio	λ Mediano
Bela Vista	18/10/1980	17.50	6.27	0.004	0.007	0.005	0.007
	28/05/1980	28.57	15.81	0.044	0.008		
	08/07/1980	23.02	4.50	0.000	0.000		
Beco Carvalho	20/07/1979	54.52	4.83	0.000	0.011	0.004	0.000
	21/05/1979	44.07	6.32	0.003	0.000		
	18/05/1979	33.51	1.37	0.000	0.000		
Arroio do Meio	20/07/1979	61.43	23.17	0.000	0.000	0.005	0.007
	22/10/1979	26.81	3.93	0.000	0.008		
	09/05/1979	32.91	6.73	0.000	0.007		
Saint-Hilaire	18/05/1979	32.82	0.52	0.001	0.000	0.004	0.001
	12/04/1980	78.00	1.10	2.257	0.001		
	03/08/1979	28.44	0.59	0.007	0.010		
Casa Portugal	09/05/1979	47.53	4.80	0.030	0.009	0.010	0.010
	24/09/1979	53.03	8.53	0.890	0.011		
	18/05/1979	35.02	3.77	0.001	0.010		
Cascata-I	09/05/1979	32.33	2.07	0.001	0.009	0.010	0.011
	12/12/1979	52.84	4.77	16.647	0.011		
	25/09/1979	39.60	3.28	0.010	0.011		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar disso, os resultados obtidos para ambos os métodos de determinação de λ indicam que os valores ajustados para a taxa de abstração inicial se aproximam mais de 0,05 do que 0,2 para a maioria das sub-bacias, o que é evidenciado pela Figura 22. Esse resultado coincide com os resultados encontrados por diferentes autores, conforme apresentado na Tabela 15, os quais evidenciam a maior adequação de valores inferiores a 0,2. Cabe ressaltar que os estudos que apresentaram as maiores medianas, o de Bertotto et al. (2021) e Elhakeen e Papanicolaou (2009), foram os realizados utilizando chuvas simuladas.

Figura 22 - Mediana dos valores de λ pelos métodos de análise do evento e ajuste do modelo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 - Taxa de abstração inicial (λ) disponível na literatura.

Autores	Método	Área de Estudo	Nº de eventos	Valores mínimos	Valores máximos	Média	Mediana
Alves (2016)	Análise do Evento	Bacia Ribeirão Jaguara, MG	166	0.00	0.5	0.020	0.000
Veeck (2017)	Ajuste para eventos simulados para MDT LiDAR 30m	Bacia Saint-Hilaire, RS	18	0.02	0.7	0.129	0.090
Ferreira (2019)	Análise do Evento	Bacia Arroio Dilúvio, RS	48	0.0004	0.634	0.089	0.043
	Análise do Evento	Bacia Alto da Colina, RS	40	0.002	0.607	0.120	0.062
Bertotto et al. (2021)	Modelo de Infiltração de Horton para eventos simulados	Pato Branco, PR	120	0.00	0.94	0.267	0.250
Elhakeen e Papanicolaou (2009)	Ajuste do Modelo para chuva simulada	Iowa, EUA	18	0.082	0.98	0.197	0.143
Woodward et al. (2003)	Análise do Evento	Variado	134	0.0005	0.491	0.070	0.048
	Ajuste do Modelo	Variado	134	0.00	0.577	0.056	0.0001
Baltas, Dervos e Mimikou (2007)	Análise do Evento	Ática, Grécia	18	0.004	0.037	0.015	0.013
Assaye et al. (2021)	Análise do Evento	Bacia do Rio Nilo Azul, Etiópia	18	0.00	0.08	0.012	0.000

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as bacias Bela Vista, Beco Carvalho, Arroio do Meio e Saint-Hilaire, os resultados de λ ajustados a alguns eventos (Tabela 14) indicam valores muito próximos de zero. Outros autores também indicaram valores de λ próximos a zero para diferentes bacias brasileiras (ALVES, 2016; BERTOTTO *et al.*, 2021) e ao redor do mundo (ASSAYE *et al.*, 2021; WOODWARD *et al.*, 2003).

Contudo, o comportamento de λ obtido pelo ajuste do modelo difere do obtido pela análise do evento para algumas bacias. Para a sub-bacia Beco do Carvalho, por exemplo, o mesmo evento analisado pelos dois métodos (21/05/1979) resultou em um valor de λ superior a 0,2 pelo método da análise do evento, e um valor próximo a zero pelo ajuste do modelo. Em geral, os valores para a taxa de abstração inicial obtidos pela análise de evento foram superiores aos ajustados para os mesmos eventos, com exceção da sub-bacia Cascata-I. A fim de identificar possíveis padrões na relação entre o λ determinado pelos dois métodos, é necessária a ampliação do número de eventos analisados.

Ademais, a variação nos valores de λ obtidos a partir do método da análise dos eventos é inferior a obtida através da análise do evento, o que difere do comportamento observado por Jiang (2001) e Woodward *et al.* (2003), que identificaram maior dispersão nos resultados obtidos para aquele método. Contudo, essa divergência pode ser decorrente do pequeno número de eventos utilizados para esta análise em comparação com os utilizados pelos autores.

Na determinação dos valores da taxa de abstração inicial (λ) para a bacia do Arroio Dilúvio, Ferreira (2019), utilizando o mesmo banco de dados deste trabalho, apresentou valores para três métodos gráficos de separação do escoamento superficial – côncavo, de declividade constante e convexo -, sendo que o método adotado para determinação de λ foi o da análise do evento. Os resultados para o método de separação do escoamento da declividade constante (o mesmo utilizado neste trabalho) para cada sub-bacia são detalhados na Tabela 16.

Comparando os valores medianos indicados na Tabela 16 com os obtidos neste trabalho, observa-se que é mantida a tendência de valores de λ mais próximos a 0,05 para as sub-bacias; apesar disso, diferenças entre os resultados para o método da análise dos eventos são evidenciados, sendo mais acentuadas para as bacias Arroio do Meio e Saint-Hilaire.

Tabela 16 - Resultados de Ferreira (2019) para taxa de abstração inicial para cada sub-bacia do Arroio Dilúvio.

Sub-bacia	Resultados de Ferreira (2019)					Resultados medianos deste trabalho	
	Nº de eventos	Valores mínimos	Valores máximos	Média	Mediana	λ (Análise do Evento)	λ (Ajuste do Modelo)
Bela Vista	8	0.0058	0.2402	0.0857	0.059	0.037	0.007
Beco Carvalho	4	0.0091	0.2925	0.1213	0.09	0.089	0.000
Arroio do Meio	4	0.0004	0.6342	0.201	0.085	0.031	0.007
Saint-Hilaire	4	0.0467	0.0737	0.0593	0.059	0.008	0.001
Casa Portugal	8	0.0227	0.4609	0.1072	0.035	0.024	0.010
Cascata-I	20	0.0011	0.4136	0.0598	0.018	0.003	0.011

Fonte: Adaptado de Ferreira (2019).

Em geral, os valores indicados na Tabela 12 são inferiores aos apontados por Ferreira (2019) para as sub-bacias, essa diferença pode ser atribuída aos diferentes critérios de seleção de eventos e à subjetividade na determinação da abstração inicial para esse método. Da mesma forma, os valores de λ calibrados para o método do ajuste do modelo foram inferiores às medianas indicadas por Ferreira (2019) para as bacias Bela Vista, Arroio do Meio e Saint-Hilaire.

Considerando a importância da taxa de abstração inicial para o cálculo da lâmina de escoamento superficial no método Curva-Número (BALTAS; DERVOS; MIMIKOU, 2007), a determinação dos valores do parâmetro CN para cada metodologia de obtenção λ , e a posterior análise de performance dos modelos, precedem a avaliação comparativa entre os diferentes métodos apresentados para apuração das perdas iniciais (MORIASI *et al.*, 2007).

4.3 VALORES DO PARÂMETRO CN DEFINIDO POR DIFERENTES MÉTODOS

O parâmetro CN, conforme detalhado no item 3.2, foi determinado a partir de cinco diferentes métodos para a bacia do Arroio Dilúvio. Quando definido conforme tabelas recomendadas pelo NRCS, o CN resultante consiste em um valor único para cada sub-bacia. Já para os demais métodos, são obtidos valores de CN únicos para cada evento.

4.3.1 Parâmetro CN definido para valores tabelados do NRCS

Na Tabela 17 são apresentados os valores de CN definidos para cada uma das sub-bacias de acordo com valores recomendados por tabelas do NRCS (USDA, 1986). O detalhamento do cálculo do CN médio para cada sub-bacia é apresentado no APÊNDICE B.

Tabela 17 - CN tabelado para sub-bacias do Arroio Dilúvio.

	Sub-bacia					
	Bela Vista	Beco Carvalho	Arroio do Meio	Saint Hilaire	Casa Portugal	Cascata-I
CN Tabelado	92.6	85.5	87.2	74.5	76.0	86.8

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que os maiores valores de CN tabelado foram obtidos para as bacias com maiores porcentagens de áreas urbanizadas, sendo a Bela Vista a que apresentou maior valor. Da mesma forma, os menores valores foram observados para as bacias Saint-Hilaire e Casa de Portugal, as menos urbanizadas, conforme apresentado na Tabela 5.

4.3.2 Parâmetro CN para λ fixados de 20% e 5%

Os valores do parâmetro CN ajustado para a taxa de abstração inicial (λ) de cada evento fixada em 20% e 5% são apresentados na Tabela 18. O CN, inicialmente definido para a condição de umidade antecedente (AMC) de cada evento, foi convertido para o valor correspondente a AMC II de acordo com Equações 8 e 9.

Os valores de CN para λ de 5% apresentaram um desvio padrão superior aos valores para λ de 20% em todas as bacias, indicando maior dispersão.

Tabela 18 - Parâmetro CN para λ fixado em 20% e em 5%.

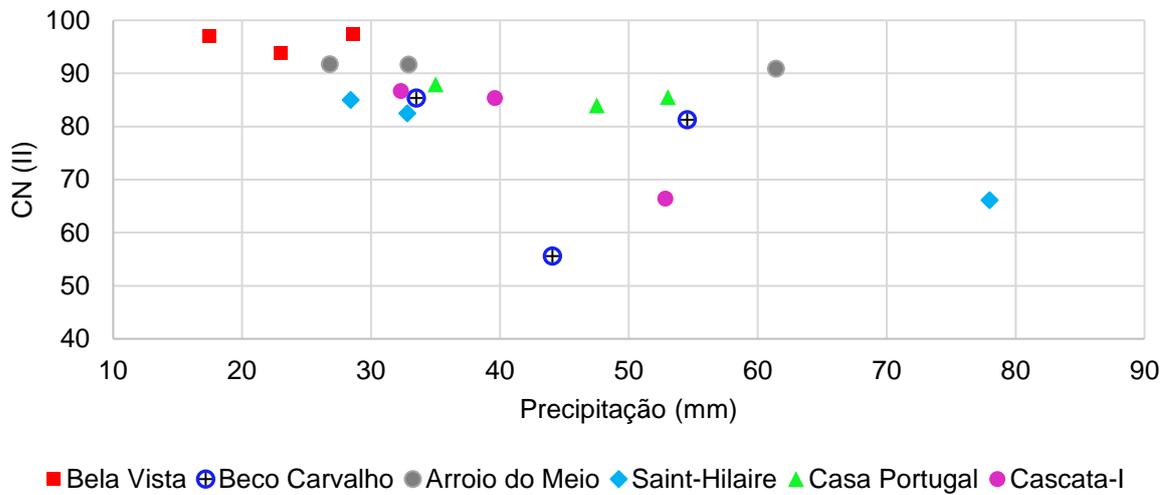
Sub-bacia	Evento	TR 30 min mais intensos (anos)	λ de 20%				λ de 5%			
			CN II evento	Desv. Padrão	Média	Mediana	CN II evento	Desv. Padrão	Média	Mediana
Bela Vista	18/10/1980	0.004	97.09				95.75			
	28/05/1980	0.044	97.39	1.94	96.12	97.09	96.59	3.76	94.01	95.75
	08/07/1980	0.000	93.88				89.70			
Beco Carvalho	20/07/1979	0.000	81.31				66.57			
	21/05/1979	0.003	55.61	16.14	74.10	81.31	39.44	17.60	59.48	66.57
	18/05/1979	0.000	85.38				72.43			
Arroio do Meio	20/07/1979	0.000	90.96				87.32			
	22/10/1979	0.000	91.75	0.45	91.47	91.71	85.34	0.99	86.36	86.41
	09/05/1979	0.000	91.71				86.41			
Saint-Hilaire	18/05/1979	0.001	82.52				60.89			
	12/04/1980	2.257	66.13	10.27	77.89	82.52	38.80	14.47	55.24	60.89
	03/08/1979	0.007	85.03				66.03			
Casa Portugal	09/05/1979	0.030	84.04				71.36			
	24/09/1979	0.890	85.55	2.00	85.87	85.55	76.07	3.39	75.12	76.07
	18/05/1979	0.001	88.01				77.93			
Cascata-I	09/05/1979	0.001	86.74				73.47			
	12/12/1979	16.647	66.47	11.33	79.53	85.38	47.69	14.60	64.53	72.43
	25/09/1979	0.010	85.38				72.43			

Fonte: Elaborado pelo autor.

A fim de verificar possíveis correlações entre a precipitação e os resultados de CN (II) para cada um dos eventos, os valores foram plotados na Figura 23 e Figura 24, correspondentes ao CN para λ de 20% e de 5%, respectivamente.

