



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil

Mylena Évila Maia Passos

**EFEITO DAS IMPRECISÕES NA DETERMINAÇÃO DO CN
EM ESTIMATIVAS DE VAZÕES DE CHEIA: ESTUDO DE
CASO DE DUAS SUB-BACIAS DO RIBEIRÃO CACHOEIRA
DO BRUMADO, MARIANA - MG**

Ouro Preto

2022

Efeito das imprecisões na determinação do CN em estimativas de vazões de cheia:
estudo de caso de duas sub-bacias do ribeirão Cachoeira do Brumado, Mariana -
MG

Mylena Évila Maia Passos

Trabalho Final de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Engenharia Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 03/11/2022

Área de concentração: Recursos Hídricos

Orientadora: Prof^a. M.Sc. Maria Luíza Teófilo Gandini – UFOP

Ouro Preto

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P289e Passos, Mylena Evila Maia.

Efeito das imprecisões na determinação do CN em estimativas de vazões de cheia [manuscrito]: estudo de caso de duas sub-bacias do ribeirão Cachoeira do Brumado, Mariana - MG. / Mylena Evila Maia Passos. - 2023.

93 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Ma. Maria Luíza Teófilo Gandini.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Equações - Intensidade, Duração e Frequência (IDF). 2. Lei de Uso e Ocupação do Solo (LUOS). 3. Ciência do solo. 4. Inundações. I. Gandini, Maria Luíza Teófilo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Mylena Évila Maia Passos

Efeito das imprecisões na determinação do CN em estimativas de vazões de cheia: estudo de caso de duas sub-bacias do ribeirão Cachoeira do Brumado, Mariana - MG

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil

Aprovada em 03 de novembro de 2022

Membros da banca

Ma. Maria Luíza Teófilo Gandini - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Dra. Ana Leticia Pilz de Castro - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Carlos Eduardo Ferraz de Mello - Universidade Federal de Ouro Preto

Maria Luíza Teófilo Gandini, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 24/08/2023



Documento assinado eletronicamente por **Maria Luiza Teofilo Gandini, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/08/2023, às 11:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ana Leticia Pilz de Castro, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/08/2023, às 11:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Eduardo Ferraz de Mello, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 02/09/2023, às 06:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0581668** e o código CRC **41941A01**.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me guiado, me dado saúde e forças para realizar este sonho.

Aos meus pais, Eliane e José do Carmo, e meus irmãos Pedro e Myrela, que sempre me apoiaram nos momentos mais difíceis e me incentivaram durante esta jornada.

Ao Rodrigo, meu marido, pelo companheirismo, paciência, por sempre me amparar e apoiar durante todos estes anos.

Aos meus amigos e companheiros de curso, pelos conhecimentos compartilhados e pelas boas risadas, tornando este percurso mais leve.

À Defesa Civil de Mariana e aos meus parceiros de projeto, em especial ao André e a Jessyca, por todo apoio, pelas orientações e fornecimento de materiais para realização desta pesquisa.

Aos professores do DECIV, em especial à minha orientadora Maria Luíza, pela paciência, incentivo, pelos conhecimentos transmitidos, e por todo tempo dedicado, fazendo com que este trabalho se tornasse realidade.

Enfim, à Universidade Federal de Ouro Preto, à Escola de Minas e a todos os seus participantes, pelo ensino gratuito e de qualidade.

RESUMO

As inundações são eventos recorrentes em diversas cidades do Brasil, causando prejuízos econômicos, sociais e ambientais. O distrito turístico de Cachoeira do Brumado, localizado no município de Mariana em Minas Gerais, possui, como curso d'água principal, o ribeirão Cachoeira do Brumado e sofre frequentemente com inundações. Para elaborar manchas de inundação, muitas vezes, necessita-se do parâmetro CN, então os objetivos deste trabalho foram: estudar o efeito das imprecisões na determinação desse parâmetro em estimativas de vazões de cheia e comparar a influência do uso e ocupação do solo na ocorrência de inundações. Os procedimentos realizados foram: obtenção das equações IDF locais, do mapa pedológico e do de uso e ocupação do solo, definição de 4 cenários para encontrar o valor do CN, cálculo do tempo de concentração, construção de hietogramas de blocos alternados e aplicação do método do SCS para obter as vazões de pico. Foram delimitadas a sub-bacia 1 (4,62 km²) e a sub-bacia 2 (5,00 km²). As IDF's foram definidas com uma série anual de chuvas máximas diárias, com 80 valores, e utilizando a distribuição Log Normal, os erros relativos médios foram inferiores a 3%. Ambas as sub-bacias possuem majoritariamente Latossolo e o uso e ocupação do solo se dividiu em floresta, pastagem e área artificial, com predominância de floresta na primeira e pastagem na segunda. Os CNs obtidos para os 4 cenários foram: 38,7; 57,6; 49,4 e 49,5 (sub-bacia 1) e 30,5; 51,4; 47,2 e 47,7 (sub-bacia 2). Os tempos de concentração foram 50 e 70 minutos e as vazões de pico, para o tempo de retorno de 100 anos, variaram de 0 a 8,74 m³/s e 0 a 5,04 m³/s para o menor e o maior CN, respectivamente, das sub-bacias 1 e 2. Assim, os resultados alcançados demonstraram que pequenas imprecisões, ao determinar o CN, impactam significativamente o hidrograma do escoamento superficial. Além disso, constatou-se que as sub-bacias escolhidas não apresentam grande contribuição para que aconteçam inundações em Cachoeira do Brumado.

Palavras-chaves: Equação IDF; Pedologia; Uso e Ocupação do Solo; Modelagem Hidrológica; Inundações.

ABSTRACT

Floods are recurrent events in several cities in Brazil, causing economic, social, and environmental damage. The tourist district of Cachoeira do Brumado, located in the municipality of Mariana in Minas Gerais, has, as its main watercourse, the Cachoeira do Brumado stream and frequently suffers from flooding. To elaborate flood spots, the CN parameter is often needed, so the objectives of this study were: to study the effect of inaccuracies in the determination of this parameter in flood flow estimates and to compare the influence of land use and occupation on the occurrence of floods. The procedures carried out were: obtaining the local IDF equations, the pedological map, and the land use and occupation map, defining 4 scenarios to find the CN value, calculating the concentration time, constructing alternating block hyetograms, and applying the SCS method to obtain the peak flows. Sub-basin 1 (4.62 km²) and sub-basin 2 (5.00 km²) were delimited. The IDFs were defined with an annual series of maximum daily rainfall, with 80 values, and using the Log Normal distribution, the mean relative errors were less than 3%. Both sub-basins have mostly Oxisol and the use and occupation of the land was divided into forest, pasture, and artificial area, with a predominance of forest in the first and pasture in the second. The CNs obtained for the 4 scenarios were: 38.7; 57.6; 49.4 and, 49.5 (sub-basin 1) and 30.5; 51.4; 47.2 and, 47.7 (sub-basin 2). The concentration times were 50 and 70 minutes and the peak flows, for the 100-year return time, ranged from 0 to 8.74 m³/s and 0 to 5.04 m³/s for the lowest and highest CN, respectively, of sub-basins 1 and 2. Thus, the results achieved demonstrated that small inaccuracies, when determining the CN, significantly impact the surface runoff hydrograph. In addition, it was found that the chosen sub-basins do not present a major contribution to flooding in Cachoeira do Brumado.

Keywords: IDF equation; Pedology; Land Use and Occupation; Hydrological Modeling; Flooding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Perfil esquemático de enchente, inundação e alagamento (ACQUALIS, 2022).	5
Figura 2: Ciclo Hidrológico (FERNANDES, 2022).	7
Figura 3: Hidrograma Unitário Sintético (Adaptado de COLLISCHONN & TASSI, 2010).	14
Figura 4: Características de um hidrograma unitário sintético triangular (SIEBRA, 2020).	15
Figura 5: Bacia hidrográfica do rio Doce (ANA, 2022).	23
Figura 6: Bacia hidrográfica do ribeirão Cachoeira do Brumado que pertence à bacia do rio Gualaxo do Sul (AUTORA, 2022).	24
Figura 7: Imagem aérea da inundação de 2020 no distrito de Cachoeira do Brumado (DEFESA CIVIL, 2020).	26
Figura 8: Localização da estação pluviométrica estudada (AUTORA 2022).	28
Figura 9: Delimitação de duas sub-bacias do ribeirão Cachoeira do Brumado (AUTORA, 2022).	36
Figura 10: Gráfico da distribuição Log Normal (AUTORA, 2022).	37
Figura 11: Gráfico da distribuição Pearson tipo III (AUTORA, 2022).	38
Figura 12: Gráfico da distribuição Log Pearson tipo III (AUTORA, 2022).	38
Figura 13: Gráfico da distribuição Gumbel Teórica (AUTORA, 2022).	39
Figura 14: Gráfico da distribuição Gumbel Finita (AUTORA, 2022).	39
Figura 15: Comparação entre valores observados e calculados para o intervalo de 5 a 60 minutos (AUTORA, 2022).	40
Figura 16: Comparação entre valores observados e calculados para o intervalo de 60 a 1.440 minutos (AUTORA, 2022).	41
Figura 17: Mapa pedológico das sub-bacias (AUTORA, 2022).	43
Figura 18: Uso e ocupação do solo das sub-bacias hidrográficas do ribeirão Cachoeira do Brumado (AUTORA, 2022).	44