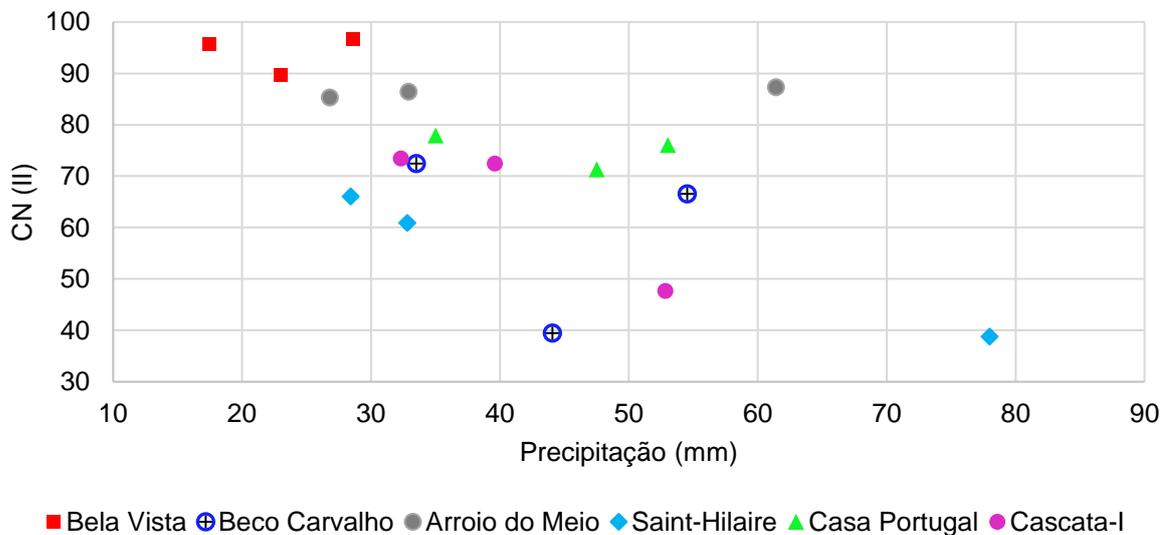
O teste não-paramétrico de correlação de Kendall indicou que os valores de precipitação e do CN para λ de 20% apresentam um Tau (τ) de - 0,472 com um bom nível de significância (0,6%), o que pode ser considerada uma correlação negativa moderada (AKOGLU, 2018). Já o Tau (τ) para o teste de correlação entre a precipitação e valores de CN cujo λ do evento é fixado em 5% é de -0,393 com significância de 2,3%, podendo ser considerada moderada a fraca (AKOGLU, 2018).

Figura 23 - Dispersão de CN (II) para λ de 20% versus a precipitação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 - Dispersão de CN (II) para λ de 5% versus a precipitação.



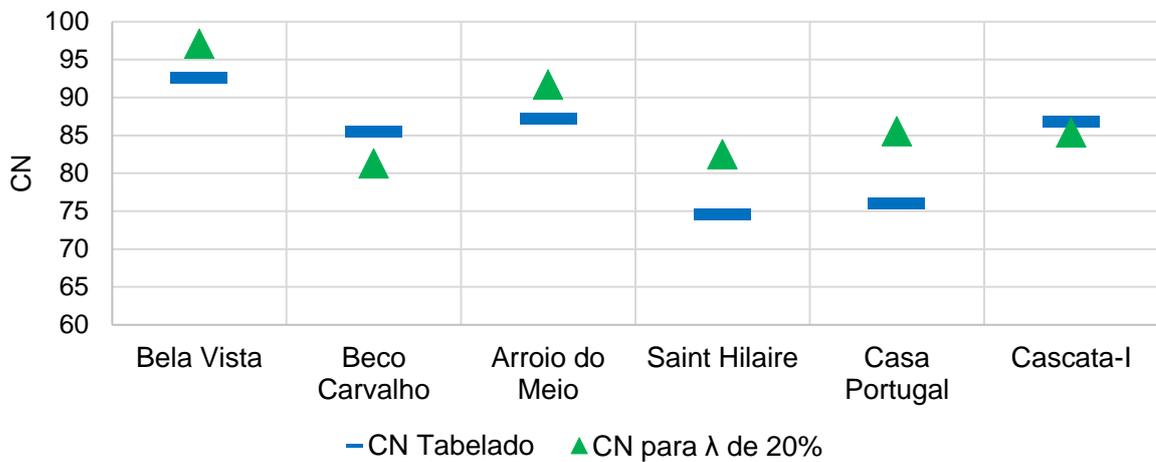
Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que os eventos com as maiores precipitações também apresentaram maior variação no valor do CN e que os menores valores do parâmetro foram observados para eventos com precipitação superior a 40mm.

Tendo em vista que as tabelas para valores de CN recomendadas pelo NRCS foram elaboradas para um λ de 20% (HAWKINS et al., 2009; USDA, 1986), os resultados do ajuste dos eventos para essa taxa de abstração inicial podem ser

comparados aos tabelados. Nesse sentido, conforme Figura 25, observa-se que apenas para as bacias Beco Carvalho e Cascata I o valor de CN tabelado foi superior às medianas dos valores ajustados para os dados observados. Já para as demais bacias, os valores tabelados são inferiores aos ajustados. Considerando a alta sensibilidade do cálculo do hidrograma de projeto ao parâmetro CN (ALLASIA; VILLANUEVA, 2007), a subestimativa dos valores desse parâmetro pode resultar em inadequações de capacidade de obras hidráulicas.

Figura 25 - Comparação de valores de CN tabelado com mediana do calibrado para λ de 20%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse resultado vai ao encontro do alertado por Ferreira (2019), Lautharte (2015), Nakayama et al. (2011) e Tassi et al. (2006), que identificaram valores do parâmetro CN ajustado para um λ de 20% superiores aos tabelados, o que contraria a crença de projetistas de que os valores recomendados pelas tabelas do NRCS seriam conservadores.

Outros autores também determinaram o valor de CN para taxas de abstração inicial fixadas em 5% e 20% utilizando o mesmo banco de eventos. Lautharte (2015) e Tassi et al. (2006) ajustaram o parâmetro para as bacias Beco Carvalho, Saint-Hilaire e Cascata-I fixando o λ em 20%. Já Ferreira (2019) ajustou o CN para as seis sub-bacias considerando o λ de 20% e 5%, conforme Tabela 19.

Apesar de serem analisados para eventos do mesmo banco de dados, os resultados do parâmetro CN das sub-bacias diferem para cada autor. As medianas de CN apresentados na Tabela 18 para a taxa de abstração inicial de 20% são, em geral,

superiores aos resultados de Ferreira (2019), Lautharte (2015) e Tassi et al. (2006), com exceção da bacia Arroio do Meio – que apresenta resultado inferior ao de Ferreira (2019) –, e Cascata-I – para a qual os resultados são similares. Essa diferença evidencia a necessidade de investigações futuras com um maior número de eventos a fim de melhor caracterizar o comportamento do parâmetro na área de estudo.

Tabela 19 - Comparação de mediana dos valores de CN para λ de 20% e 5% com outros autores.

	Autor	Sub-bacia					
		Bela Vista	Beco Carvalho	Arroio do Meio	Saint Hilaire	Casa Portugal	Cascata-I
CN para λ de 20%	Tassi et al. (2006)	-	70.7	-	69.8	-	86.0
	Lautharte (2015)	-	71.5	-	74.1	-	87.2
	Ferreira (2019)	90.6	70.0	94.4	78.0	80.1	85.7
	Presente trabalho	97.1	81.3	91.7	82.5	85.6	85.4
CN para λ de 5%	Ferreira (2019)	84.5	46.1	90.3	53.4	63.4	71.2
	Presente trabalho	95.7	66.6	86.4	60.9	76.1	72.4

Fonte: Adaptado de Ferreira (2019), Lautharte (2015) e Tassi *et al.* (2006).

Além da quantidade de amostras, a metodologia de separação do escoamento superficial, e os critérios de seleção dos eventos, também são possíveis causas de diferenças nos resultados, a utilização de eventos com precipitação inferior a 15 mm que foram considerados por Ferreira (2019), Lautharte (2015) e Tassi et al. (2006) (vide resumo no Tabela 21) enquanto que, neste trabalho, eventos com volumes precipitados menores que 15mm foram excluídos.

4.3.3 Parâmetro CN para λ definido pelo método de análise do evento

Na Tabela 20 são apresentados os valores de CN ajustados para a taxa de abstração inicial (λ) determinados pelo método da análise do evento e convertidos para AMC II.

Tabela 20 - Parâmetro CN para λ definidos pelo método da análise do evento.

Sub-bacia	Evento	CN II evento	Desv. Padrão	Média	Mediana
Bela Vista	18/10/1980	95.56	4.96	93.83	95.56
	28/05/1980	97.71			
	08/07/1980	88.24			
Beco Carvalho	20/07/1979	72.57	10.93	61.63	61.60
	21/05/1979	61.60			
	18/05/1979	50.72			
Arroio do Meio	20/07/1979	86.59	4.90	86.90	86.59
	22/10/1979	91.95			
	09/05/1979	82.16			
Saint-Hilaire	18/05/1979	26.58	22.60	34.89	26.58
	12/04/1980	17.62			
	03/08/1979	60.47			
Casa Portugal	09/05/1979	61.13	11.32	72.78	73.48
	24/09/1979	83.74			
	18/05/1979	73.48			
Cascata-I	09/05/1979	56.94	19.12	53.47	56.94
	12/12/1979	32.85			
	25/09/1979	70.62			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se uma dispersão significativa dos resultados obtidos para os eventos de cada uma das sub-bacias, especialmente para a Saint-Hilaire e Cascata-I, que foram as bacias que apresentaram a menor dispersão dos valores de λ para o método da análise dos eventos, conforme apresentado no item 4.2.1. Cabe destacar que, para essas bacias, os eventos com maior precipitação também foram os que apresentaram menor CN.

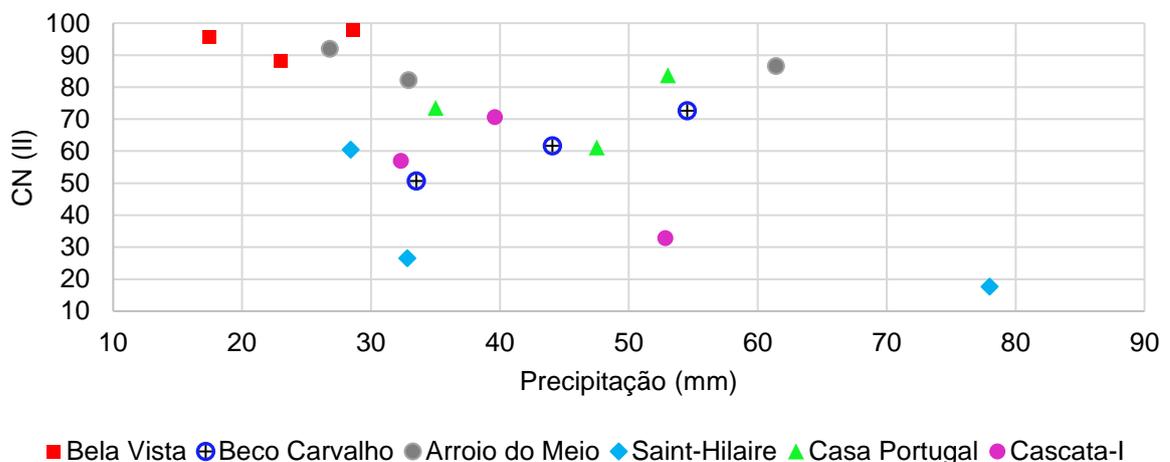
Os valores das medianas de CN apresentados na Tabela 20 se aproximam dos ajustados para λ de 5% em quase todas as sub-bacias, as exceções são, novamente,

Saint-Hilaire e Cascata-I, para as quais os valores são inferiores aos obtidos para a taxa de abstração fixada em 5%.

Na Figura 26 os resultados do CN para λ observado são plotados em relação à precipitação do evento. Dessa forma, é possível identificar que não há uma correlação aparente entre os parâmetros, o que é evidenciado pelo resultado do teste de correlação de Kendall para os dados: o valor de Tau (τ) é de -0,268 com baixa significância (26%), portanto não se descarta a inexistência de correlação.

Apesar disso, identifica-se um possível padrão no comportamento dos três eventos da bacia Beco do Carvalho – cujos valores observados de CN acompanham o crescimento da precipitação – e Saint-Hilaire – para a qual os eventos com maiores precipitações apresentaram menores valores de CN. Portanto, investigações futuras com um maior número de eventos se fazem necessárias para investigar o comportamento para cada sub-bacia.

Figura 26 - Dispersão de CN (II) para λ obtido pela análise do evento versus a precipitação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores disponíveis na literatura para o CN das sub-bacias do Arroio Dilúvio são resumidos na Tabela 21. Dentre os estudos realizados por outros autores, Ferreira (2019) também ajustou valores do número da curva para a taxa de abstração inicial observada em cada evento (método da análise do evento).

As medianas apresentadas na Tabela 20 para as sub-bacias Saint-Hilaire e Cascata I são inferiores aos valores de CN ajustados por Ferreira (2019). Já para as

bacias Bela Vista e Casa de Portugal, os valores deste trabalho superam os disponíveis na literatura.

Tabela 21 - Valores de CN para o Arroio Dilúvio disponíveis na literatura.

Sub-bacias	Autores	Método λ	Nº de eventos	Mínimos	Máximos	Média	Mediana
Bela Vista	Ferreira (2019)	Fixado em 20%	8	74.65	95.00	88.74	90.61
		Análise Evento		61.02	92.63	81.77	85.54
Beco Carvalho	Tassi <i>et al.</i> (2006)	Fixado em 20%	7	65.00	91.20	76.00	70.70
	Lautharte (2015)	Fixado em 20%	7	65.11	91.80	76.52	71.46
	Ferreira (2019)	Fixado em 20%	4	63.35	79.21	70.66	70.03
		Análise Evento		20.37	74.82	53.62	59.65
Arroio do Meio	Ferreira (2019)	Fixado em 20%	4	60.87	98.88	87.14	94.40
		Análise Evento		81.01	98.40	89.28	88.85
Saint-Hilaire	Tassi <i>et al.</i> (2006)	Fixado em 20%	10	50.00	90.40	69.22	69.75
	Lautharte (2015)	Fixado em 20%	10	54.18	90.70	73.58	74.07
	Ferreira (2019)	Fixado em 20%	4	71.20	89.58	79.18	77.97
		Análise Evento		52.66	77.66	60.66	56.17
Casa Portugal	Ferreira (2019)	Fixado em 20%	8	72.32	90.08	80.55	80.07
		Análise Evento		50.10	94.36	66.65	62.43
Cascata-I	Tassi <i>et al.</i> (2006)	Fixado em 20%	41	60.00	97.10	82.51	86.00
	Lautharte (2015)	Fixado em 20%	41	66.41	97.75	84.94	87.24
	Ferreira (2019)	Fixado em 20%	20	65.88	93.44	83.08	85.70
		Análise Evento		27.02	91.15	61.60	61.41

Fonte: Adaptado de Ferreira (2019, Lautharte (2015) e Tassi *et al.* (2006).

4.3.4 Parâmetro CN para λ definido pelo método de ajuste do modelo

Os resultados dos valores de CN para AMC II ajustados para as sub-bacias do Arroio Dilúvio são apresentados na Tabela 22.

O comportamento dos valores de CN (II) para λ definido pelo método de ajuste do modelo em relação à precipitação, apresentado na Figura 27, é semelhante ao observado para λ definido pelo método de análise do evento para cada sub-bacia, com exceção a Beco do Carvalho.

Na Figura 28, são apresentadas as medianas dos valores do número da curva para os quatro métodos de determinação da taxa de abstração inicial, além do CN tabelado. A partir disso, é possível observar que os valores do parâmetro para as bacias Bela Vista, Arroio do Meio e Casa de Portugal são os que apresentam

distribuição em torno de valores mais próximos. Já as demais bacias apresentam grande dispersão nos valores de CN para os diferentes métodos.

Tabela 22 - Parâmetro CN para λ definido pelo método de ajuste do modelo.

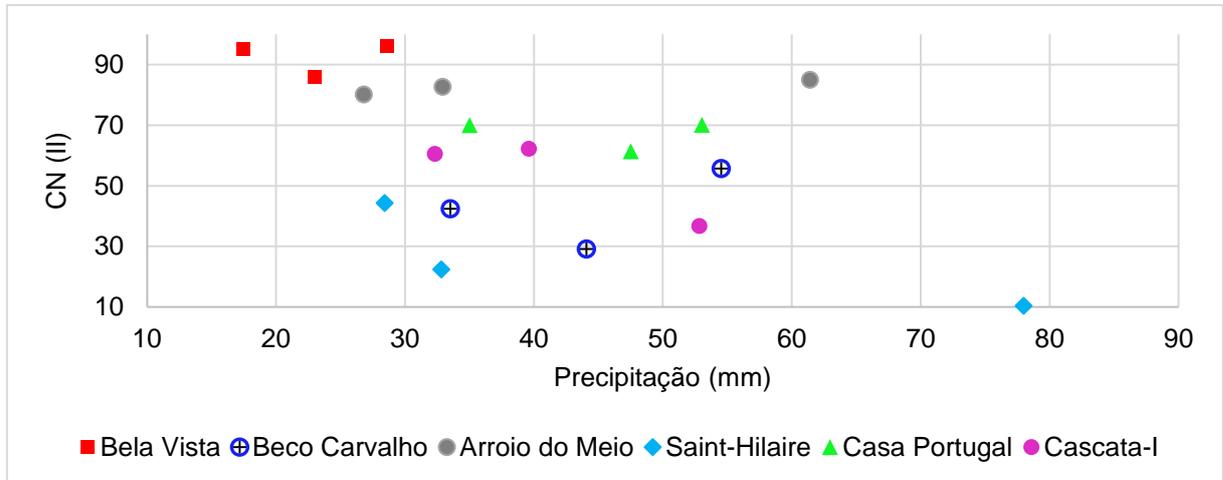
Sub-bacia	Evento	CN II evento	Desv. Padrão	Média	Mediana
Bela Vista	18/10/1980	95.01	5.63	92.40	95.01
	28/05/1980	96.24			
	08/07/1980	85.93			
Beco Carvalho	20/07/1979	55.73	13.29	42.47	42.51
	21/05/1979	29.16			
	18/05/1979	42.51			
Arroio do Meio	20/07/1979	85.10	2.44	82.68	82.72
	22/10/1979	80.22			
	09/05/1979	82.72			
Saint-Hilaire	18/05/1979	22.46	17.16	25.75	22.46
	12/04/1980	10.48			
	03/08/1979	44.32			
Casa Portugal	09/05/1979	61.40	5.02	67.20	70.04
	24/09/1979	70.15			
	18/05/1979	70.04			
Cascata-I	09/05/1979	60.64	14.30	53.22	60.64
	12/12/1979	36.73			
	25/09/1979	62.28			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ressalta-se que o CN para λ ajustado ao modelo correspondeu ao menor valor do parâmetro para quatro das seis sub-bacias. Ademais, o CN ajustado para λ fixado em 20% foi o maior valor do parâmetro para quatro das sub-bacias estudadas.

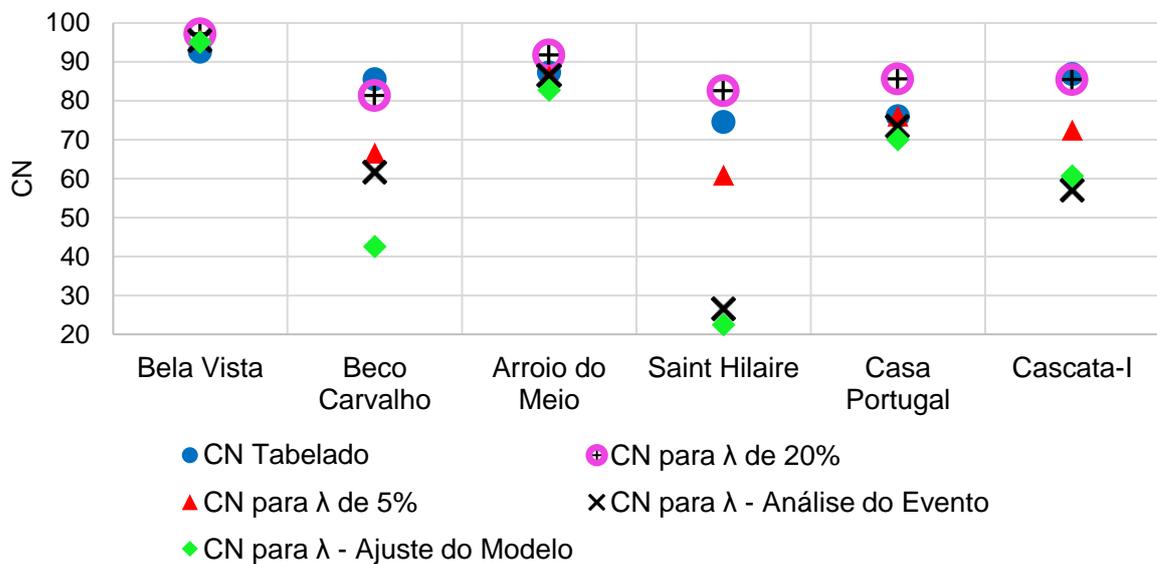
A variação dos resultados obtidos, tanto para a taxa de abstração inicial quanto para o parâmetro CN para os diferentes métodos de determinação, corrobora a necessidade de análise da performance dos diferentes pares de CN e λ na estimativa da lâmina de escoamento superficial para outros eventos, a fim de identificar os métodos que melhor se adequam aos dados.

Figura 27 - Dispersão de CN (II) para λ obtido pela análise do evento versus a precipitação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28 - Mediana dos valores de CN definidos por diferentes métodos para as sub-bacias do Arroio Dilúvio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 ANÁLISE DE PERFORMANCE DOS MODELOS

Os índices estatísticos adotados para análise da performance dos modelos – PBIAS e a raiz do erro quadrático médio – foram aplicados os valores da lâmina de escoamento superficial simulada (Q_{sim}) e observada (Q_{obs}) para três eventos chuva-

vazão diferentes dos utilizados para calibração dos parâmetros CN e λ , porém, selecionados de acordo com os mesmos critérios dos primeiros. Os eventos selecionados para análise de performance e seus parâmetros hidrológicos são apresentados no APÊNDICE C.

Cabe ressaltar que, no cálculo do escoamento superficial para os eventos analisados, os valores do potencial máximo de retenção (S) para um AMC II foram ajustados à condição de umidade antecedente de cada evento pelas Equações 15 e 16.

Para os métodos de determinação do CN a partir de λ observado no evento, fixado em 20% e igual a 5%, as análises apresentadas são realizadas para a mediana dos valores dos parâmetros.

4.4.1 Valores do *Percent Bias* (Pbias)

Na Tabela 23 são apresentados os resultados da estatística Pbias de análise de performance aplicada aos diferentes pares de CN e λ para cada uma das sub-bacias. Os valores das lâminas de escoamento simuladas para os 18 eventos são apresentados no APÊNDICE D.

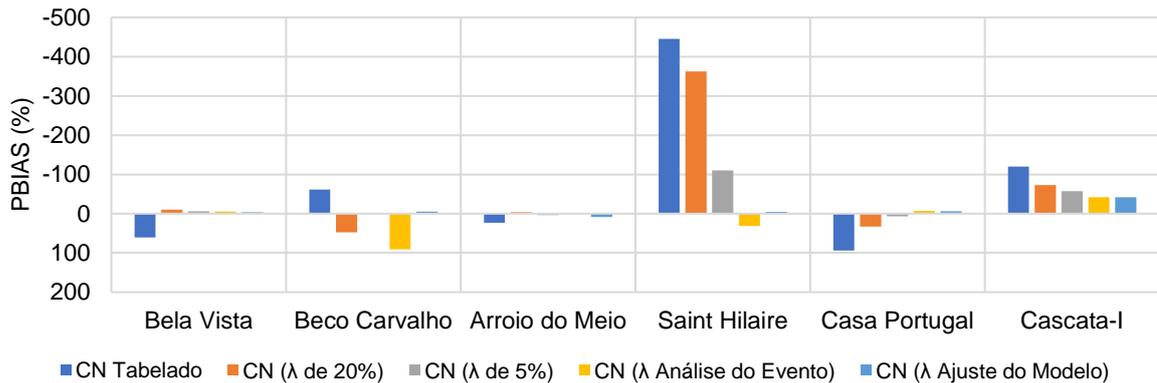
Tabela 23 – Resultados de PBIAS na análise de performance dos pares de CN e λ .

Método determinação CN	Sub-bacia						PBIAS Médio (%)
	Bela Vista	Beco Carvalho	Arroio do Meio	Saint Hilaire	Casa Portugal	Cascata-I	
	<i>Percent Bias</i>						
CN Tabelado	60.5%	-61.8%	23.2%	-445.6%	94.0%	-119.7%	-74.9
CN para λ de 20%	-10.5%	47.8%	-3.5%	-362.4%	33.2%	-72.9%	-61.4
CN para λ de 5%	-5.8%	-0.1%	3.9%	-110.5%	7.2%	-57.1%	-27.1
CN para λ a partir da análise do evento	-5.2%	90.9%	-0.2%	31.6%	-6.6%	-41.6%	11.5
CN para λ a partir do ajuste do modelo	-3.7%	-5.1%	8.4%	-4.2%	-5.9%	-41.7%	-8.7
	Valores dentro do limite recomendado por Moriasi et al. (2007): $\pm 25\%$						

Fonte: Elaborado pelo autor.

O *Pbias* para os resultados simulados a partir das medianas de CN e λ são apresentados no Figura 29 de forma a permitir uma análise comparativa da magnitude da tendência a subestimativa ou superestimativa do escoamento superficial para cada método.

Figura 29 - Valores de Pbias para simulações a partir de medianas dos parâmetros CN e λ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em comparação com os outros métodos de determinação dos parâmetros para as sub-bacias do Arroio Dilúvio, a adoção do CN recomendado por tabelas do NRCS foi a configuração que resultou nos valores que mais se afastaram de zero para *Pbias*. Sendo que, para algumas bacias a adoção do par tendeu a uma superestimativa da lâmina de escoamento superficial – como na Saint-Hilaire – e, em outras – como Casa de Portugal -, à subestimativa.

Dentre os valores de CN determinados para valores de λ pré-determinados, a performance dos valores de CN ajustados para a taxa de abstração inicial de 5% resultou no maior número de pares CN e λ com *Pbias* dentro da faixa de aceitação indicada por Moriasi et al. (2007). Ademais, os resultados estiveram mais próximos a zero do que os valores do parâmetro ajustado para λ fixado em 20% na maioria das bacias. Isso indica que a adoção do CN ajustado para λ de 5% resultou em simulações com menores tendências de superestimativa ou subestimativa da lâmina de escoamento superficial do que o para λ de 20%.

Os métodos de determinação de CN para λ obtido pela análise do evento e pelo ajuste do modelo foram os que apresentaram os melhores resultados para grande parte das bacias.

O método de determinação de λ e CN que apresentou melhor resultado geral de Pbias, considerando a média de todas as bacias, foi o método do ajuste do modelo. Apesar disso, os valores de CN para λ de ajuste do modelo não se mostraram adequados para a bacia Cascata-I.

4.4.2 Valores da raiz do erro quadrático médio (RMSE)

Os resultados da raiz do erro quadrático médio na simulação da lâmina de escoamento superficial a partir de diferentes pares de CN e λ para cada uma das sub-bacias são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Resultados de RMSE na análise de performance dos pares de CN e λ .

Método determinação CN	Sub-bacia						Média (mm)
	Bela Vista	Beco Carvalho	Arroio do Meio	Saint Hilaire	Casa Portugal	Cascata-I	
	Raiz do Erro Quadrático Médio - RMSE (mm)						
CN Tabelado	8.0	1.1	5.4	1.8	4.2	3.1	3.9
CN para λ de 20%	3.0	0.9	3.0	2.5	1.8	2.3	2.2
CN para λ de 5%	3.2	0.5	4.4	1.2	1.2	1.5	2.0
CN para λ a partir da análise do evento	3.2	1.7	4.5	0.3	1.2	0.9	2.0
CN para λ a partir do ajuste do modelo	3.3	0.6	5.5	0.3	1.2	1.0	2.0



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que, novamente, os resultados para a simulação do escoamento superficial utilizando o CN tabelado resultam nos piores valores para a estatística de análise para a maior parte das sub-bacias.

Ademais, os valores de CN determinados para λ de 5%, pela análise do evento e pelo ajuste do modelo foram os que apresentaram melhores resultados, sendo que a análise do evento apresentou a menor média para RMSE.

Conforme indicado por Moriasi et al. (2007), não há uma recomendação de um intervalo de valores aceitáveis para o RMSE, porém, valores inferiores à metade do desvio médio padrão dos dados observados para o fenômeno simulado – neste caso, a lâmina de escoamento superficial dos eventos –, são considerados baixos (SINGH et al., 2005).

Conforme valores do desvio padrão apresentados no APÊNDICE C, o RMSE, para esses três métodos, só é superior à metade do desvio padrão dos dados observados para as bacias Saint-Hilaire e Cascata-I, corroborando a necessidade de ampliação do estudo para essas bacias.

4.5 INCERTEZAS E RECOMENDAÇÕES QUANTO AOS RESULTADOS

Além de explicitar as limitações da pesquisa desenvolvida, a análise das incertezas relacionadas aos resultados apresentados é útil para discussão de potenciais melhorias em trabalhos futuros. A primeira fonte de incerteza está relacionada aos dados dos eventos utilizados. Moriasi et al. (2007) destaca que, apesar de raramente ser contabilizada, a imprecisão dos dados medidos deve ser considerada para uma correta avaliação de modelos de bacias hidrográficas. Neste caso, os eventos analisados foram registrados há cerca de 40 anos em pluviógrafos e linígrafos analógicos, sendo que os dados foram consistidos e digitalizados, o que não exclui a possibilidade de erros de registro e de transcrição, conforme alertado por Tassi et al. (2006).

Devido ao período transcorrido, incertezas relacionadas a características físicas da bacia dificilmente podem ser verificadas, como as curvas-chave dos linígrafos, o nível de contribuição de efluentes domésticos e industriais para a vazão, entre outros.