Figura 19: Maior percurso hidráulico da sub-bacia 1 (AUTORA, 2022).	49
Figura 20: Maior percurso hidráulico da sub-bacia 2 (AUTORA, 2022).	50
Figura 21: Perfil do leito do rio para as duas sub-bacias (AUTORA, 2022).	51
Figura 22: Hietograma de blocos alternados da sub-bacia 1 para o Cenário 1 (AUTORA, 2022).	54
Figura 23: Hietograma de blocos alternados da sub-bacia 1 para o Cenário 2 (AUTORA, 2022).	54
Figura 24: Hietograma de blocos alternados da sub-bacia 1 para o Cenário 3 (AUTORA, 2022).	55
Figura 25: Hietograma de blocos alternados da sub-bacia 1 para o Cenário 4 (AUTORA, 2022).	55
Figura 26: Hietograma de blocos alternados da sub-bacia 2 para o Cenário 1 (AUTORA, 2022).	56
Figura 27: Hietograma de blocos alternados da sub-bacia 2 para o Cenário 2 (AUTORA, 2022).	56
Figura 28: Hietograma de blocos alternados da sub-bacia 2 para o Cenário 3 (AUTORA, 2022).	57
Figura 29: Hietograma de blocos alternados da sub-bacia 2 para o Cenário 4 (AUTORA, 2022).	57
Figura 30: Hidrograma unitário para a sub-bacia 1 com chuva efetiva de 6,65 minutos (AUTORA, 2022).	58
Figura 31: Hidrograma unitário para a sub-bacia 1 com chuva efetiva de 5 minutos (AUTORA, 2022).	59
Figura 32: Hidrograma unitário para a sub-bacia 1 com chuva efetiva de 10 minutos (AUTORA, 2022).	60
Figura 33: Hidrograma unitário para a sub-bacia 2 com chuva efetiva de 9,31 minutos (AUTORA, 2022).	61
Figura 34: Cenário 1 da sub-bacia 1 (AUTORA, 2022).	62
Figura 35: Cenário 2 da sub-bacia 1 (AUTORA, 2022).	63

Figura 36: Cenário 3 da sub-bacia 1 (AUTORA, 2022).....	64
Figura 37: Cenário 4 da sub-bacia 1 (AUTORA, 2022).....	65
Figura 38: Cenário 1 da sub-bacia 2 (AUTORA, 2022).....	66
Figura 39: Cenário 2 da sub-bacia 2 (AUTORA, 2022).....	67
Figura 40: Cenário 3 da sub-bacia 2 (AUTORA, 2022).....	68
Figura 41: Cenário 4 da sub-bacia 2 (AUTORA, 2022).....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Coeficientes de desagregação (Adaptado de OCCHIPINTI & SANTOS 1966; CETESB, 1980).....	11
Tabela 2: Valores de CN para Bacias Urbanas e Suburbanas (TUCCI, 2001)...19	
Tabela 3: Valores de CN para Bacias Rurais (TUCCI, 2001).	20
Tabela 4: Características técnicas da estação pluviométrica escolhida (HIDROWEB, 2022).	27
Tabela 5: Classificação de uso e ocupação do solo (AUTORA, 2022).....	30
Tabela 6: Valores do coeficiente de determinação, $D_{\text{máx}}$ e de p-Valor por distribuição de probabilidade (AUTORA, 2022).....	37
Tabela 7: Parâmetros de ajuste das equações IDF (AUTORA, 2022).....	40
Tabela 8: Tipo de solo e área ocupada nas sub-bacias (AUTORA, 2022).	42
Tabela 9: Uso e ocupação do solo das sub-bacias e suas respectivas áreas (AUTORA, 2022).	44
Tabela 10: Condição da superfície de uso e ocupação do solo para cada cenário (AUTORA, 2022).	47
Tabela 11: CN para a sub-bacia 1 dos Cenários 1 a 3 (AUTORA, 2022).	47
Tabela 12: CN para a sub-bacia 2 dos Cenários 1 a 3 (AUTORA, 2022).	47
Tabela 13: CN ponderado para cada tipo de solo do Cenário 4 (AUTORA, 2022).	48
Tabela 14: CN para as sub-bacias 1 e 2 do Cenário 4 (AUTORA, 2022).	48
Tabela 15: Valores de declividade (AUTORA, 2022).....	52
Tabela 16: Tempo de concentração (AUTORA, 2022).	53
Tabela 17: Vazões de pico para a sub-bacia 1 (AUTORA, 2022).....	70
Tabela 18: Vazões de pico para a sub-bacia 2 (AUTORA, 2022).....	70

LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

CN – *Curve Number* (Número da Curva)

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDF – Intensidade-Duração-Frequência

MDE – Modelo Digital de Elevação

NRCS – *Natural Resources Conservation Service*

NuCat – Núcleo da Cátedra da UNESCO: Águas, mulheres e desenvolvimento

SCS – *Soil Conservation Service*

SIG – Sistema de Informação Geográfica

TOPODATA - Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	2
1.1.1	Objetivos específicos	3
2	Revisão bibliográfica	4
2.1	Desastres naturais.....	4
2.2	Medidas para controle de inundações	5
2.3	Bacia hidrográfica	6
2.4	Ciclo hidrológico	6
2.5	Equação IDF.....	8
2.5.1	Identificação de <i>outliers</i>	8
2.5.2	Distribuições de probabilidade e cálculo de chuvas para diferentes durações	10
2.6	Geoprocessamento	11
2.7	Modelagem hidrológica.....	12
2.7.1	Método do SCS.....	13
2.7.2	Tempo de concentração e hietograma.....	21
3	Metodologia.....	22
3.1	Área de estudo	22
3.1.1	Clima.....	25
3.1.2	Histórico de inundações em Cachoeira do Brumado	25
3.2	Delimitação de duas sub-bacias da bacia hidrográfica do ribeirão Cachoeira do Brumado	26
3.3	Equação IDF.....	27
3.4	Classificação hidrológica do solo.....	29

3.5	Uso e ocupação do solo	30
3.6	CN para cada cenário	31
3.7	Modelagem hidrológica.....	32
3.7.1	Tempo de concentração	32
3.7.2	Hietograma.....	33
3.7.3	Transformação Chuva-Vazão	34
4	Resultados	35
4.1	Delimitação de duas sub-bacias da bacia hidrográfica do ribeirão Cachoeira do Brumado	35
4.2	Equação IDF.....	36
4.3	Classificação hidrológica do solo.....	41
4.4	Uso e ocupação do solo	43
4.5	CN para cada cenário	46
4.6	Modelagem hidrológica.....	49
4.6.1	Tempo de concentração	49
4.6.2	Hietograma.....	53
4.6.3	Transformação Chuva-Vazão	58
5	Conclusões	72
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	73
	Referências.....	74

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional das grandes cidades de forma rápida, desordenada e sem o devido planejamento de urbanização, impacta diretamente o cotidiano da população e tem contribuído para que os desastres naturais aconteçam de forma recorrente. Segundo Mendonça (2004), o processo de urbanização atingiu índices muito elevados entre o fim do século XX e início do século XXI, de maneira que a população brasileira se tornou predominantemente urbana. Essa concepção desencadeia uma série de problemas para o entendimento e administração do espaço urbano (MENDONÇA, 2004).

Desde o início das civilizações, povoados procuravam se assentar nas imediações dos rios. Como consequência, os rios das cidades passaram a sofrer frequentemente e de forma intensa, os impactos ambientais e hidrológicos do crescimento urbano acelerado, e ao mesmo tempo, perderam gradativamente o seu papel como elemento da paisagem. A concentração e a densificação populacional nas cidades, com a frequente ocupação de áreas de risco de forma inadequada, desencadearam problemas ambientais e socioeconômicos, como por exemplo a intensificação das inundações urbanas, que por sua vez, impactam negativamente as populações e o meio ambiente (BAPTISTA & CARDOSO, 2013).

O processo de urbanização acarreta a impermeabilização do solo, reduz a infiltração, aumentando o volume e a velocidade do escoamento superficial direto. Como desfecho, os picos dos hidrogramas de cheias sobem e sofrem antecipação, ainda agravando esse quadro, tem-se a canalização dos cursos d'água. A consequência desse processo é o acontecimento mais recorrente das inundações, devido às limitações do sistema de drenagem (BAPTISTA & CARDOSO, 2013).

Ademais, as características físicas naturais, com destaque para a variabilidade climática natural em áreas tropicais, foram ignoradas na organização dos espaços urbanos brasileiros. Essas variações climáticas em relação aos regimes pluviais ocasionam transtornos e perdas que prejudicam a qualidade de vida da população (LIMA, 2012).

Estudos realizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em parceria com o Centro de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) apontam que em 2010, nos 872 municípios brasileiros monitorados, cerca de 8,3 milhões de pessoas viviam em áreas de risco de enchente ou deslizamento de terra (AGÊNCIA IBGE NOTÍCIAS, 2018). Os estudos concluíram ainda que, aproximadamente 18% destas pessoas eram idosos ou crianças, e mais da metade dos moradores em área de risco viviam no Sudeste (AGÊNCIA IBGE NOTÍCIAS, 2018).

Cachoeira do Brumado é um distrito do município de Mariana, interior de Minas Gerais, com uma população de aproximadamente 2.261 habitantes (IBGE, 2010), o distrito é conhecido como a terra do artesanato e é famoso por abrigar uma das principais cachoeiras da região (OLIVEIRA et al., 2018). As populações desse distrito e de outras localidades a jusante sofrem com as inundações de forma recorrente, trazendo inúmeros prejuízos à região.

Em janeiro de 2020, aconteceu uma das maiores inundações registradas em Cachoeira do Brumado. O ribeirão Cachoeira do Brumado, que atravessa o distrito, extravasou a sua capacidade, inundando as ruas e atingindo diversas residências e estabelecimentos. O acontecimento foi ocasionado principalmente pela ocupação urbana e impermeabilização do solo na bacia do ribeirão Cachoeira do Brumado, além do elevado índice pluviométrico registrado naquele ano. Segundo informações da Defesa Civil de Mariana (2022), em aproximadamente 12 horas, choveu cerca de 200 mm na região, essa estimativa se dá pelo fato do pluviômetro, com capacidade máxima de 175 mm, ter transbordado.

Dessa forma, as inundações ocorridas em Cachoeira do Brumado nos últimos anos reforçam a importância de um estudo adequado para minimizar os diversos problemas enfrentados pelas populações do distrito e de outras localidades a jusante.

1.1 Objetivo

O objetivo geral do presente trabalho é analisar o efeito das imprecisões na determinação do parâmetro *Curve Number* (CN) em estimativas de vazões de cheia, elaborando a modelagem hidrológica de duas sub-bacias do ribeirão Cachoeira do

Brumado, a fim de comparar os hidrogramas do escoamento superficial direto para diferentes considerações na determinação desse parâmetro.