Ademais, variações identificadas nos valores da chuva registrada em diferentes pluviógrafos durante o mesmo período indicam uma grande variação espacial da chuva. Portanto a precipitação média de cada evento, determinada pelo método dos polígonos de Thiessen para os postos com dados disponíveis, pode não ser representativa da real chuva média da bacia.

Nesse sentido, devido a inexistência de séries contínuas de medidas de chuva para todos os pluviômetros do Projeto Dilúvio (ALVAREZ; SANCHEZ, 1979; LOPES; SANCHEZ, 1986), não foi possível determinar a condição de umidade antecedente para os mesmos postos que registraram a chuva de cada evento.

Ainda assim, cerca de 89% dos eventos selecionados para calibração dos parâmetros apresentavam AMC I de acordo com dados do pluviômetro do 8º Distrito, o que limita os resultados quanto a assimilação das características de eventos com condição de umidade antecedente II e III.

Outros fatores que limitam a representatividade dos resultados é a pequena quantidade de eventos utilizados para cada sub-bacia, e o período ao qual eles foram registrados – foram utilizados apenas eventos registrados nos anos de 1979 e 1980. Esse fator, somado aos valores baixos de TR para os eventos selecionados a partir do banco de dados disponíveis, dificulta a identificação do comportamento do CN assintótico para cada sub-bacia conforme descrito no item 2.3.

Tucci, Villanueva e Cruz (1998) também alertaram que a resolução temporal dos eventos de chuva, em intervalos de 30 minutos, pode não ser suficiente para a identificação da variabilidade temporal da vazão de descarga em bacias com curto tempo de concentração, como a Bela Vista.

Por fim, é importante ressaltar que, nesta pesquisa, os valores dos parâmetros CN e λ foram ajustados e avaliados considerando apenas a lâmina total do escoamento superficial gerado. Tendo em vista que a taxa de abstração inicial também se relaciona com a distribuição temporal da descarga (BALTAS; DERVOS; MIMIKOU, 2007), os parâmetros também devem ser ajustados e avaliados para a verificação do hidrograma simulado.

5 CONCLUSÃO

Na ausência de dados hidrológicos monitorados, o método da Curva-Número (CN) do NRCS é um dos mais utilizados para a determinação do escoamento superficial direto. Entretanto os valores recomendados para a taxa de abstração inicial (λ) e para o parâmetro CN são algumas das principais dúvidas e pontos de discussão em relação ao método.

A fim de determinar os valores mais adequados para a estimativa da precipitação efetiva total em seis sub-bacias do Arroio Dilúvio em Porto Alegre - RS, os parâmetros λ e CN foram verificados a partir de dados hidrológicos para quatro métodos: λ igual a 20%, λ igual a 5%, λ calculado pela análise de eventos, e pelo ajuste do modelo. Os resultados obtidos foram comparados entre si e com o valor de CN estimado a partir de tabelas recomendadas pelo NRCS quanto à estimativa da lâmina de escoamento superficial de eventos chuva-vazão.

De maneira geral, os resultados da análise de performance do CN tabelado indicaram que esse foi método menos preciso na estimativa da lâmina de escoamento superficial para as sub-bacias do Arroio Dilúvio. Ademais, a mediana dos valores de CN calibrados para um λ de 20% foram superiores aos tabelados na maioria das sub-bacias, o que coincide com os resultados apresentados por Ferreira (2019), Lautharte (2015) e Tassi et al. (2006).

A partir do método da análise dos eventos, observou-se que os valores da taxa de abstração inicial de 83,33% dos eventos analisados foram inferiores a 20% e, apesar da significativa variação em diferentes eventos de algumas sub-bacias, os valores medianos de λ se aproximaram mais de 5%. Nesse sentido, a performance geral dos valores medianos de CN calibrado para λ de 5% foram superiores aos ajustados para λ de 20% na estimativa da chuva efetiva para as sub-bacias estudadas. Esse resultado vai ao encontro do observado por outros autores, em bacias brasileiras (ALVES, 2016; FERREIRA, 2019; VALLE JUNIOR; RODRIGUES; OLIVEIRA, 2019) e pelo mundo (ELHAKEEN; PAPANICOLAOU, 2009; WOODWARD *et al.*, 2003), de que o valor de 5% é mais representativo para λ do que o de 20%.

Ainda assim, os valores de CN e λ obtidos a partir do ajuste do modelo e da mediana dos valores de análise dos eventos foram os que resultaram nas melhores performances gerais na estimativa da precipitação efetiva total para os eventos analisados através das estatísticas Pbias e raiz do erro quadrático médio (RMSE).

Os valores de λ para o ajuste do modelo variaram de zero até 0,011 entre as sub-bacias. Já os valores de CN estão entre 22,5 e 95,0, sendo que esse método foi o que ajustou o menor valor da mediana do parâmetro para quatro das seis sub-bacias.

Adotando-se o método da análise dos eventos, as medianas dos valores de λ para as sub-bacias variaram de 0,003 até 0,089, enquanto as medianas dos valores de CN estão entre 26,58 e 95,56. Os resultados encontrados para cada sub-bacia diferem dos ajustados por Ferreira (2019) pelo mesmo método. Essa divergência pode estar associada à quantidade e aos diferentes critérios utilizados para a seleção dos eventos analisados.

Apesar dos parâmetros CN com melhor performance terem sido os relacionados a λ ajustado para cada sub-bacia, a performance do modelo ajustado à sub-bacia Cascata-I não apresentou resultados dentro dos limites aceitáveis para a estatística Pbias indicadas por Moriasi *et al.* (2007).

Esse fato, somado à variabilidade dos valores de CN e λ observados para diferentes eventos na mesma sub-bacia, à divergência em relação a valores disponíveis na literatura e às incertezas do presente estudo, evidenciam a necessidade de ampliação das análises apresentadas para um número maior de eventos a fim de aperfeiçoar os resultados encontrados. Nesse sentido, o desenvolvimento de estudos mais amplos, e que incluam a análise da distribuição temporal do escoamento superficial, contribuiriam para uma maior confiabilidade nos parâmetros utilizados na definição da chuva efetiva pelo método CN e, conseqüentemente, maior segurança no dimensionamento de obras hidráulicas.

REFERÊNCIAS

- AKOGLU, H. User's guide to correlation coefficients. **Turkish Journal of Emergency Medicine**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 91–93, 2018. Disponível em: Acesso em: 21 jan. 2023.
- ALLASIA, D. G. **Impacto das Incertezas no Custo de uma Rede de Macrodrenagem**. 2002. Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2002.
- ALLASIA, D. G.; VILLANUEVA, A. O. N. Custo da Incerteza na Macrodrenagem Urbana I: Determinação dos Parâmetros mais Sensíveis na Modelagem de Macrodrenagem Urbana. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 1, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 65–77, 2007. Disponível em: <http://galileu.iph.ufrgs.br/aguasurbanas>.
- ALVAREZ, C.; SANCHEZ, J. **Estudos Hidrológicos da Urbanização da Bacia do Arroio Dilúvio: Relatório Final**. Porto Alegre, RS: [s. n.], 1979.
- ALVES, J. G. **Aplicabilidade do método CN-SCS a uma bacia hidrográfica representativa dos latossolos no sul de MG**. 2016. Mestrado em Recursos Hídricos - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2016.
- ASSAYE, H. *et al.* Curve number calibration for measuring impacts of land management in sub-humid Ethiopia. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, [s. l.], v. 35, 2021.
- BAHRAMI, E. *et al.* Evaluation of SCS model for flood characteristic prediction in an ungauged catchment considering effects of excess rainfall and base flow separation. **Journal of Earth System Science**, [s. l.], v. 131, n. 1, 2022.
- BALTAS, E. A.; DERVOS, N. A.; MIMIKOU, M. A. **Hydrology and Earth System Sciences Technical Note: Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece**. **Hydrol. Earth Syst. Sci.** [S. l.: s. n.], 2007. Disponível em: www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/1825/2007/.
- BASSO, L. A.; MOREIRA, L. G. R.; PIZZATO, F. A influência da precipitação na concentração e carga de sólidos em cursos d'água urbanos: o caso do arroio Dilúvio, Porto Alegre-RS. *Em*: , 2011, Florianópolis, SC. **Geosul**. Florianópolis, SC: Geosul, v.

26, n. 52, 2011. p. 145–163. Disponível em: <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2011v26n52p145>. Acesso em: 4 nov. 2022.

BERTOTTO, L. E. *et al.* Effects of Infiltration Conditions and Rainfall Characteristics on Simulated Curve Numbers. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [s. l.], v. 147, n. 10, 2021.

BURIN, C. W. **O caso da canalização do Arroio Dilúvio em Porto Alegre: ambiente projetado x ambiente construído**. 2008. Mestrado em Arquitetura - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2008.

CAMPANA, N. A. **Impacto da Urbanização nas Cheias Urbanas**. 1995. Doutorado em Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1995.

CAMPANA, N. A.; TUCCI, C. E. M. Previsão da Vazão em Macrobacias Urbanas: Arroio Dilúvio em Porto Alegre. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 4, n. 1, [s. l.], p. 19–33, 1999.

COSTA, F. F. da. **Abordagem distribuída para simulação Chuva - Vazão e, pequenas bacias hidrográficas**. 2017. Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 2017.

CUNHA, S. F. *et al.* Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, Porto Alegre, RS, p. 837–848, 2015.

ELHAKEEN, M.; PAPANICOLAOU, A. N. Estimation of the Runoff Curve Number via Direct Rainfall Simulator Measurements in the State of Iowa, USA. **Water Resources Management**, [s. l.], v. 23, n. 12, p. 2455–2473, 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA)). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, RJ: [s. n.], 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Súmula da 10ª Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro, RJ: [s. n.], 1979.

ENDALE, D. *et al.* Curve Numbers from Conventional and No-Till Cropping: A 39-Year Dataset from a Small Georgia Piedmont Watershed. **Transactions of the ASABE**, [s. l.], v. 58, p. 379–391, 2015.

- FERREIRA, P. F. **Tempo de concentração e parâmetros da metodologia da Curva Número: Uma avaliação para bacias brasileiras**. 2019. Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Federal de Santa Maria: Santa Maria, Santa Maria, RS, 2019.
- FUJIMOTO, N. S. V. M. Implicações Ambientais na Área Metropolitana de Porto Alegre-RS: um estudo geográfico com ênfase na Geomorfologia Urbana. **Revista GEOUSP - Espaço e Tempo**, n. 12, São Paulo, SP, p. 141–177, 2002.
- GONZATTO, M. **Más condições do Arroio Dilúvio e falta de luz em casas de bombas agravam alagamentos em Porto Alegre**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/porto-alegre/noticia/2022/01/mas-condicoes-do-arroio-diluvio-e-falta-de-luz-em-casas-de-bombas-agravam-alagamentos-em-porto-alegre-ckyhg8s3b00aq015p08erzll3.html>. Acesso em: 6 nov. 2022.
- GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. **Journal of Hydrologic Engineering**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 135–143, 1999.
- HASENAK, H. *et al.* **Diagnóstico Ambiental de Porto Alegre: Geologia, Solos, Drenagem, Vegetação/Ocupação e Paisagem**. 1ª Ed.ed. Porto Alegre, RS: Secretaria Municipal do Meio Ambiente, 2008.
- HAWKINS, R. H. Asymptotic Determination of Runoff Curve Numbers from Data. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [s. l.], v. 119, n. 2, p. 334–345, 1993.
- HAWKINS, R. H. *et al.* **Curve number hydrology: state of the practice**. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2009.
- HAWKINS, R. H.; HJELMFELT, A. T. J.; ZEVENBERGEN, A. W. Runoff Probability, Storm Depth, and Curve Numbers. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [s. l.], v. 111, n. 4, 1985.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA DO BRASIL (INMET). **Normais Climatológicas (1961/1990): Estação PORTO ALEGRE (83967) - RS**. [S. l.: s. n.], 2022.
- JIANG, R. **Investigation of Runoff Curve Number Initial Abstraction Ratio**. 2001. Mestrado em Ciência com especialização em Gestão de Bacias Hidrográficas - The

University of Arizona, Tucson, AZ, EUA, 2001. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10150/191301>.

LAUTHARTE, S. L. **Verificação do modelo de hidrograma unitário do SCS para sub-bacias hidrográficas de Porto Alegre**. 2015. Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2015.

LEOTTI, V. B.; COSTER, R.; RIBOLDI, J. Normalidade de variáveis: métodos de verificação e comparação de alguns testes não-paramétricos por simulação. **Revista HCPA**, Porto Alegre, RS, v. 32, n. 2, p. 227–234, 2012.

LIMA, L. M. M. de. **Mapeamento da suscetibilidade à inundação na bacia hidrográfica do Arroio do Salso, Porto Alegre-RS**. 2010. Dissertação de Mestrado em Geografia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2010.

LOPES, M. S.; SANCHEZ, J. **Avaliação do impacto hidrológico causado pela urbanização de uma bacia: Relatório Final FINEP**. Porto Alegre, RS: [s. n.], 1986.

MACIEL, J. M. Melhoria de Porto Alegre. **Revista EGATEA**, v. 1, Porto Alegre, RS, p. 124–128, 1914.

MENEGAT, R. *et al.* **Atlas Ambiental de Porto Alegre**. 2ª Ed.ed. Porto Alegre, RS: UFRGS, 1999.

MISHRA, S. K. *et al.* Comparison of AMC-dependent CN-conversion formulae. **Water Resources Management**, [s. l.], v. 22, n. 10, p. 1409–1420, 2008.

MISHRA, S. K.; SINGH, V. P. SCS-CN Method. *Em*: SOIL CONSERVATION SERVICE CURVE NUMBER (SCS-CN) METHODOLOGY. WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY LIBRARY. [S. l.]: Springer, Dordrecht, 2003. v. 42. *E-book*. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-0147-1_2#citeas.

MORANDI, I. C.; FARIA, C. M. Dificil recuperação de arroios em áreas urbanas: Arroio Dilúvio. *Em*: , 2000, Goiânia, GO. **XXVI Congresso Intramericano de Engenharia Santária e Ambiental**. Goiânia, GO: [s. n.], 2000. p. 1–14.

MORIASI, D. N. *et al.* Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions of the ASABE**, [s. l.], v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

MULLEM, V. A. J. *et al.* Runoff Curve Number Method: Beyond the Handbook. *Em:* , 2002, Las Vegas, NV, EUA. **Federal interagency Hydrologic modeling Conference, 2.** Las Vegas, NV, EUA: NOAA, 2002.

NAKAYAMA, P. T. *et al.* Avaliação do parâmetro CN do método de Soil Conservation Service (SCS) nas bacias do Ribeirão dos Marins e Córrego Bussocaba – Estado de São Paulo. *Em:* , 2011, Maceió, AL. **Anais [...].** Maceió, AL: [s. n.], 2011.

NEJADHASHEMI, A. P. *et al.* Case Study: Evaluation of Streamflow Partitioning Methods. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [s. l.], v. 135, n. 6, p. 791–801, 2009.

NERY, J. T.; VARGAS, W. M.; MARTINS, M. de L. O. F. Variabilidade interanual da precipitação do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 49–62, 1997.

NETTO, A. L. C. Hidrologia de Encosta na Interface com a Geomorfologia. *Em:* CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. (org.). **Geomorfologia: exercícios, técnicas e aplicações.** Rio de Janeiro, RJ: Ed. Bertrand Brasil, 1996. p. 103–138.

PHILIPP, R. P.; VARGAS, J. A.; BENEDETTI, V. di. A memória geológica do centro antigo de Porto Alegre: o registro da evolução urbana nos prédios históricos e no urbanismo da cidade. **Portal de Periódicos UFRGS**, [s. l.], v. 36, n. 1, p. 59–77, 2009.

PONCE, V. M.; HAWKINS, R. H. Runoff Curve Number: Has It Reached Maturity?. **Journal of Hydrologic Engineering**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 11–19, 1996.

POTT, C. A.; DE MARIA, I. C. Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 27, n. 1, [s. l.], p. 19–27, 2003.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE; INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. **Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre. Volume VI: Manual de Drenagem Urbana.** Porto Alegre, RS: DEP, 2005.

PROJETO MAPBIOMAS. **Coleção 7: Mapa de Cobertura e Uso da Terra do Brasil de 1985.** [S. l.], 2022. Disponível em: https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/brasil/collection-6/lclu/coverage/brasil_coverage_1985.tif. Acesso em: 11 nov. 2022.

RIO GRANDE DO SUL. DEPARTAMENTO DE ESGOTOS PLUVIAIS (DEP). **Relatório Final - Bacia do Arroio Dilúvio: Plano Diretor de Drenagem Urbana (3ª etapa), atualização e complementação cadastral no município de Porto Alegre.** Porto Alegre: Consórcio Rhama e Perfil, 2014.

RIO GRANDE DO SUL. SECRETARIA DE PLANEJAMENTO, G. E. G. (SPGG). **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul.** 7ª Ed.ed. Porto Alegre: Departamento de Planejamento Governamental, 2020.

RSTUDIO TEAM. **RStudio: Integrated Development for R. RStudio.** Boston, MA: RStudio, PBC., 2020.

SANTOS, V. M. dos. **Caracterização dos sedimentos do Arroio Dilúvio e avaliação do potencial de fitorremediação por plantas espontâneas do sistema para a carga de elementos potencialmente tóxicos.** 2019. Mestrado em Ciência do Solo - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2019.

SANTOS, V. M. dos; ANDRADE, L. C. de; CAMARGO, F. A. de O. A história ambiental do Arroio Dilúvio. **FEPAM em Revista**, v. 14, Porto Alegre, RS, p. 5–16, 2021.

SARTORI, A. **Avaliação da Classificação Hidrológica do Solo para a Determinação do Excesso de Chuva do Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos.** 2004. Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2004.

SARTORI, A.; NETO, F. L.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos.** v.10, n.4, [s. l.], p. 05–18, 2005.

SECRETARIA DO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (SEMA). **G080 - Bacia Hidrográfica do Lago Guaíba.** [S. l.], 2022. Disponível em: <https://sema.rs.gov.br/g080-bh-guaiba>. Acesso em: 4 nov. 2022.

SECRETARIA MUNICIPAL DO MEIO AMBIENTE E DA SUSTENTABILIDADE (SMAM). **Parque Natural Municipal Saint’Hilaire.** [S. l.], 2022. Disponível em: http://www2.portoalegre.rs.gov.br/smam/default.php?p_secao=157. Acesso em: 5 nov. 2022.

SHI, Z. H. *et al.* Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China. **Catena**, [s. l.], v. 77, n. 1, p. 1–7, 2009.

SILVA, K. M. P. da. **Análise da morfologia original do Arroio Dilúvio, município de Porto Alegre - RS**. 2019. Mestrado em Geografia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2019.

SILVEIRA, A. L. **Contribution a l'étude hydrologique d'un bassin semi-urbanisé dans le Brésil subtropical: Bassin de l'arroio Dilúvio a Porto Alegre**. 1996. Doutorado em Geociências - Université Montpellier II. Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, França, 1996.

SILVEIRA, A. L. L. da *et al.* **Programa de Revitalização da Bacia do Arroio Dilúvio: Plano de Ação**. Porto Alegre: [s. n.], 2012.

SILVEIRA, A. L. L. da. Provável efeito urbano nas IDF das chuvas de Porto Alegre. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 2, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 93–107, 1997.

SINGH, J. *et al.* Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, [s. l.], v. 41, p. 343–360, 2005.

SOULIS, K. X.; VALIANTZAS, J. D. SCS-CN parameter determination using rainfall-runoff data in heterogeneous watersheds-the two-CN system approach. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s. l.], v. 16, n. 3, p. 1001–1015, 2012.

TASSI, R. *et al.* Determinação do Parâmetro CN Para Sub-Bacias Urbanas do Arroio Dilúvio - Porto Alegre/RS. *Em:* , 2006, Curitiba, PR. **Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste, 1**. Curitiba, PR: [s. n.], 2006. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/237756403>.

THOMAS, W. O.; MONDE, M. C.; DAVIS, S. R. . Estimation of Time of Concentration for Maryland Streams. **Transportation Research Record**, [s. l.], v. 1720, n. 1, p. 95–99, 2000.

TUCCI, C. E. M. Escoamento Superficial. *Em:* HIDROLOGIA CIÊNCIA E APLICAÇÃO. 4. ed. Porto Alegre, RS: ABRH - UFRGS, 2012. v. 1, p. 391–441.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**. Brasília, DF: Ministério das Cidades e Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, 2005a.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2ª ed.ed. Porto Alegre, RS: ABRH-UFRGS, 2005b.

TUCCI, C. E. M.; VILLANUEVA, A.; CRUZ, M. A. S. **Banco de eventos de cheias de bacias urbanas brasileiras**. Porto Alegre: UFRGS, 1998.

USBR - UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION. **Design of Small Dams**. México, D.F.: [s. n.], 1977.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Section 4, Hydrology. *Em*: NATIONAL ENGINEERING HANDBOOK. [S. l.: s. n.], 1969.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Section 4, Hydrology. *Em*: NATIONAL ENGINEERING HANDBOOK. [S. l.: s. n.], 1976.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Section 4, Hydrology. *Em*: NATIONAL ENGINEERING HANDBOOK. [S. l.: s. n.], 1985.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Technical Release 55 (TR-55): Urban Hydrology of Small Watersheds**. [S. l.: s. n.], 1986.

USDA; NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. Chapter 10: Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. *Em*: NATIONAL ENGINEERING HANDBOOK SECTION 4 - PART 630, HYDROLOGY. [S. l.]: United States Department of Agriculture, 2004.

VALLE JUNIOR, L. C. G. do; RODRIGUES, D. B. B.; OLIVEIRA, P. T. S. de. Initial abstraction ratio and Curve Number estimation using rainfall and runoff data from a tropical watershed. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 24, n. 5, [s. l.], v. 24, 2019.

VEECK, S. **Modelage Hidrológica de pequenas Bacias Hidrográficas a partir de dados de elevação obtidos por lidar**. 2018. Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 2018.

WESCHENFELDER, A. B. *et al.* Generation of IDF curves for projected scenarios in the city of Porto Alegre/RS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 34, n. 2, p. 201–216, 2019.

WOODWARD, D. E. *et al.* Runoff curve number method: examination of the initial abstraction ratio. *Em:* , 2003, Tucson, AZ, EUA. **World water & environmental resources congress 2003**. Tucson, AZ, EUA: [s. n.], 2003. p. 1–10.

ZHANG, R. *et al.* Baseflow separation in a small watershed in New Brunswick, Canada, using a recursive digital filter calibrated with the conductivity mass balance method. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 27, n. 18, p. 2659–2665, 2013.

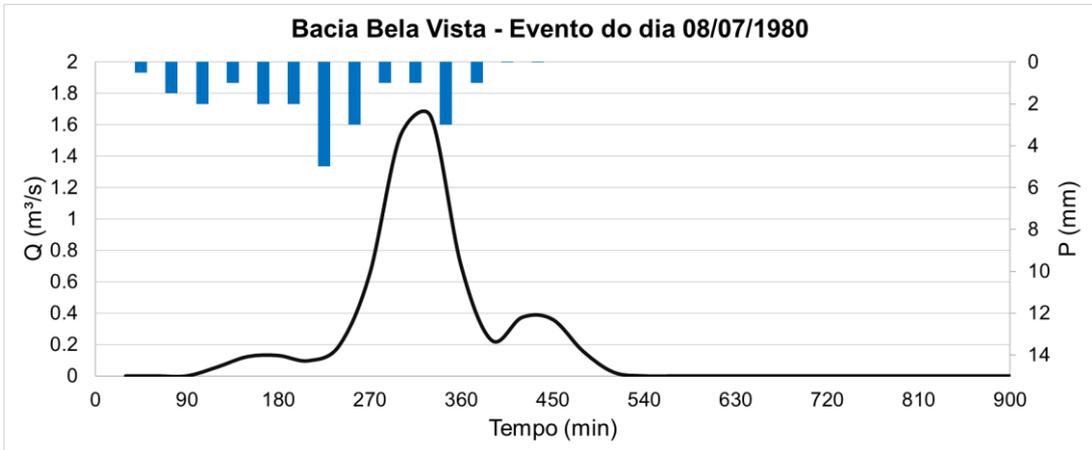
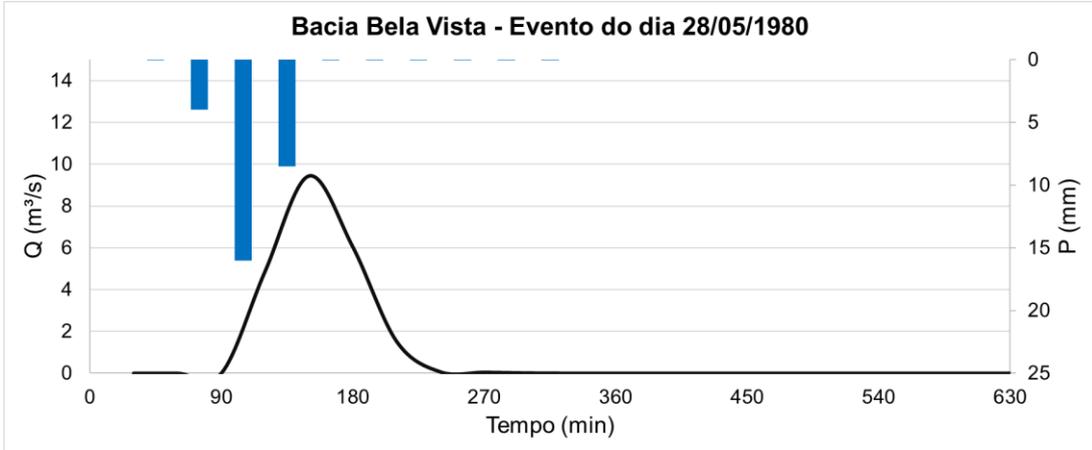
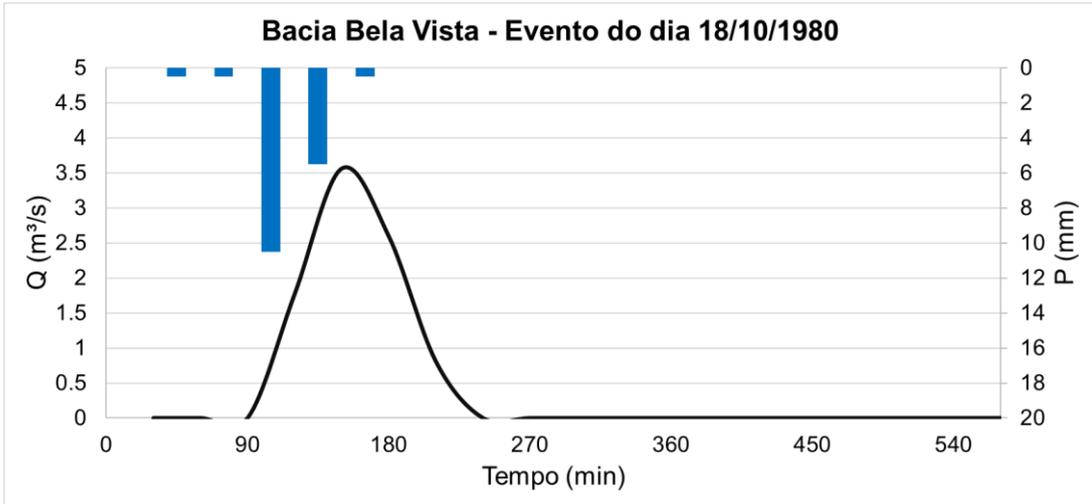
APÊNDICE A