1.1.1 Objetivos específicos

O objetivo geral subdivide-se em quatro objetivos específicos:

- 1) realizar as classificações pedológica e do uso do solo das sub-bacias com o programa QGIS;
- 2) executar a modelagem hidrológica da área estudada aplicando o método do SCS;
- 3) comparar como o uso e cobertura do solo interfere no escoamento superficial direto e conseqüentemente na contribuição para que ocorram inundações em Cachoeira do Brumado e
- 4) comparar a influência das imprecisões na determinação do CN para o hidrograma do escoamento superficial direto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Desastres naturais

Desastres naturais podem ser definidos como aqueles causados por fenômenos e desequilíbrios da natureza que atuam independentemente da ação humana, como chuvas intensas provocando inundações, erosões e escorregamentos; ventos fortes formando vendavais, tornados e furacões; etc. (TOMINAGA, 2009).

Os desastres naturais podem ser potencializados pelo ser humano quando este atua no cenário natural, modificando a morfologia do território que ocupa. Exemplos dessas modificações são: ocupação de locais naturalmente inundáveis, alterações na rede de drenagem natural, desmatamento, cortes e aterros de encostas, impermeabilização do solo, entre outras.

Os desastres naturais relacionados a chuvas intensas podem ser divididos em inundações, enxurradas e alagamentos. Embora sejam utilizados como sinônimos pela população leiga, esses termos têm significados distintos. Segundo a Classificação e Codificação Brasileira de Desastres - (COBRADE, 2022) esses eventos podem ser conceituados da seguinte maneira:

- Inundações: submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água em zonas que normalmente não se encontram submersas. O transbordamento ocorre de modo gradual, geralmente ocasionado por chuvas prolongadas em áreas de planície;
- Enxurradas: escoamento superficial direto de alta velocidade e energia, provocado por chuvas intensas e concentradas, normalmente em pequenas bacias de relevo acidentado. Caracterizada pela elevação súbita das vazões de determinada drenagem e transbordamento brusco da calha fluvial. Apresenta grande poder destrutivo e
- Alagamentos: extrapolação da capacidade de escoamento de sistemas de drenagem urbana e consequente acúmulo de água em ruas, calçadas ou outras infraestruturas urbanas, em decorrência de precipitações intensas.

Em contrapartida, têm-se as enchentes ou cheias, que acontecem quando as águas de um rio ou de um córrego pluvial, ultrapassam o leito menor e atingem o leito

maior. É um processo natural que ocorre de modo irregular ao longo do tempo, de maneira que a população tende a ocupar o leito maior nas épocas em que o nível da água está mais baixo e, posteriormente, nas épocas chuvosas, ficar suscetível aos impactos das cheias (TUCCI, 2005).

A Figura 1 mostra esquematicamente a diferença entre os fenômenos definidos anteriormente.

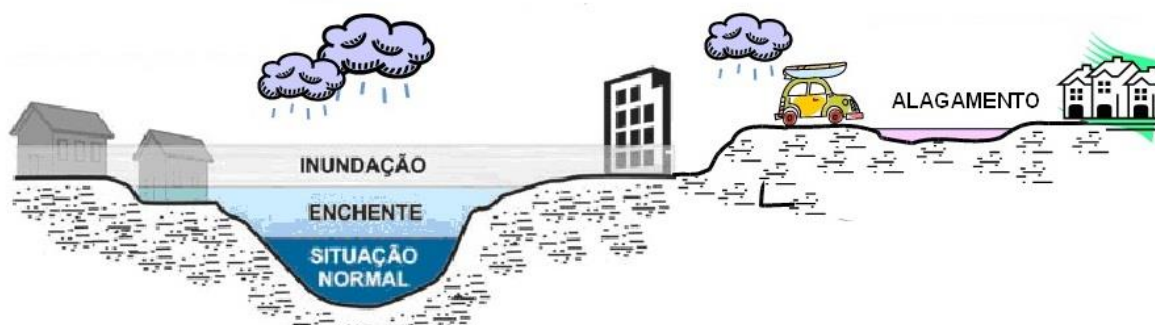


Figura 1: Perfil esquemático de enchente, inundação e alagamento (ACQUALIS, 2022).

2.2 Medidas para controle de inundações

As medidas para prevenção e/ou correção dos impactos negativos advindos das inundações são classificadas em medidas estruturais e não estruturais (TUCCI, 1993).

As medidas estruturais são intervenções físicas que podem ser definidas como medidas intensivas (aceleração de escoamento, restauração de calhas naturais, retardamento de fluxo, desvio de escoamento, entre outros) ou medidas extensivas (pequenos armazenamentos disseminados na bacia, controle da erosão do solo ao longo da bacia e recomposição vegetal) (CANHOLI, 2005).

Já as medidas não estruturais podem ser definidas segundo Canholi (2005), como intervenções que possuem como objetivo delimitar o uso e ocupação do solo, o comportamento do consumidor e as atividades econômicas. Tais medidas podem ser implementadas por regulamentos, normas e programas (CANHOLI, 2005), como, por exemplo, o plano diretor da cidade que deve estabelecer o zoneamento urbano,

definindo onde pode-se construir ou não e, no primeiro caso, quais tipos de estruturas podem ser feitas em cada zona, bem como programas de conscientização e treinamento da população que já se encontra em áreas de risco, para que saiba identificar possíveis problemas e agir corretamente caso a Defesa Civil, por exemplo, emita um aviso de alerta ou de evacuação daquelas áreas.

2.3 Bacia hidrográfica

De acordo com Viessman Junior, Harbaugh e Knapp (1972), “A bacia hidrográfica é a área definida topograficamente, drenada por um curso d’água ou um sistema conectado de cursos d’água, de modo que toda a vazão efluente seja descarregada através de uma saída simples”. Constitui-se no sistema físico ou área coletora da água de precipitação, que a faz convergir para uma única seção de saída denominada exutória, foz ou desembocadura (BARBOSA JR, 2022).

Dessa forma, trata-se de um sistema aberto, que possui dados de entrada e de saída. Como dados de entrada, tem-se o volume de água precipitada e de saída, a soma do volume de água escoada pela seção exutória com os volumes decorrentes da evapotranspiração. Ademais, estudos práticos que envolvem inundações, adotam as bacias hidrográficas como unidades hidrológicas pela simplicidade do equacionamento (BARBOSA JR., 2022).

2.4 Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico é a constante movimentação e transformação da água na terra e na atmosfera, em seus estados líquido, sólido e gasoso; a água que é resfriada e condensada em gotas na atmosfera cai sobre a terra em forma de precipitação, que pode ser chuva, granizo, neve ou orvalho (BARBOSA JR, 2022).

A energia em forma de calor evapora a água dos oceanos, da terra e da vegetação úmida, essa umidade evaporada assim como a umidade transpirada pelas plantas, é transportada pela atmosfera até precipitar para a superfície terrestre, seja em terra ou nos oceanos. A água precipitada pode ser interceptada, acumular-se nas depressões do terreno, escoar-se sobre os próprios cursos d’água assim como também sobre a superfície do solo (esse fluxo é denominado escoamento superficial direto, que

alcança córregos, rios e lagos e escoam até os mares) ou pode se infiltrar no solo. A água infiltrada pode penetrar em zonas mais profundas, alimentar o lençol freático e os aquíferos e mais tarde pode fluir como nascentes ou infiltrar em cursos d'água como escoamento de base e, finalmente, evaporar em direção à atmosfera para, juntamente com a água transpirada e evaporada tanto da umidade do solo quanto da vegetação úmida, reiniciar o ciclo hidrológico (CHOW, 1964).

A Figura 2 mostra esquematicamente o processo do ciclo hidrológico conceituado anteriormente.

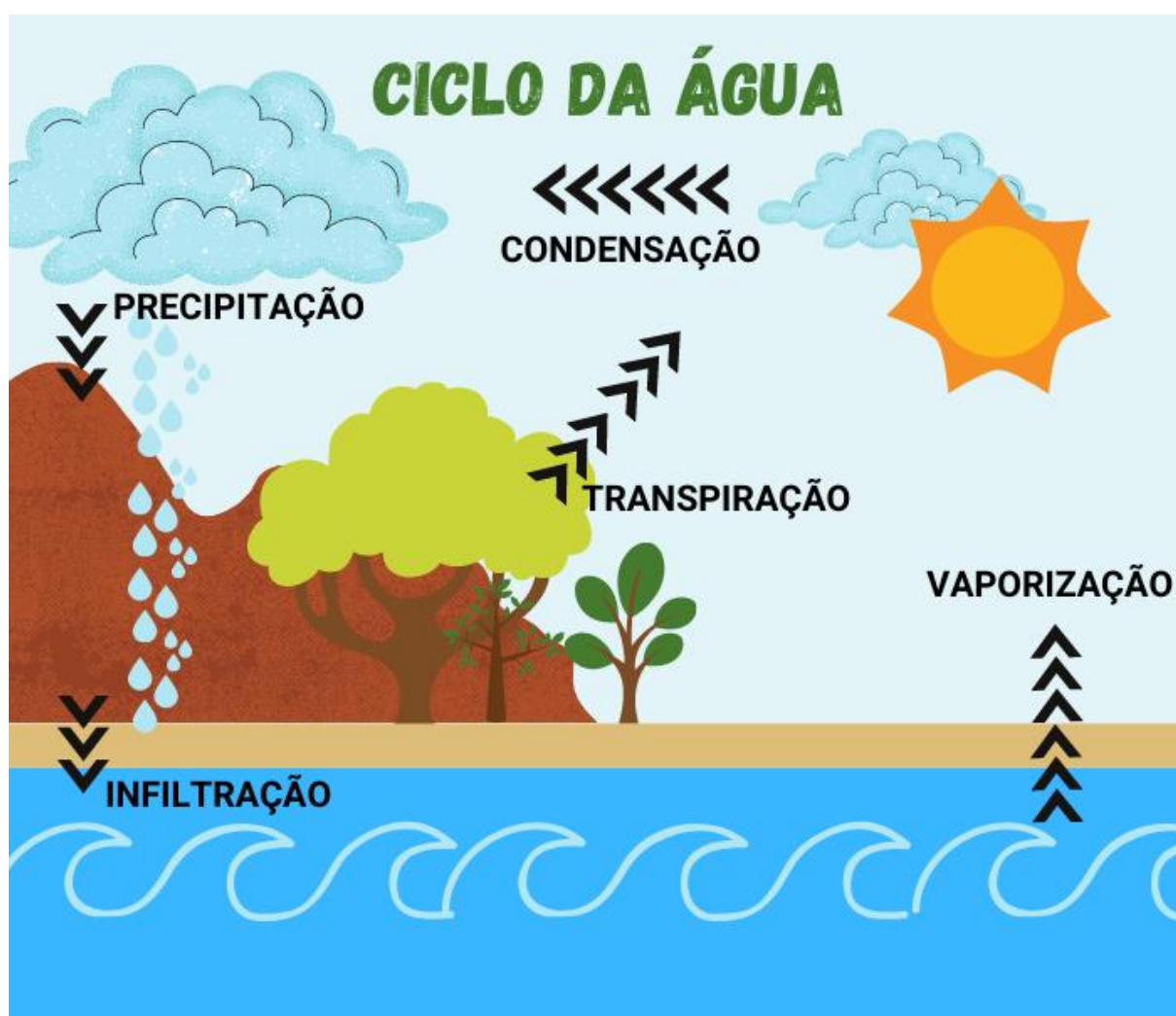


Figura 2: Ciclo Hidrológico (FERNANDES, 2022).