HIDROGRAMAS DOS EVENTOS UTILIZADOS PARA AJUSTE DOS PARÂMETROS DO MÉTODO DA CURVA NÚMERO

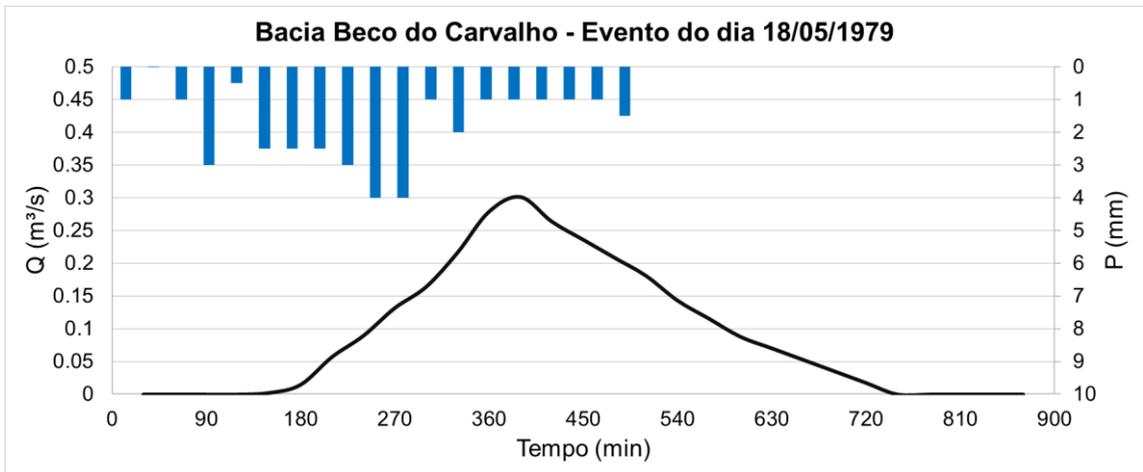
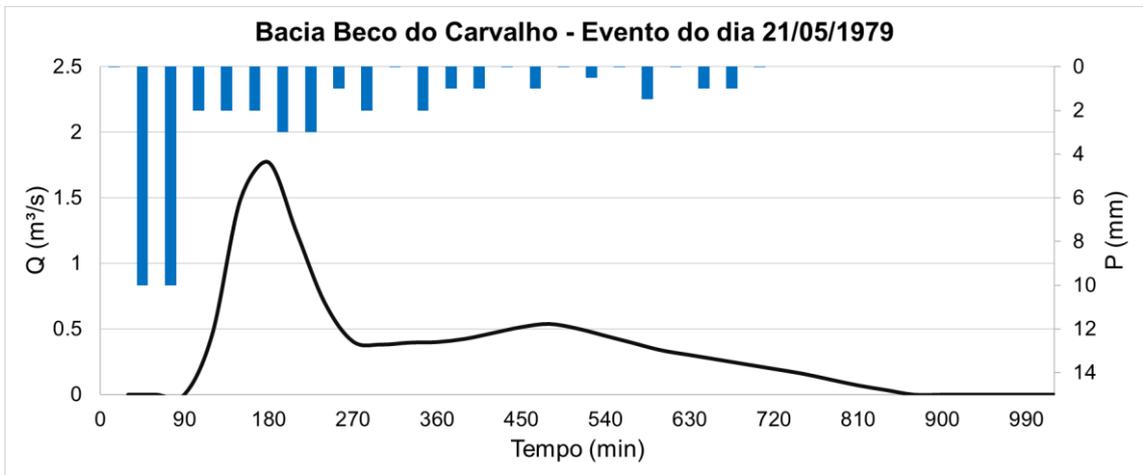
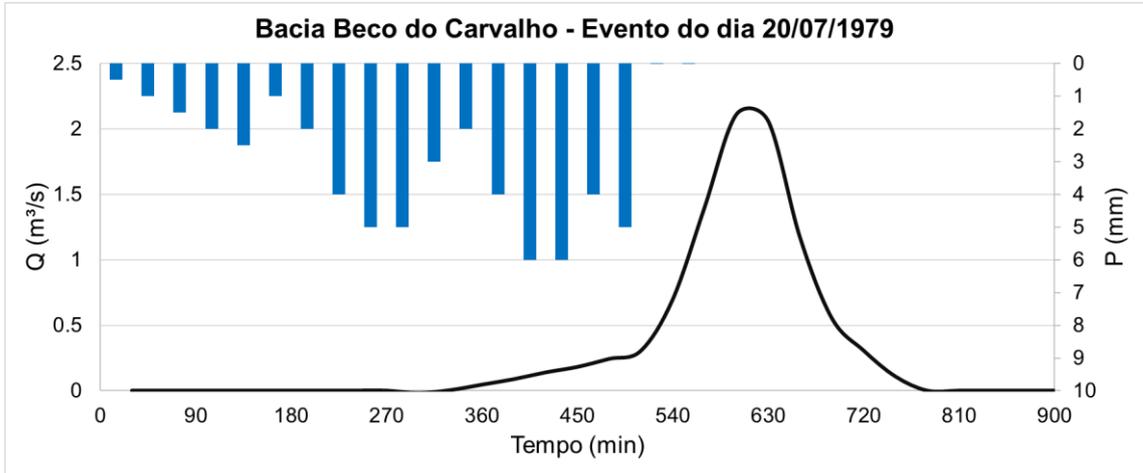
HIDROGRAMA DE EVENTOS DA BACIA BELA VISTA

LEGENDA

- █ Precipitação
- Hidrograma Observado

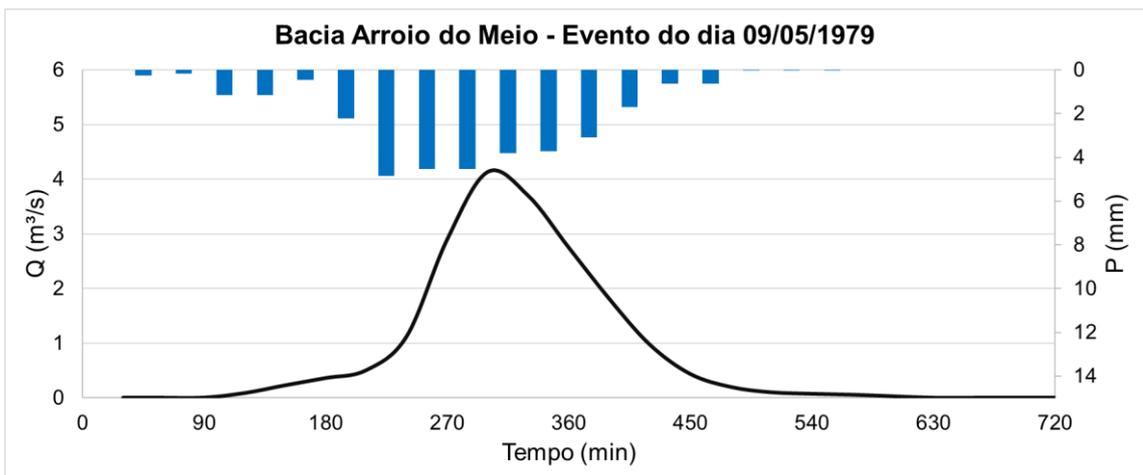
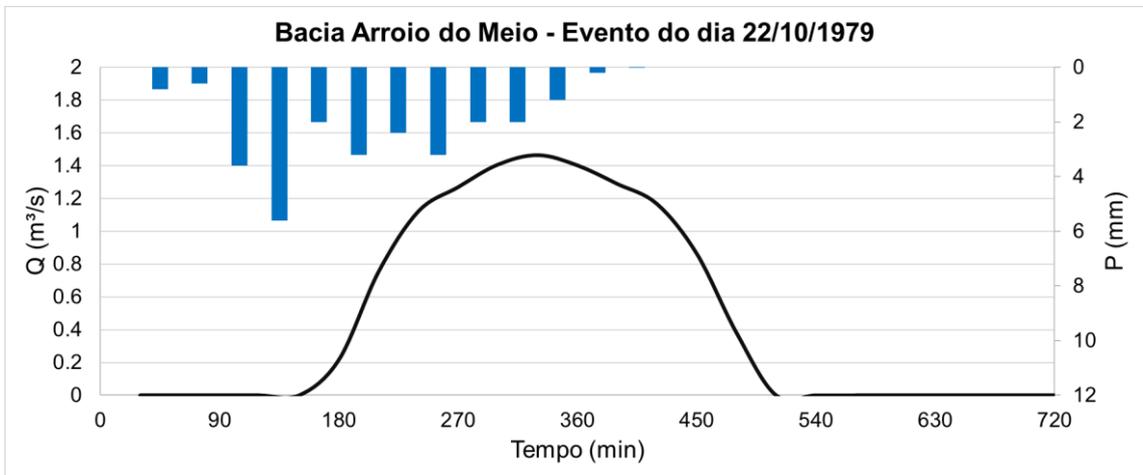
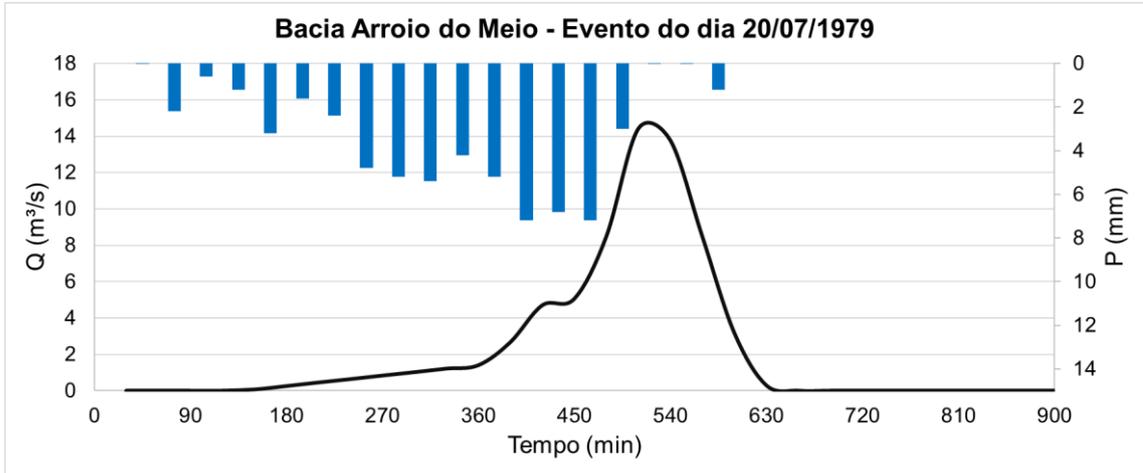


HIDROGRAMA DE EVENTOS DA BACIA BECO DO CARVALHO



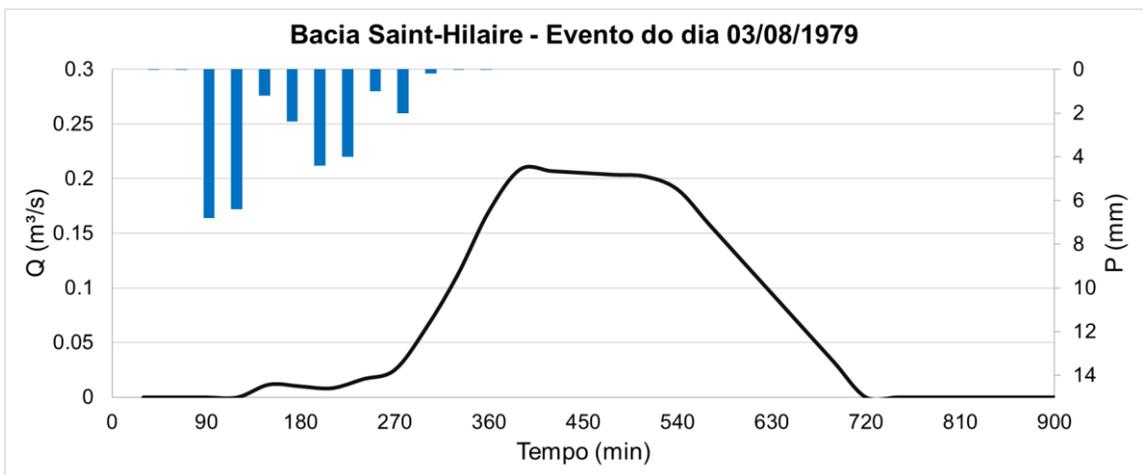
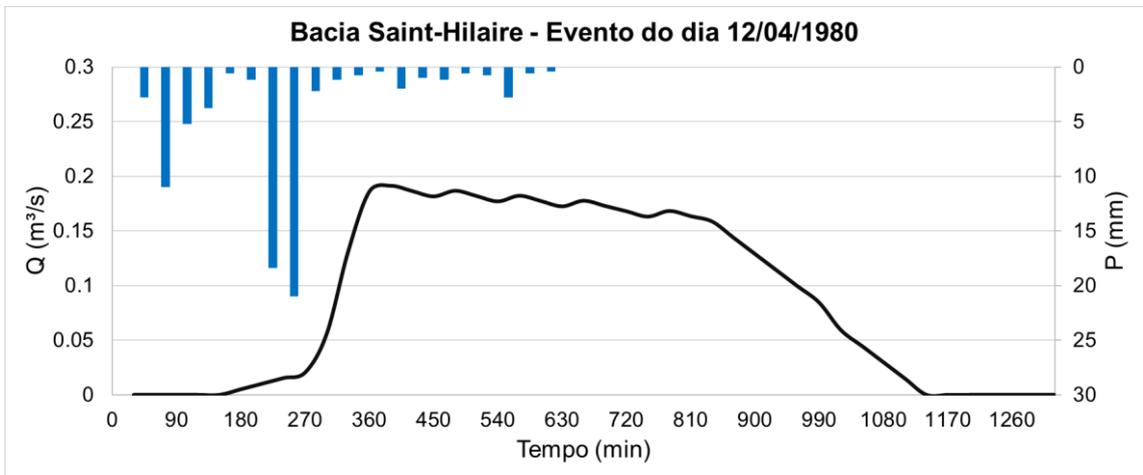
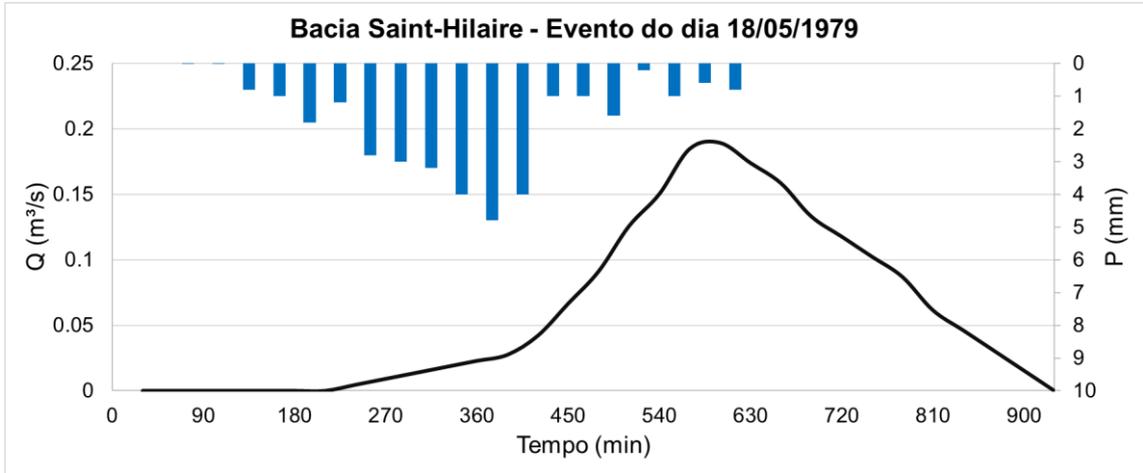
Fonte: Elaborado pelo autor.