2.5 Equação IDF

Os eventos de precipitação máxima são aqueles de ocorrências extremas, na qual a duração, distribuição temporal e espacial em uma dada bacia hidrográfica ou área, são críticas. O seu estudo é uma maneira de alcançar a vazão de enchente de uma bacia e pode ser representado pelas curvas IDF, correlacionando as variáveis intensidade, duração e frequência (TUCCI, 1993).

Segundo Tucci (1993), intensidade, duração e frequência são grandezas que caracterizam as precipitações máximas e são extremamente necessárias para o dimensionamento de obras hidráulicas e o estudo de cheias. A determinação da relação entre essas grandezas é muito importante e deve ser deduzida após a obtenção de dados de chuvas intensas na região durante um longo e representativo intervalo de tempo (TUCCI, 1993).

As curvas IDF possuem a seguinte expressão genérica, segundo Tucci (1993):

$$i = \frac{K \cdot Tr^m}{(t_d + c)^n} \quad (2.1)$$

onde i é a intensidade (mm/h), Tr é o tempo de retorno (anos) e t_d a duração da chuva (min); K , m , c e n são parâmetros de ajuste da curva determinados para cada estação pluviométrica ou pluviográfica.

2.5.1 Identificação de *outliers*

Ao relacionar distribuições de séries históricas com distribuições probabilísticas teóricas, pode ser verificada a presença de alguns valores extremos que comprometam os resultados alcançados. Tais valores recebem o nome de *outliers* e não são necessariamente valores incorretos, eles podem representar precipitações de tempos de retorno maiores do que o período em análise. Apesar disso, estes valores podem ser cuidadosamente dispensados para que as informações disponíveis sejam analisadas de maneira um pouco mais adequada (GANDINI, 2016).

Dois métodos serão demonstrados para a identificação de *outliers*, sendo eles o de Grubbs (1969) e de Grubbs e Beck (1972), de acordo com a explicação de Gandini (2016).

Seja uma amostra com n observações, em ordem crescente, com $x_1 < x_2 < x_3 \cdots < x_n$, sendo o último o valor maior e duvidoso. Para um único *outlier*, Grubbs (1969) aponta:

$$T_n = \frac{(x_n - \bar{x})}{\sigma^*} \quad (2.2)$$

$$\sigma^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2.3)$$

onde $\bar{x}$ é a média aritmética dos n valores e σ^* o desvio padrão da amostra com $n - 1$ graus de liberdade.

Se o primeiro valor x_1 for duvidoso, o teste é obtido por T_1 , em que:

$$T_1 = \frac{(\bar{x} - x_1)}{\sigma^*} \quad (2.4)$$

Se algum dos valores de T forem maiores que o $T_{\text{Crítico}}$, que é tabelado em 10%, 5%, 2,5%, 1%, 0,5% e 0,1%, conforme os níveis de significância, tem-se um *outlier*.

O teste de Grubbs e Beck (1972) indica a utilização de duas equações, de maneira que os valores da amostra maiores do que x_H e menores do que x_L são considerados *outliers*.

$$x_H = \exp(\bar{x} + k_N \sigma) \quad (2.5)$$

$$x_L = \exp(\bar{x} - k_N \sigma) \quad (2.6)$$

Nas Equações 2.5 e 2.6, $\bar{x}$ é a média e σ é o desvio padrão dos logaritmos naturais da amostra, respectivamente, e k_N a estatística tabelada para vários tamanhos de amostra e níveis de significância. Para um nível de significância de 10%, Pilon et al. (1985, citado por RAO e HAMED, 2000) recomendam a seguinte aproximação, em que N é o tamanho da amostra:

$$k_N = -3,62201 + 6,28446N^{\frac{1}{4}} - 2,49835N^{\frac{1}{2}} + 0,491436N^{\frac{3}{4}} - 0,037911N \quad (2.7)$$

2.5.2 Distribuições de probabilidade e cálculo de chuvas para diferentes durações

Modelos de probabilidade podem ser empregados para se determinar a relação entre séries históricas de vazões e suas respectivas frequências, informações fundamentais para o dimensionamento e estudo de obras hidráulicas, já que as cheias verificadas em determinado período de tempo podem se repetir no futuro com características hidrológicas semelhantes (BARBOSA JR., 2022).

Para modelar eventos máximos anuais com variáveis hidrológicas, existem diversas distribuições de probabilidade que podem ser utilizadas. A escolha mais adequada será aquela que melhor reproduz características importantes dos dados para o estudo (COSTA, 2014).

A melhor maneira de realizar o levantamento de dados de precipitação é dispor de um pluviógrafo, que registra a intensidade, ou seja, a variação da altura da chuva com o tempo. Porém, esse instrumento é menos frequente no Brasil e o que geralmente se tem, são dados pluviométricos que fornecem somente a altura da chuva (GANDINI, 2016). Por essa razão, torna-se necessário recorrer a métodos que convertem as chuvas diárias em valores correspondentes de menores durações.

Após a definição da distribuição de probabilidade a ser adotada, determinam-se então as chuvas de 1 dia com os períodos de retorno desejados, x_{Tr} , utilizando a equação de Ven-Te-Chow (GANDINI, 2016):

$$x_{Tr} = \bar{x} + K\sigma \quad (2.8)$$

onde: $\bar{x}$ é a média dos dados da série histórica; σ é o desvio padrão e K é o fator de frequência.

Posteriormente, deve-se transformar a chuva acumulada diária em uma chuva de 24 horas. Estudos como o de Occhipinti & Santos (1966) e da CETESB (1980), foram realizados para determinar esta relação e recomendaram multiplicar o valor da chuva de 1 dia por 1,14 para obtenção da chuva de 24 horas (GANDINI, 2016). Para as demais durações, utilizam-se os coeficientes de desagregação que podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1: Coeficientes de desagregação (Adaptado de OCCHIPINTI & SANTOS 1966; CETESB, 1980).

Relação entre as durações	Coeficiente de desagregação	Relação entre as durações	Coeficiente de desagregação
1 dia / 24 h	1,14	24 h / 60 min	0,42
24 h / 12 h	0,85	24 h / 30 min	0,311
24 h / 10 h	0,82	24 h / 25 min	0,283
24 h / 8 h	0,78	24 h / 20 min	0,252
24 h / 6 h	0,72	24 h / 15 min	0,218
24 h / 4 h	0,63	24 h / 10 min	0,168
24 h / 2 h	0,52	24 h / 5 min	0,106

Após a obtenção das alturas de chuva, basta dividi-las por suas respectivas durações, obtendo assim as intensidades.

2.6 Geoprocessamento

Geoprocessamento pode ser definido como o conjunto de tecnologias voltadas para a coleta e o tratamento de dados espaciais, executadas por sistemas específicos normalmente chamados de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Tal sistema tem como resultados mais comuns a geração de mapas convencionais, relatórios e arquivos digitais etc. (SPRING - DPI/INPE, 2006).

A integração de SIG na modelagem hidrológica permite a obtenção dos parâmetros necessários, por meio de dados espaciais, para representar adequadamente os processos que acontecem em uma bacia hidrográfica. Segundo Santos et al. (2006), a partir dos SIGs pode-se combinar condições meteorológicas, informações topográficas, tipos e usos do solo a bacias hidrográficas e/ou a sub-bacias, permitindo simular diferentes cenários e as consequências dessas informações. Dentre as informações topográficas, destacam-se os Modelos Digitais do Terreno (MDT) que são os vetores de números que representam a distribuição espacial de um conjunto de propriedades do terreno (COLLINS, 1978). De acordo com Cunha (2001), um Modelo Digital de Elevação (MDE) consiste em uma representação

matemática da distribuição de uma característica específica vinculada a uma superfície real. Com ele é possível gerar mapas, imagens e perspectivas tridimensionais, além de calcular volumes e áreas (CUNHA, 2001).

Ao utilizar os SIGs na modelagem hidrológica, torna-se possível manipular os dados espaciais, sendo a combinação destas duas tecnologias de grande importância em tomadas de decisões relacionadas com o planejamento e ordenamento territorial (SANTOS et al., 2006).

2.7 Modelagem hidrológica

O mapeamento das áreas inundáveis é uma etapa muito importante do processo de zoneamento de áreas de inundação (TUCCI, 2004). Esta é uma ferramenta essencial de auxílio ao controle e prevenção de inundações. Segundo Tucci (2004), este processo é composto pelas seguintes etapas:

- a) determinação do risco de enchentes;
- b) mapeamento das áreas de inundação e
- c) zoneamento.

Ainda de acordo com o Tucci (2004), existem dois tipos de mapas de inundação: os mapas de planejamento e os de alerta; o mapa de planejamento define as áreas atingidas pelas cheias de tempos de retorno escolhidos, já o mapa de alerta informa em cada ponto de controle ou esquina, o nível da régua onde inicia a inundação.

Para obtenção dos mapas de inundação, recorre-se à modelagem hidrológica que é uma ferramenta essencial para o gerenciamento dos recursos hídricos, uma vez que permite prever regimes fluviais de interesse. Dessa forma, tem-se tornado frequente a aplicação de modelos fisicamente baseados juntamente com técnicas de mapeamento para avaliar o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas (VIOLA et al., 2009).

Os modelos hidrológicos têm como objetivo obter um hidrograma de cheia no exutório de uma bacia hidrográfica (RIGHETTO, 1998). Para escolher um modelo hidrológico alguns fatores devem ser analisados, como o objetivo do estudo, as características físicas e climáticas da bacia hidrográfica e a disponibilidade dos dados (TUCCI, 1998).

De acordo com Sousa, Costa & Paula (2017), os modelos hidrológicos chuva-vazão possibilitam transformar as precipitações pluviométricas de séries históricas em vazão. Diante disso, é observado um atraso da vazão se comparada com a precipitação, sendo esse fato justificado pelos processos de interceptação e escoamentos superficial direto e subsuperficial, já que dependem significativamente das características do local (SOUSA, COSTA & PAULA, 2017).

2.7.1 Método do SCS

A determinação das vazões de cheia em uma bacia hidrográfica é de extrema importância para estudos hidrológicos, por esse motivo, houve um grande avanço de métodos matemáticos para superar a falta de dados pluviométricos (RIGHETTO, 1998).

Desse modo, quando há poucos ou nenhum dado hidrológico da bacia hidrográfica em estudo, uma alternativa é utilizar hidrogramas unitários sintéticos (CANHOLI, 2005). A maneira mais comum para obter esses hidrogramas é pelo método do SCS (*Soil Conservation Service*, agência permanente do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos que em 1994 passou a ser chamada de NRCS - *Natural Resources Conservation Service*).

Na Figura 3 pode-se observar características importantes de um hidrograma. No caso exemplificado, se conhece o valor da chuva efetiva (parcela da chuva que causa o escoamento superficial direto) em três intervalos de tempo.

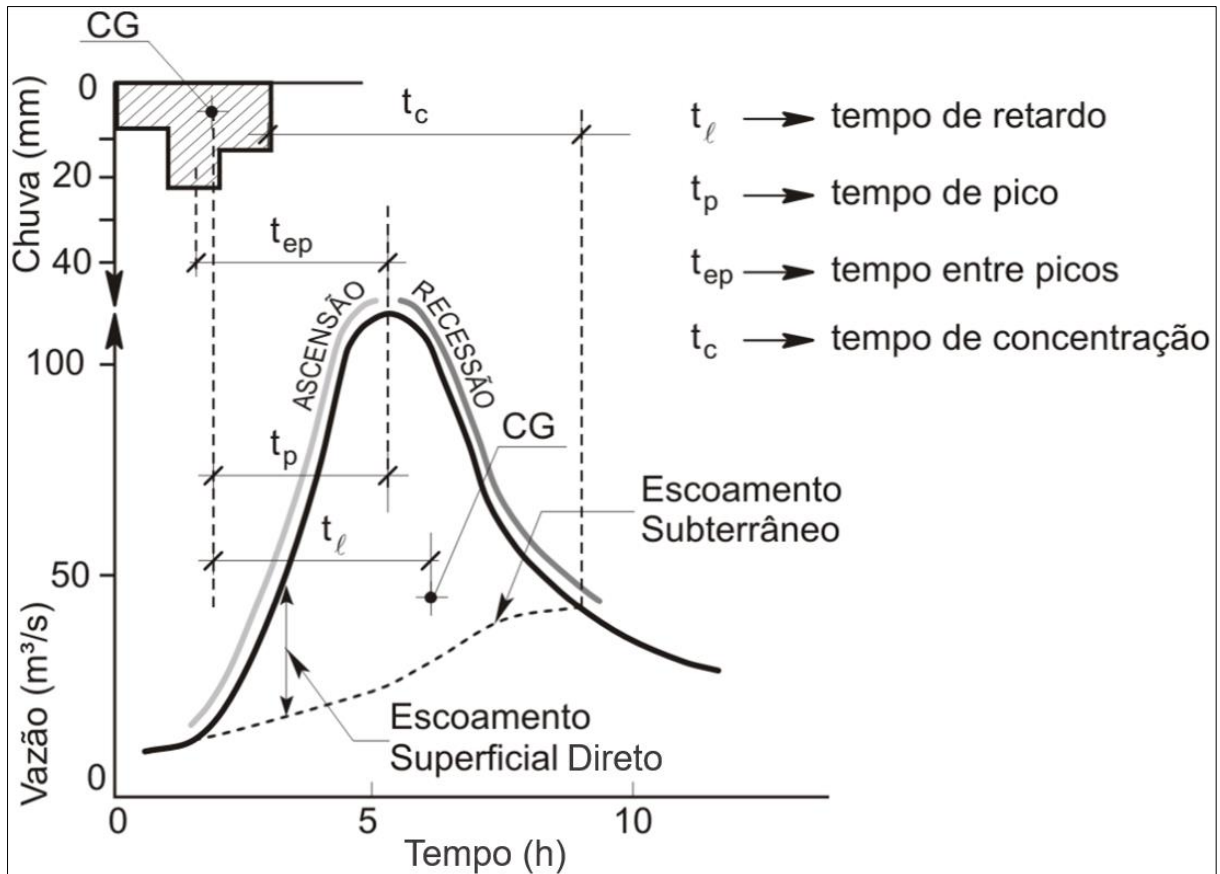


Figura 3: Hidrograma Unitário Sintético (Adaptado de COLLISCHONN & TASSI, 2010).

Segundo Collischonn & Tassi (2010), têm-se as seguintes definições:

- Tempo de retardo é o intervalo de tempo entre os centros de gravidade do hietograma da chuva efetiva e do hidrograma superficial;
- Tempo de pico é conceituado como o tempo entre o centro de gravidade do hietograma da chuva efetiva e o pico do hidrograma;
- Tempo entre picos é o intervalo entre o pico da chuva efetiva e o pico da vazão superficial e
- Tempo de concentração pode ser explicado como o intervalo de tempo entre o fim da ocorrência de chuva efetiva e o fim do escoamento superficial direto.

O método do SCS descreve o hidrograma unitário na forma de um triângulo, cuja área é igual ao volume unitário precipitado (TUCCI, 2004).

A Figura 4 apresenta as características de um hidrograma unitário sintético triangular do método do SCS.

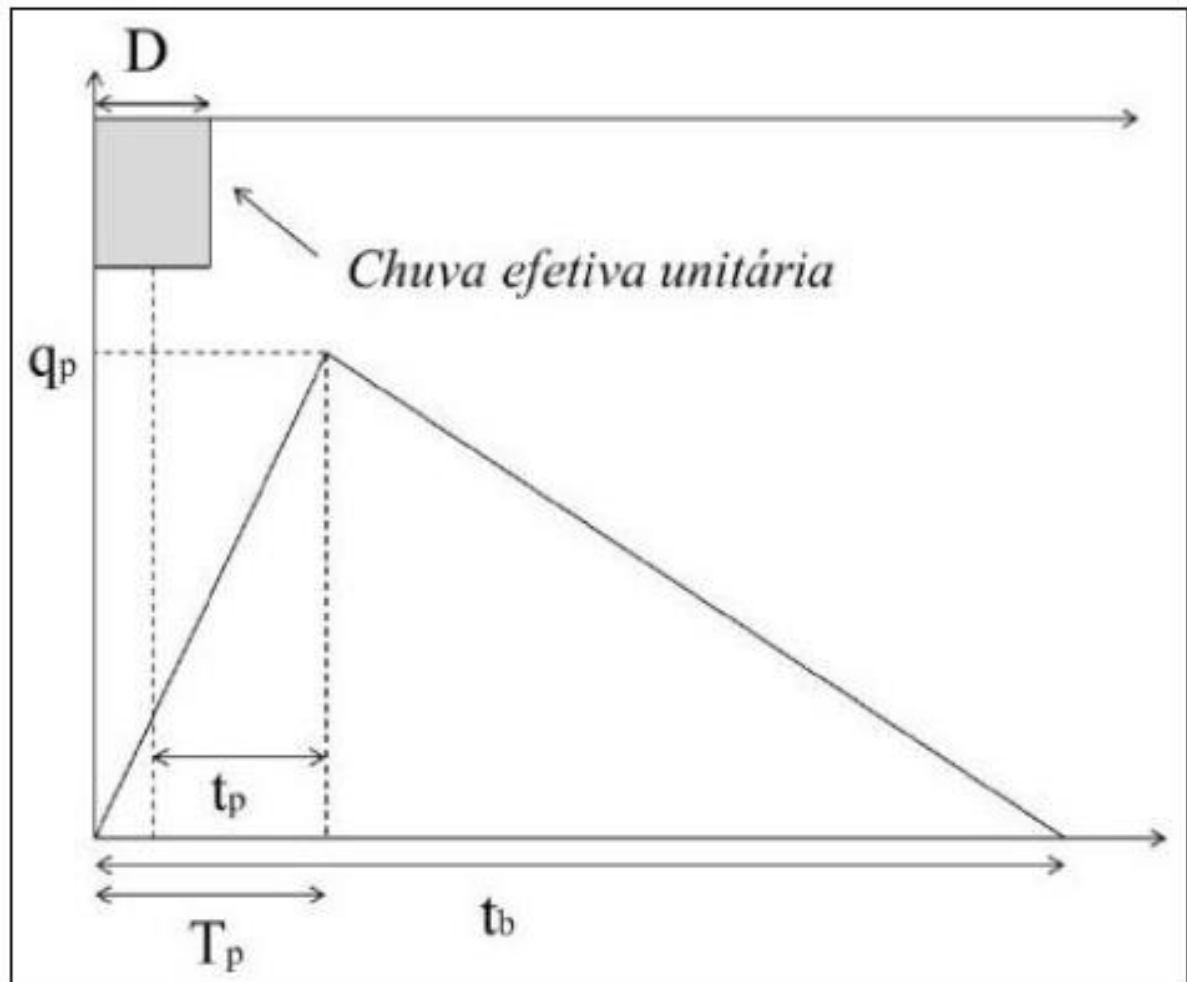


Figura 4: Características de um hidrograma unitário sintético triangular (SIEBRA, 2020).