HIDROGRAMA DE EVENTOS DA BACIA ARROIO DO MEIO



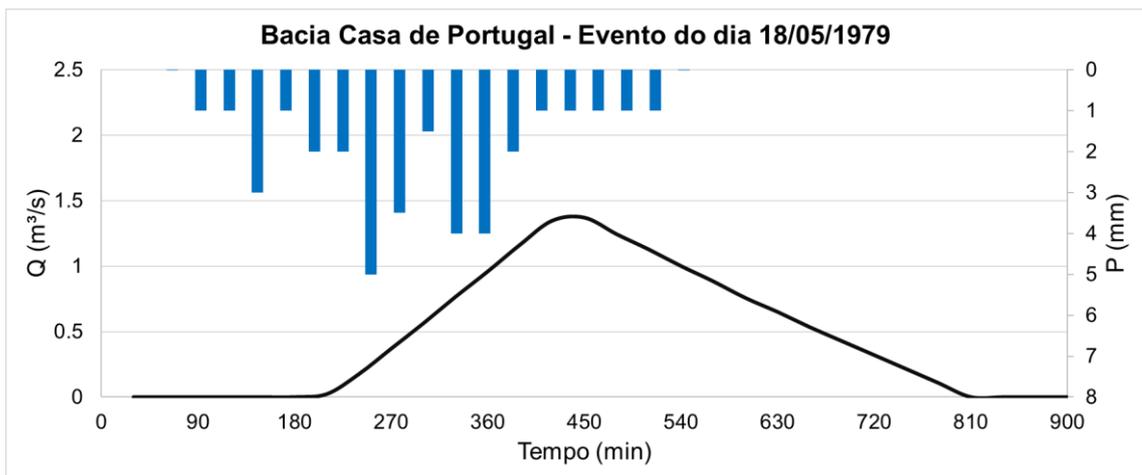
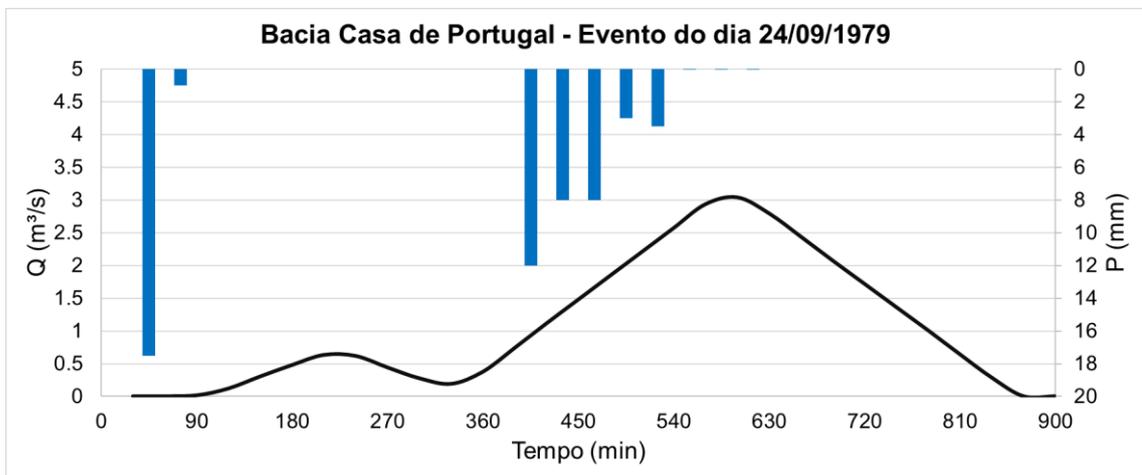
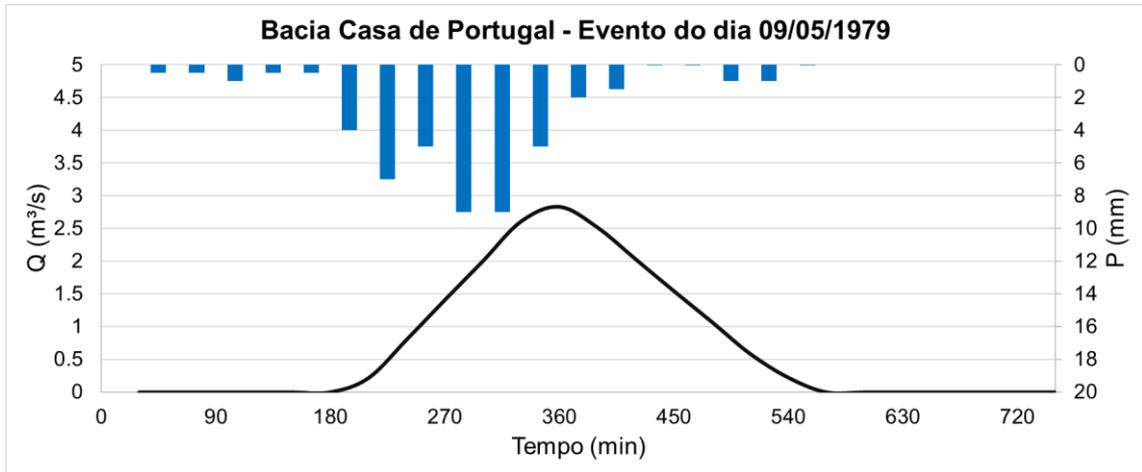
Fonte: Elaborado pelo autor.

HIDROGRAMA DE EVENTOS DA BACIA SAINT-HILAIRE



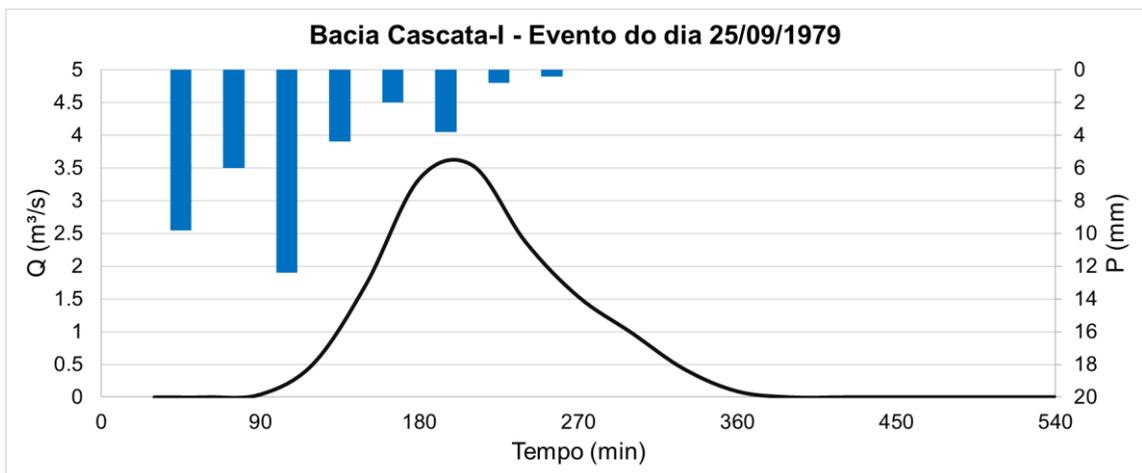
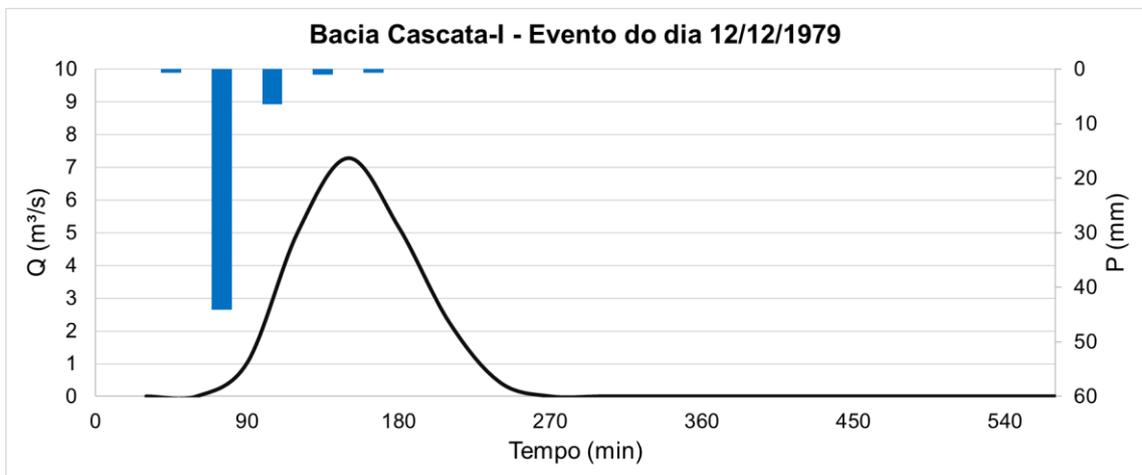
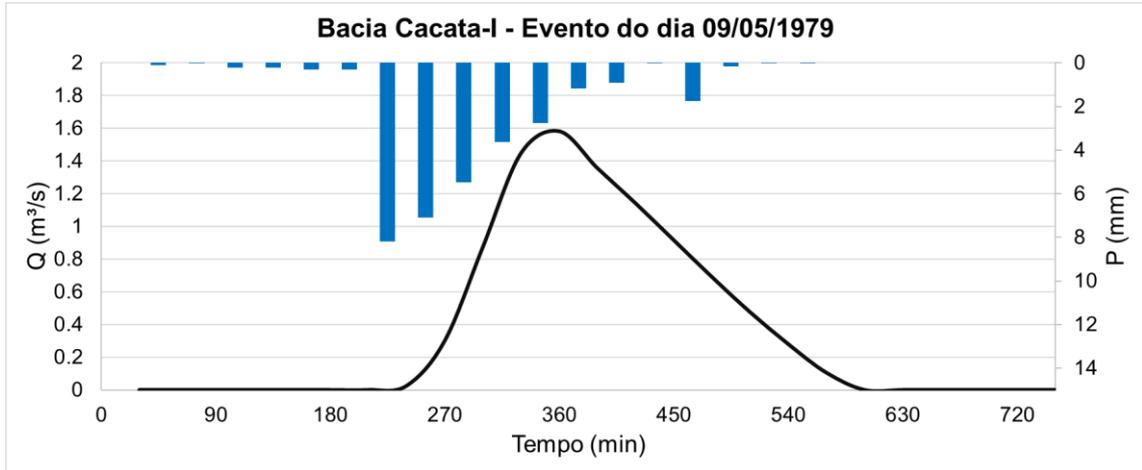
Fonte: Elaborado pelo autor.

HIDROGRAMA DE EVENTOS DA BACIA CASA PORTUGAL



Fonte: Elaborado pelo autor.

HIDROGRAMA DE EVENTOS DA BACIA CASCATA-I



Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B

DETALHAMENTO DO CÁLCULO DO CN TABELADO

CÁLCULO DO CN MÉDIO - BACIA BELA VISTA											
CLASSES USO E COBERTURA		CX		PV1		PV2		SG1		SG2	
CLASSE	USO	Área	CN								
3	Formação Florestal	0.00 km ²	76	0.01 km ²	60	0.00 km ²	70	0.00 km ²	76	0.00 km ²	76
24	Área Urbanizada	0.00 km ²	95	1.86 km ²	92	0.20 km ²	94	0.42 km ²	95	0.00 km ²	95
Soma Área*CN:		0.00		171.42		18.52		40.00		0.00	
Área Total:		0.000 km ²		1.865 km ²		0.197 km ²		0.421 km ²		0.000 km ²	
CN Médio Bacia:		92.60									

CÁLCULO DO CN MÉDIO - BACIA BECO CARVALHO											
CLASSES USO E COBERTURA		CX		PV1		PV2		SG1		SG2	
CLASSE	USO	Área	CN								
3	Formação Florestal	0.35 km ²	76	0.00 km ²	60	0.39 km ²	70	0.04 km ²	76	0.00 km ²	76
11	Campo Alagado e Área Pantanosa	0.03 km ²	88	0.00 km ²	67	0.00 km ²	81	0.00 km ²	88	0.00 km ²	88
12	Formação Campestre	0.24 km ²	79	0.03 km ²	60	0.23 km ²	73	0.07 km ²	79	0.00 km ²	79
21	Mosaico de Agricultura e Pastagem	0.02 km ²	84	0.00 km ²	69	0.00 km ²	79	0.01 km ²	84	0.00 km ²	84
24	Área Urbanizada	0.11 km ²	95	0.49 km ²	92	1.02 km ²	94	0.19 km ²	95	0.01 km ²	95
25	Outras Áreas não Vegetadas	0.13 km ²	89	0.01 km ²	79	0.07 km ²	86	0.02 km ²	89	0.00 km ²	89
33	Rio, Lago e Oceano	0.01 km ²	100	0.00 km ²	100						
Soma Área*CN:		72.28		47.43		145.83		29.14		0.57	
Área Total:		0.883 km ²		0.527 km ²		1.708 km ²		0.329 km ²		0.006 km ²	
CN Médio Bacia:		85.50									

CÁLCULO DO CN MÉDIO - BACIA ARROIO DO MEIO											
CLASSES USO E COBERTURA		CX		PV1		PV2		SG1		SG2	
CLASSE	USO	Área	CN								
3	Formação Florestal	0.67 km ²	76	0.00 km ²	60	0.02 km ²	70	0.00 km ²	76	0.00 km ²	76
11	Campo Alagado e Área Pantanosa	0.01 km ²	88	0.00 km ²	67	0.00 km ²	81	0.00 km ²	88	0.00 km ²	88
12	Formação Campestre	1.24 km ²	79	0.00 km ²	60	0.01 km ²	73	0.00 km ²	79	0.00 km ²	79
21	Mosaico de Agricultura e Pastagem	0.04 km ²	84	0.00 km ²	69	0.00 km ²	79	0.00 km ²	84	0.00 km ²	84
24	Área Urbanizada	0.37 km ²	95	1.04 km ²	92	0.96 km ²	94	0.39 km ²	95	0.02 km ²	95
25	Outras Áreas não Vegetadas	0.36 km ²	89	0.00 km ²	79	0.06 km ²	86	0.00 km ²	89	0.00 km ²	89
33	Rio, Lago e Oceano	0.00 km ²	100								
41	Outras Lavouras Temporárias	0.01 km ²	88	0.00 km ²	76	0.00 km ²	84	0.00 km ²	88	0.00 km ²	88
Soma Área*CN:		221.39		95.31		95.92		37.43		2.09	
Área Total:		2.702 km ²		1.036 km ²		1.030 km ²		0.394 km ²		0.022 km ²	
CN Médio Bacia:		87.22									

CÁLCULO DO CN MÉDIO - BACIA CASCATA 1											
CLASSES USO E COBERTURA		CX		PV1		PV2		SG1		SG2	
CLASSE	USO	Área	CN								
3	Formação Florestal	1.36 km ²	76	0.17 km ²	60	0.14 km ²	70	0.00 km ²	76	0.00 km ²	76
11	Campo Alagado e Área Pantanosa	0.01 km ²	88	0.00 km ²	67	0.00 km ²	81	0.00 km ²	88	0.00 km ²	88
12	Formação Campestre	0.93 km ²	79	0.02 km ²	60	0.03 km ²	73	0.00 km ²	79	0.00 km ²	79
21	Mosaico de Agricultura e Pastagem	0.04 km ²	84	0.00 km ²	69	0.00 km ²	79	0.00 km ²	84	0.00 km ²	84
24	Área Urbanizada	1.08 km ²	95	2.55 km ²	92	1.07 km ²	94	0.00 km ²	95	0.00 km ²	95
25	Outras Áreas não Vegetadas	0.43 km ²	89	0.05 km ²	79	0.07 km ²	86	0.00 km ²	89	0.00 km ²	89
Soma Área*CN:		321.31		250.01		117.85		0.00		0.00	
Área Total:		3.843 km ²		2.792 km ²		1.301 km ²		0.000 km ²		0.000 km ²	
CN Médio Bacia:		86.84									

Fonte: Elaborado pelo autor.