Desta maneira, conforme Chow, Maidment & Mays (1998) as variáveis observadas na Figura 4 podem ser encontradas através das Equações 2.9 a 2.12.

O tempo de pico (t_p) é obtido em função do tempo de concentração (t_c), ambos em horas, sendo:

$$t_p = 0,6t_c \quad (2.9)$$

O tempo de subida do hidrograma (T_p), em horas, é dado pela relação entre o tempo de pico (t_p) e a duração da chuva (D), também em horas, em que:

$$T_p = t_p + \frac{D}{2} \quad (2.10)$$

Já o tempo de base (T_b) pode ser calculado em razão do tempo de subida (T_p), ambos em horas, sendo que a equação que o representa é:

$$T_b = T_p + 1,67T_p \quad (2.11)$$

Por último, a vazão de pico (q_p) em m^3/s , pode ser encontrada pela área da bacia (A), em km^2 , e pelo tempo de subida (T_p), em horas, em que:

$$q_p = \frac{2,08A}{T_p} \quad (2.12)$$

No método do SCS a precipitação efetiva total em mm, P_{efT} , é calculada pela Equação 2.13 (BARBOSA JR, 2022):

$$P_{efT} = \frac{(P_T - I_a)^2}{(P_T - I_a) + S} \quad (2.13)$$

em que: P_T é a precipitação total acumulada (mm), I_a é a abstração inicial que ocorre antes do início do escoamento superficial direto (interceptação, infiltração, água retida nas depressões do terreno, desprezando-se a parcela evapotranspirada durante a ocorrência da chuva) (mm) e S é o potencial máximo de retenção da camada superior do solo após o início do escoamento superficial direto (mm). De maneira empírica, observou-se que I_a equivale a 20% de S , então a Equação 2.13 pode ser reescrita:

$$P_{efT} = \frac{(P_T - 0,2S)^2}{(P_T + 0,2S)}, \text{ válida para } P_T > 0,2S \quad (2.14)$$

quando $P_T \leq 0,2S$ tem-se que $P_{efT} = 0$ e S é calculado pela Equação 2.15:

$$S = 25,4(1000/CN - 10) \quad (2.15)$$

Segundo Canholi (2005), o *Curve Number* (CN), ou Número da Curva, pode ser definido como um índice relacionado com a capacidade de armazenamento da bacia

hidrográfica, tendo em conta o tipo de solo e a cobertura vegetal. Este número deve ser menor ou igual a 100, valor que aponta que não há armazenamento (CANHOLI, 2005).

Para obtê-lo é necessário, primeiramente, agrupar os solos de acordo com suas características hidrológicas semelhantes. No método do SCS, os solos são classificados em A, B, C ou D, com base na possibilidade de erosão e na produção de escoamento. As características do solo, como espessura, textura, estrutura, grau de expansão e presença de matéria orgânica, definem a forma com que ele responde diante de chuvas intensas e de grande duração (SARTORI, NETO & GENOVEZ, 2005).

Essas características influenciam diretamente a taxa de infiltração do solo, que resulta em uma classificação, iniciando com as argilas compactas, que tem infiltração praticamente nula, até as areias de grande intensidade de infiltração. As Tabelas 2 e 3 apresentam valores de CN para diversos usos e ocupação do solo para as quatro classes hidrológicas do método do SCS, sendo elas, segundo Tucci (2001):

- A: solos que produzem baixo escoamento superficial direto e alta infiltração;
- B: solos que são menos permeáveis do que o anterior;
- C: solos que geram escoamento superficial direto acima da média e infiltração abaixo da média e
- D: solos que contém argilas expansivas e pouco profundos, com capacidade de infiltração muito baixa e maiores valores de escoamento superficial direto.

Adequando-as à situação brasileira, Sartori, Neto & Genovez (2005) propuseram uma classificação hidrológica de cada solo brasileiro, encaixando-os em uma das quatro classes:

- A: 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;
- B: 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;

- C: 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 Háptico ou Húmico, mas com características físicas semelhantes aos Latossolos; Espodossolos Ferrocárbico; Neossolo Flúvico e
- D: 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.

Uma observação importante sobre as Tabelas 2 e 3 é que os valores apresentados são referentes à Condição de Umidade Antecedente II, ou, em inglês, *Antecedent Moisture Condition II* (AMC II), essa é a condição intermediária de umidade do solo. Para obter o CN para a AMC I ou a AMC III, solo seco ou saturado respectivamente, é preciso aplicar, de acordo com Ponce e Hawkins (1996), os valores tabelados nas equações a seguir:

$$CN(I) = \frac{CN(II)}{2,281 - 0,01281CN(II)} \quad (2.16)$$

$$CN(III) = \frac{CN(II)}{0,427 + 0,00573CN(II)} \quad (2.17)$$

A condição de solo seco (AMC I) é considerada quando as chuvas nos últimos 5 dias não ultrapassam 15 mm, enquanto a condição de solo saturado (AMC III) acontece quando, também, nos últimos 5 dias elas superam 40 mm (BELLINASSO & SCHNEIDER, 2017).

Tabela 2: Valores de CN para Bacias Urbanas e Suburbanas (TUCCI, 2001).

Utilização ou Cobertura do Solo		A	B	C	D
Zonas cultivadas	sem conservação do solo	72	81	88	91
	com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos baldios	em más condições	68	79	86	89
	em boas condições	39	61	74	80
Prado em boas condições		30	58	71	78
Bosques ou zonas florestais	com cobertura ruim	45	66	77	83
	com cobertura boa	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, cemitérios, boas condições	com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80
	com relva de 50 a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios		89	92	94	95
Zonas industriais		81	88	91	93
Zonas residenciais					
Lotes de (m²)		% média impermeável			
<500	65	77	85	90	92
1.000	38	61	75	83	87
1.300	30	57	72	81	86
2.000	25	54	70	80	85
4.000	20	51	68	79	84
Parques de estacionamento, telhados, viadutos etc.		98	98	98	98
Arruamentos e estradas	asfaltadas e com drenagem de águas pluviais	98	98	98	98
	com paralelepípedos	76	85	89	91
	de terra	72	82	87	89

Tabela 3: Valores de CN para Bacias Rurais (TUCCI, 2001).

Uso do Solo	Superfície	A	B	C	D
Solo lavrado	Com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	Em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações regulares	Em curvas de nível	67	77	83	87
	Terraceado em nível	64	76	84	88
	Em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de cereais	Em curvas de nível	62	74	82	85
	Terraceado em nível	60	71	79	82
	Em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de legumes ou cultivados	Em curvas de nível	60	72	81	84
	Terraceado em nível	57	70	78	89
	Pobres	68	79	86	89
	Normais	49	69	79	94
	Boas	39	61	74	80
Pastagens	Pobres, em curvas de nível	47	67	81	88
	Normais, em curvas de nível	25	59	75	83
	Boas, em curvas de nível	6	35	70	79
Campos permanentes	Muito esparsos, baixa transpiração	45	66	77	83
	Esparsos	36	60	73	79
	Normais	30	58	71	78
	Densos, de alta transpiração	25	55	70	77
Chácaras ou Estradas de terra	Normais	56	75	86	91
	Más	72	82	87	89
	De superfície dura	74	84	90	92
Florestas	Muito esparsas, baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsas	46	68	78	84
	Normais	36	60	70	76
	Densas, alta transpiração	26	52	62	69

2.7.2 Tempo de concentração e hietograma

O tempo de concentração pode ser definido como o intervalo de tempo necessário, desde que se inicia a precipitação, para que toda a bacia hidrográfica possa contribuir com a vazão na seção analisada, levando em consideração o tempo de encharcamento da camada superficial do solo (BARBOSA JR., 2022). Leva-se em conta que o sistema seja linear para o escoamento superficial direto. Isso acontece quando se tem o equilíbrio, em regime permanente, entre uma chuva efetiva de intensidade constante e a sua produção de escoamento superficial direto (SILVEIRA, 2005).

A distribuição cronológica de eventos pluviométricos pode ser representada através de diagramas com valores de precipitações ao longo do tempo. Quando discretos, são ditos hietogramas e podem ser fundamentados em equações IDF, onde os incrementos de precipitação acontecem em sucessivos intervalos de tempos constantes (PORTELA, MARQUES & CARVALHO, 2000).

Logo depois, essas parcelas de precipitação, ou blocos, são organizadas em uma sequência temporal de acordo com o padrão de variação desejado (PORTELA, MARQUES & CARVALHO, 2000). Um hietograma normalmente utilizado é o de blocos alternados, que faz a disposição dos blocos de precipitação de maneira que as maiores magnitudes fiquem no centro, enquanto as menores fiquem nas extremidades (PORTELA, MARQUES & CARVALHO, 2000).

3 METODOLOGIA

3.1 Área de estudo

Este estudo abrange a região de Cachoeira do Brumado, distrito do município de Mariana, que está localizado no Quadrilátero Ferrífero no estado de Minas Gerais. Mariana faz divisa com os municípios de Ouro Preto, Barra Longa, Diogo de Vasconcelos, Acaiaca, Piranga, Catas Altas e Alvinópolis (PREFEITURA DE MARIANA, 2022).

Conhecido como a terra do artesanato, o distrito turístico de Cachoeira do Brumado situa-se, aproximadamente, a 135 km da capital mineira, Belo Horizonte, e, de acordo com o Censo realizado pelo IBGE, em 2010, possuía 2.261 habitantes em uma área de 63,1 km².

A bacia hidrográfica que abriga as sub-bacias do ribeirão Cachoeira do Brumado, objetos de estudo deste presente trabalho, é a do rio Gualaxo do Sul que tem sua cabeceira localizada na serra do Espinhaço, na divisa dos municípios de Ouro Preto e Ouro Branco, ambos situados no estado de Minas Gerais (BERGAMIM, 2017).

Por sua vez, a bacia do rio Gualaxo do Sul está inserida na bacia do rio Doce, que fica localizada na região Sudeste do Brasil, entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, nos paralelos 17°45' e 21°15' de latitude sul e os meridianos 39°55' e 43°45' de longitude oeste. Sua extensão total é de 853 km e sua área de drenagem é de 83.465 km², dos quais 86% pertencem a Minas Gerais e 14% ao Espírito Santo (COELHO, 2007). A Figura 5 mostra a localização da bacia hidrográfica do rio Doce e a Figura 6 apresenta a bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Sul bem como a bacia hidrográfica do ribeirão Cachoeira do Brumado.

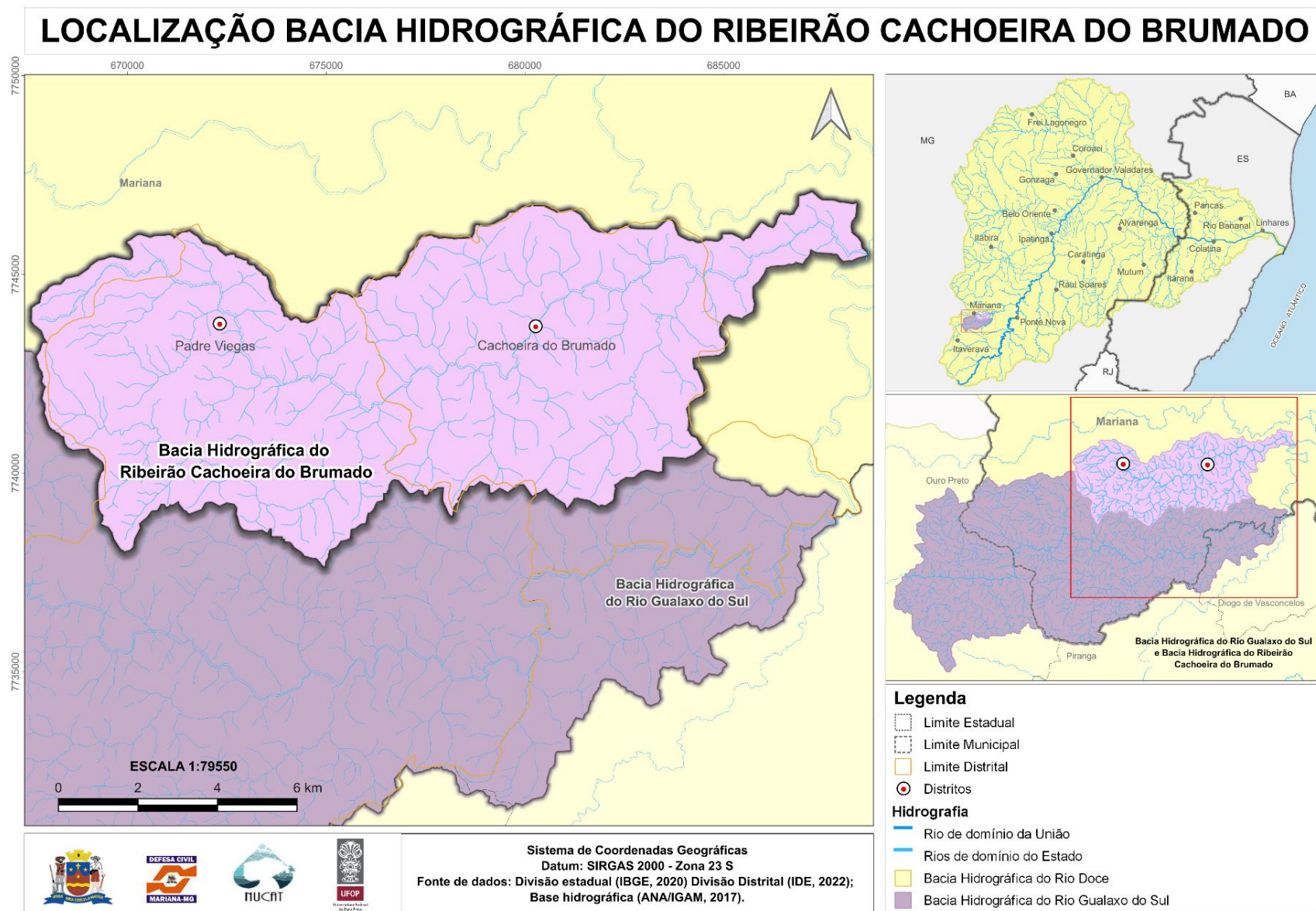


Figura 6: Bacia hidrográfica do ribeirão Cachoeira do Brumado que pertence à bacia do rio Gualaxo do Sul (AUTORA, 2022).

3.1.1 Clima

O clima pode ser determinado pelas condições médias da circulação geral da atmosfera, pela localização quanto às fontes de umidade e pela altitude do relevo. Em Minas Gerais, o clima encontra-se sob o domínio da circulação do anticiclone subtropical do Atlântico Sul, com ocorrência de ventos predominantemente na porção nordeste-leste (CETEC, 1983).

No município de Mariana, segundo a CPRM (1993) e seguindo a classificação climática de Köppen, apresentam-se dois tipos climáticos distintos: o Cwa e o Cwb. O primeiro (Cwa) predomina nas partes menos elevadas, compreendendo um clima úmido com verões quentes e pluviosidade média anual de 1.100 a 1.500 mm, estação seca curta e temperatura média anual entre 19,5 e 21,8 °C. Enquanto isso, o segundo (Cwb) é predominante nas porções mais elevadas, com verões mais brandos e sua temperatura média anual fica entre 17,4 e 19,8 °C. O índice médio pluviométrico anual na cidade é de 1.800 mm e os meses de dezembro, janeiro e fevereiro são os que registram as maiores precipitações (SOUZA, 2004).

Ressalta-se que como Cachoeira do Brumado é um distrito do município de Mariana com poucos estudos feitos até o momento, não foram localizados dados específicos de seu clima. Dessa forma, será considerado que o clima do distrito seja igual ao da cidade à qual ele pertence.

3.1.2 Histórico de inundações em Cachoeira do Brumado

Historicamente, o distrito de Cachoeira do Brumado apresenta período chuvoso compreendido entre os meses de novembro a março. As chuvas mais intensas concentram-se no fim de dezembro e durante o mês de janeiro. Um dos fatores que ocasiona a inundação do ribeirão Cachoeira do Brumado é a ocorrência de precipitação de grande intensidade e curta duração no distrito de Padre Viegas, onde está localizada a cabeceira dele.

Cachoeira do Brumado sempre sofreu com os problemas advindos das inundações. A última inundação que aconteceu foi no início de 2020, uma das maiores registradas no local, como pode ser observado na Figura 7.



Figura 7: Imagem aérea da inundação de 2020 no distrito de Cachoeira do Brumado (DEFESA CIVIL, 2020).

3.2 Delimitação de duas sub-bacias da bacia hidrográfica do ribeirão Cachoeira do Brumado

Para se delimitar sub-bacias da bacia do ribeirão Cachoeira do Brumado utilizou-se o *software* ArcGIS Pro, com licença gratuita, que possui em seus componentes a caixa de ferramentas *Hydrology*, localizada no menu *Spatial Analyst Tool*. Esta ferramenta é designada para realizar análises hidrológicas e pode gerar direções de fluxo, delimitações de bacias hidrográficas, redes de drenagem, áreas de contribuição, entre outros, a partir de um MDE em formato *raster*.

O *raster* usado foi obtido por meio do portal TOPODATA (Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil) do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Para a correção deste *raster* foi utilizada a ferramenta *Fill* do ArcGIS Pro. Com as *shapefiles* de ponto obtidas, marcou-se o exutório de cada sub-bacia sobre a rede de

drenagem imediatamente antes da confluência com o ribeirão Cachoeira do Brumado, para o programa reconhecer a sub-bacia afluente a ele. Dessa forma, com o *shapefile* de cada exutório e a direção de fluxo de cada sub-bacia, utilizando a ferramenta *watershed*, delimitaram-se a sub-bacia 1 e a sub-bacia 2.

3.3 Equação IDF

De acordo com Tucci (2004), a precipitação pode ser definida como toda água proveniente do meio atmosférico que alcança a superfície terrestre. Os dados pluviométricos usados neste trabalho foram retirados do portal HidroWeb, que pertence à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Este portal é de extrema importância, pois disponibiliza de forma gratuita o banco de dados com todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN).

Para identificar as estações pluviométricas mais representativas do regime de chuvas das sub-bacias da bacia do ribeirão Cachoeira do Brumado, foi necessário analisar a sua localização e a disponibilidade de dados. Ou seja, as estações escolhidas deveriam estar dentro ou próximas à área e conter registros em quantidade e qualidade suficientes para o estudo.

Verificou-se que não havia registros pluviométricos dentro da área em questão. Dessa maneira, a busca por registros extrapolou os limites da delimitação das sub-bacias. A estação pluviométrica escolhida foi a Fazenda Paraíso, já que é a estação que possui dados coletados de 80 anos consecutivos (outubro de 1941 a setembro de 2021) e está localizada mais próxima do ponto de exutório das sub-bacias hidrográficas (a cerca de 11,6 km e 11,2 km, da sub-bacia 1 e da sub-bacia 2, respectivamente). Na Tabela 4 podem-se observar as principais características da estação escolhida e a Figura 8 apresenta sua localização.

Tabela 4: Características técnicas da estação pluviométrica escolhida (HIDROWEB, 2022).