CÁLCULO DO CN MÉDIO - BACIA CASA DE PORTUGAL											
CLASSES USO E COBERTURA		CX		PV1		PV2		SG1		SG2	
CLASSE	USO	Área	CN								
3	Formação Florestal	1.08 km ²	76	0.00 km ²	60	2.57 km ²	70	0.00 km ²	76	0.02 km ²	76
12	Formação Campestre	0.80 km ²	79	0.00 km ²	60	1.05 km ²	73	0.00 km ²	79	0.02 km ²	79
21	Mosaico de Agricultura e Pastagem	0.01 km ²	84	0.00 km ²	69	0.01 km ²	79	0.00 km ²	84	0.00 km ²	84
24	Área Urbanizada	0.02 km ²	95	0.00 km ²	92	0.60 km ²	94	0.00 km ²	95	0.01 km ²	95
25	Outras Áreas não Vegetadas	0.14 km ²	89	0.00 km ²	79	0.25 km ²	86	0.00 km ²	89	0.00 km ²	89
33	Rio, Lago e Oceano	0.00 km ²	100	0.00 km ²	100	0.01 km ²	100	0.00 km ²	100	0.00 km ²	100
41	Outras Lavouras Temporárias	0.00 km ²	88	0.00 km ²	76	0.02 km ²	84	0.00 km ²	88	0.00 km ²	88
Soma Área*CN:		160.11		0.00		337.07		0.00		3.67	
Área Total:		2.045 km ²		0.000 km ²		4.502 km ²		0.000 km ²		0.046 km ²	
CN Médio Bacia:		75.97									

CÁLCULO DO CN MÉDIO - BACIA SAINT HILAIRE											
CLASSES USO E COBERTURA		CX		PV1		PV2		SG1		SG2	
CLASSE	USO	Área	CN								
3	Formação Florestal	0.00 km ²	76	0.00 km ²	60	3.88 km ²	70	0.00 km ²	76	0.00 km ²	76
9	Silvicultura	0.00 km ²	84	0.00 km ²	68	0.02 km ²	78	0.00 km ²	84	0.00 km ²	84
11	Campo Alagado e Área Pantanosa	0.00 km ²	88	0.00 km ²	67	0.26 km ²	81	0.00 km ²	88	0.00 km ²	88
12	Formação Campestre	0.00 km ²	79	0.00 km ²	60	1.21 km ²	73	0.00 km ²	79	0.00 km ²	79
21	Mosaico de Agricultura e Pastagem	0.00 km ²	84	0.00 km ²	69	0.11 km ²	79	0.00 km ²	84	0.00 km ²	84
24	Área Urbanizada	0.00 km ²	95	0.00 km ²	92	0.84 km ²	94	0.00 km ²	95	0.00 km ²	95
25	Outras Áreas não Vegetadas	0.00 km ²	89	0.00 km ²	79	0.05 km ²	86	0.00 km ²	89	0.00 km ²	89
33	Rio, Lago e Oceano	0.00 km ²	100	0.00 km ²	100	0.01 km ²	100	0.00 km ²	100	0.00 km ²	100
Soma Área*CN:		0.00		0.00		475.45		0.00		0.20	
Área Total:		0.000 km ²		0.000 km ²		6.379 km ²		0.000 km ²		0.002 km ²	
CN Médio Bacia:		74.54									

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE C

EVENTOS SELECIONADOS PARA ANÁLISE DE PERFORMANCE DOS MODELOS

EVENTOS SELECIONADOS PARA ANÁLISE DE PERFORMANCE						
Sub-bacia	Data do Evento	P (mm)	Q (mm)	Desv. Padrão Q	AMC	TR (anos)
Bela Vista	17/08/1980	33.50	21.46	9.29	I	0.19
	11/06/1980	23.04	6.00		I	0.01
	22/10/1979	17.50	4.82		I	0.01
Beco Carvalho	09/05/1979	41.51	2.91	1.30	I	0.20
	24/06/1979	37.53	1.17		I	0.09
	22/10/1979	26.56	0.37		I	0.02
Arroio do Meio	12/04/1980	50.03	42.76	21.60	III	0.54
	31/01/1980	31.54	1.79		I	0.04
	03/08/1979	40.41	10.37		I	0.24
Saint-Hilaire	16/02/1980	20.80	0.39	0.05	I	0.04
	31/08/1980	16.91	0.33		I	0.02
	08/11/1980	29.31	0.44		II	0.04
Casa Portugal	03/08/1979	44.02	5.52	2.53	I	0.96
	25/09/1979	34.53	5.00		I	0.59
	22/10/1979	28.54	0.89		I	0.11
Cascata-I	29/04/1979	26.75	1.30	0.65	I	0.03
	17/11/1979	28.53	2.59		II	0.04
	18/05/1979	39.00	1.75		I	0.13

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE D
SIMULAÇÕES DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL PARA A ANÁLISE DE PERFORMANCE

Sub-bacia	Data do Evento	P (mm)	Qobs (mm)	CN TABELADO				CN PARA λ DE 20%			
				CN (II)	S evento (mm)	λ	Qsim (mm)	CN (II)	S evento (mm)	λ	Qsim (mm)
Bela Vista	17/08/1980	92.60	46.28	92.60	46.28	0.20	8.33	97.09	17.37	0.20	19.02
	11/06/1980	0.00	46.28	92.60	46.28	0.20	3.16	97.09	17.37	0.20	10.36
	22/10/1979	0.00	46.28	92.60	46.28	0.20	1.25	97.09	17.37	0.20	6.27
Beco Carvalho	09/05/1979	85.50	98.22	85.50	98.22	0.20	3.98	81.31	133.16	0.20	1.50
	24/06/1979	0.00	98.22	85.50	98.22	0.20	2.76	81.31	133.16	0.20	0.82
	22/10/1979	0.00	98.22	85.50	98.22	0.20	0.45	81.31	133.16	0.20	0.00
Arroio do Meio	12/04/1980	87.22	15.89	87.22	15.89	0.20	34.98	91.71	9.80	0.20	39.93
	31/01/1980	0.00	84.91	87.22	84.91	0.20	2.13	91.71	52.37	0.20	6.04
	03/08/1979	0.00	84.91	87.22	84.91	0.20	5.07	91.71	52.37	0.20	10.89
Saint-Hilaire	16/02/1980	74.54	197.87	74.54	197.87	0.20	1.97	82.52	122.71	0.20	0.12
	31/08/1980	0.00	197.87	74.54	197.87	0.20	2.93	82.52	122.71	0.20	0.51
	08/11/1980	0.00	86.75	74.54	86.75	0.20	1.45	82.52	53.79	0.20	4.76
Casa Portugal	03/08/1979	75.97	183.30	75.97	183.30	0.20	0.28	85.55	97.85	0.20	4.89
	25/09/1979	0.00	183.30	75.97	183.30	0.20	0.03	85.55	97.85	0.20	1.98
	22/10/1979	0.00	183.30	75.97	183.30	0.20	0.38	85.55	97.85	0.20	0.75
Cascata-I	29/04/1979	86.84	87.79	86.84	87.79	0.20	0.87	85.38	99.25	0.20	0.45
	17/11/1979	0.00	38.49	86.84	38.49	0.20	7.32	85.38	43.51	0.20	6.21
	18/05/1979	0.00	87.79	86.84	87.79	0.20	4.21	85.38	99.25	0.20	3.10

VALORES ESCOAMENTO SUPERFICIAL PARA EVENTOS DA ANÁLISE DE PERFORMANCE

Sub-bacia	Data do Evento	P (mm)	Qobs (mm)	CN PARA λ DE 5%				CN - λ ANÁLISE DO EVENTO				CN - λ AJUSTE DO MODELO			
				CN (II)	S evento (mm)	λ	Qsim (mm)	CN (II)	S evento (mm)	λ	Qsim (mm)	CN (II)	S evento (mm)	λ	Qsim (mm)
Bela Vista	17/08/1980	92.60	46.28	95.75	25.73	0.05	17.91	95.56	26.94	0.037	17.77	95.01	30.41	0.007	17.40
	11/06/1980	0.00	46.28	95.75	25.73	0.05	9.97	95.56	26.94	0.037	9.92	95.01	30.41	0.007	9.79
	22/10/1979	0.00	46.28	95.75	25.73	0.05	6.27	95.56	26.94	0.037	6.27	95.01	30.41	0.007	6.27
Beco Carvalho	09/05/1979	85.50	98.22	66.57	290.92	0.05	2.29	61.60	361.12	0.089	0.24	42.51	783.66	0.000	2.09
	24/06/1979	0.00	98.22	66.57	290.92	0.05	1.68	61.60	361.12	0.089	0.08	42.51	783.66	0.000	1.71
	22/10/1979	0.00	98.22	66.57	290.92	0.05	0.48	61.60	361.12	0.089	0.09	42.51	783.66	0.000	0.87
Arroio do Meio	12/04/1980	87.22	15.89	86.41	17.06	0.05	36.51	86.59	16.79	0.031	36.96	82.72	22.65	0.007	34.30
	31/01/1980	0.00	84.91	86.41	91.12	0.05	6.17	86.59	89.71	0.031	6.97	82.72	121.00	0.007	6.22
	03/08/1979	0.00	84.91	86.41	91.12	0.05	10.12	86.59	89.71	0.031	11.10	82.72	121.00	0.007	9.76
Saint-Hilaire	16/02/1980	74.54	197.87	60.89	372.06	0.05	0.01	60.89	1600.29	0.008	0.03	22.46	2000.00	0.001	0.19
	31/08/1980	0.00	197.87	60.89	372.06	0.05	0.01	60.89	1600.29	0.008	0.01	22.46	2000.00	0.001	0.12
	08/11/1980	0.00	86.75	60.89	163.11	0.05	2.43	60.89	701.57	0.008	0.76	22.46	876.81	0.001	0.91
Casa Portugal	03/08/1979	75.97	183.30	76.07	182.28	0.05	5.61	73.48	209.08	0.024	6.13	70.04	247.86	0.010	5.95
	25/09/1979	0.00	183.30	76.07	182.28	0.05	3.11	73.48	209.08	0.024	3.65	70.04	247.86	0.010	3.66
	22/10/1979	0.00	183.30	76.07	182.28	0.05	1.87	73.48	209.08	0.024	2.38	70.04	247.86	0.010	2.47
Cascata-I	29/04/1979	86.84	87.79	72.43	220.50	0.05	1.05	56.94	438.19	0.003	1.41	60.64	376.13	0.011	1.29
	17/11/1979	0.00	38.49	72.43	96.67	0.05	4.67	56.94	192.10	0.003	3.57	60.64	164.90	0.011	3.73
	18/05/1979	0.00	87.79	72.43	220.50	0.05	3.15	56.94	438.19	0.003	3.01	60.64	376.13	0.011	2.97

Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXO A

CLASSIFICAÇÃO HIDROLÓGICA DE SOLOS BRASILEIROS

Grupo Hidrológico A	<ul style="list-style-type: none"> • Solos muito profundos (prof. > 200 cm) ou profundos (100 a 200 cm); • Solos com alta taxa de infiltração e com alto grau de resistência e tolerância à erosão; • Solos porosos com baixo gradiente textural (< 1,20); • Solos de textura média; • Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione alta macro- porosidade em todo o perfil; • Solos bem drenados ou excessivamente drenados; • Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1; • A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: média/média, argilosa/argilosa e muito argilosa/muito argilosa. <p>Enquadra-se neste grupo o: LATOSSOLO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macroporosidade; LATOSSOLO AMARELO E LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso.</p>
Grupo Hidrológico B	<ul style="list-style-type: none"> • Solos profundos (100 a 200 cm); • Solos com moderada taxa de infiltração, mas com moderada resistência e tolerância a erosão; • Solos porosos com gradiente textural variando entre 1,20 e 1,50; • Solos de textura arenosa ao longo do perfil ou de textura média com horizonte superficial arenoso; • Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione boa macro- porosidade em todo o perfil; • Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1; • A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/arenosa, arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa e argilosa/muito argilosa. <p>Enquadra-se neste grupo o: LATOSSOLO AMARELO e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa; LATOSSOLO BRUNO; NITOSSOLO VERMELHO; NEOSSOLO QUARTZARÊNICO; ARGISSOLO VERMELHO ou VERMELHO AMARELO de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta.</p>
Grupo Hidrológico C	<ul style="list-style-type: none"> • Solos profundos (100 a 200 cm) ou pouco profundos (50 a 100 cm); • Solos com baixa taxa de infiltração e baixa resistência e tolerância à erosão; • São solos com gradiente textural maior que 1,50 e comumente apresentam mudança textural abrupta; • Solos associados a argila de atividade baixa (Tb); • A textura nos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/média e média/argilosa apresentando mudança textural abrupta; arenosa/argilosa e arenosa/muito argilosa. <p>Enquadra-se neste grupo o: ARGISSOLO pouco profundo, mas não apresentando mudança textural abrupta ou ARGISSOLO VERMELHO, ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos profundos e apresentando mudança textural abrupta; CAMBISSOLO de textura média e CAMBISSOLO HÁPLICO ou HÚMICO, mas com características físicas semelhantes aos LATOSSOLOS (latossólico); ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO; NEOSSOLO FLÚVICO.</p>
Grupo Hidrológico D	<ul style="list-style-type: none"> • Solos com taxa de infiltração muito baixa oferecendo pouquíssima resistência e tolerância a erosão; • Solos rasos (prof. < 50 cm); • Solos pouco profundos associados à mudança textural abrupta ou solos profundos apresentando mudança textural abrupta aliada à argila de alta atividade (Ta), minerais de argila 2:1; • Solos argilosos associados à argila de atividade alta (Ta); • Solos orgânicos. <p>Enquadra-se neste grupo o: NEOSSOLO LITÓLICO; ORGANOSSOLO; GLEISSOLO; CHERNOSSOLO; PLANOSSOLO; VERTISSOLO; ALISSOLO; LUVISSOLO; PLINTOSSOLO; SOLOS DE MANGUE; AFLORAMENTOS DE ROCHA; Demais CAMBISSOLOS que não se enquadram no Grupo C; ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta.</p>

Fonte: adaptado de Sartori (2004); Sartori, Neto e Genovez (2005).