Código	Nome da estação	Município	UF	Entidade	Latitude	Longitude
2043011	Fazenda Paraíso	Mariana	MG	ANA	-20°39'00"	-43°18'00"

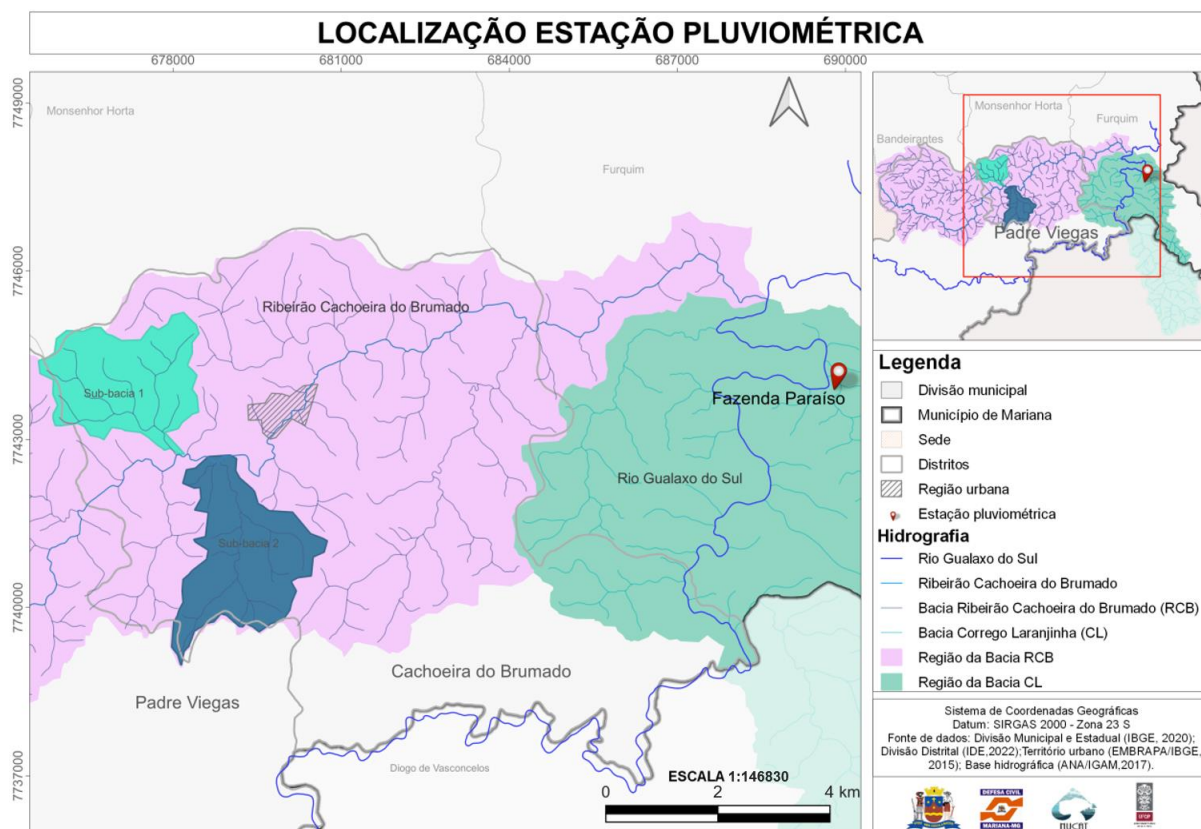


Figura 8: Localização da estação pluviométrica estudada (AUTORA 2022).

Os procedimentos adotados para obtenção dos parâmetros da equação IDF estão listados e detalhados a seguir, segundo Gandini (2016).

Para a identificação de possíveis *outliers*, a fim de evitar valores mínimos ou máximos que prejudicassem os procedimentos estatísticos, aplicaram-se os testes de Grubbs (1969) e de Grubbs e Beck (1972), na série anual de chuvas máximas diárias. Todos os cálculos foram realizados no Excel.

Os valores de probabilidade de excedência das precipitações foram calculados para as seguintes distribuições de probabilidade: Log Normal, Pearson tipo III, Log Pearson tipo III, Gumbel Teórica e Gumbel Finita. Todas estas distribuições foram plotadas com o auxílio do Excel. Logo após, a fim de identificar a distribuição que apresentasse a curva mais bem ajustada aos valores da série histórica, fez-se uma análise visual dos gráficos obtidos e calcularam-se, para cada distribuição estatística, o valor do coeficiente de determinação (R^2) e as estatísticas do teste de aderência de

Kolmogorov-Smirnov que são: o $D_{\text{máx}}$, o $D_{\text{crítico}}$ e o p-Valor; detalhes do teste bem como a equação de cada um destes parâmetros podem ser encontrados em Gandini (2016).

Após ser definida a distribuição de probabilidade a ser adotada, determinaram-se as chuvas de tempos de retorno de 2, 5, 10, 20, 30, 50, 75 e 100 anos. Em seguida, calcularam-se as intensidades, agrupando-as em tempos de recorrência e tempos de duração. Com o auxílio da ferramenta Solver do Excel, fez-se o processo de regressão não linear para os conjuntos de valores de período de retorno, duração e intensidade para dois intervalos de tempos: de 5 a 60 minutos e 60 a 1.440 minutos. Essa separação em dois intervalos, um de pequena e outro de longa duração, objetiva diminuir erros provenientes da diferença de tendência nas intensidades entre chuvas, conforme observado por Martins et al. (2017).

3.4 Classificação hidrológica do solo

A determinação da pedologia das sub-bacias do ribeirão Cachoeira do Brumado foi realizada com os dados obtidos pelo Mapa de Solos de Minas Gerais de 2010, desenvolvido pela Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) e pela Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), em colaboração com a Universidade Federal de Viçosa (UFV) e a Universidade Federal de Lavras (UFLA) em uma escala de 1:500.000. Essas informações foram retiradas do portal da IDE-Sisema (Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos) disponível em <http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>, e processadas no *software* QGIS.

Através da *shapefile* de solos limitaram-se os dados para região de estudo e fez-se a classificação dos solos de acordo com a EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Após a determinação de quais solos estão presentes na área das sub-bacias, eles foram enquadrados em um dos quatro grupos hidrológicos do método do SCS, seguindo a classificação proposta por Sartori, Neto & Genovez (2005). Devido à escala do mapa, algumas áreas são designadas com siglas que representam um agrupamento de dois ou mais solos, sendo assim, nesses casos optou-se por seguir duas abordagens: enquadrar a sigla pelo tipo de solo predominante naquela composição e considerar todos os solos presente de acordo

com sua respectiva porcentagem, fazendo uma média ponderada dos grupos hidrológicos.

3.5 Uso e ocupação do solo

Para definir o uso e ocupação do solo das sub-bacias do ribeirão Cachoeira do Brumado utilizou-se a imagem 23K_20210101-20220101, fornecida pela empresa ESRI (empresa de *software* de mapeamento de sistema de informações geográficas) em escala mundial, com resolução de 10 metros e precisão de 86%.

Com a imagem supracitada, procedeu-se para uma classificação supervisionada. Todas as classificações de uso e ocupação do solo mostrados na Tabela 5 foram baseadas nos dados fornecidos pela própria ESRI através do portal <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=d6642f8a4f6d4685a24ae2dc0c73d4ac>, exceto a classificação “Pastagens”, que foi obtida pelo ArcGIS Pro, já que o *software* possui em seu banco de dados o Atlas de Uso e Ocupação do solo também fornecido pela empresa.

Tabela 5: Classificação de uso e ocupação do solo (AUTORA, 2022).

Curvas	Classificação de Uso e Ocupação do Solo - ESRI
1	Corpo d'água
2	Árvores
3	Grama
4	Vegetação inundada
5	Plantações
6	Arbusto
7	Área construída
8	Solo exposto
9	Neve
10	Nuvens
11	Pastagens

Com os dados já classificados, foi feita apenas a vetorização destes através da ferramenta “*Raster para vetor (poligonizar)*”, da caixa de ferramentas GDAL, do software QGIS. Por meio da tabela de atributos foi possível obter a área ocupada por cada classe encontrada, além disso, foi feita uma equivalência dessas classes com as classes propostas pelo IBGE (2020), haja vista que ele vem monitorando, continuamente, a cobertura e o uso da terra no Brasil e fazendo comparações a cada dois anos. O mapeamento do uso e ocupação do solo é de grande importância, visto que, o Brasil está sempre em constante transformação. Dessa forma, o IBGE (2020) lançou um relatório contendo as classes de cobertura e uso da terra do Brasil no período de 2016 a 2018.

3.6 CN para cada cenário

A seguir apresenta-se como foram estabelecidos quatro cenários para a modelagem hidrológica. Primeiramente será explicado como foi estabelecido o grupo hidrológico dos solos encontrados e depois como foi determinada a qual condição da superfície cada uso e ocupação do solo se encaixava. Com as duas informações, pode-se obter os valores de CN para cada cenário.

Para os Cenários 1, 2 e 3, considerou-se o tipo de solo com maior porcentagem em cada sigla para enquadrá-las em um dos quatro grupos hidrológicos do método do SCS. Já para o Cenário 4, foi feito de maneira diferente, todos os solos que constituem as siglas foram classificados e uma média ponderada foi feita segundo suas respectivas porcentagens de constituição da sigla. Em todos os cenários, utilizou-se a categorização estabelecida por Sartori, Neto & Genovez (2005).

Como não há um grande detalhamento sobre a região em estudo e nem números limites para realizar a classificação da condição da superfície de uso e ocupação do solo, para os Cenários 1 e 4, utilizou-se a condição intermediária ou Normal. Para o Cenário 2, considerou-se a pior situação de geração do escoamento superficial direto. E para o Cenário 3, procurou-se aumentar um pouco a infiltração do Cenário 2.

3.7 Modelagem hidrológica

Os três subtópicos a seguir detalham os procedimentos para obtenção do tempo de concentração, dos hietogramas e dos hidrogramas do escoamento superficial direto.

3.7.1 Tempo de concentração

Para se calcular o tempo de concentração das sub-bacias do ribeirão Cachoeira do Brumado, escolheram-se três das diversas equações contidas na literatura, são elas: a equação de Kirpich (adaptação da equação de KIBLER, 1982), a de Corps of Engineers e a de Ven-Te-Chow. Todas são recomendadas para bacias que se aproximam das características das sub-bacias em estudo, rurais e de pequeno porte. As respectivas equações foram retiradas de Silveira (2005) e estão expressas a seguir.

$$t_{c \text{ Kirpich}} = 0,0663 \cdot L^{0,77} \cdot S^{-0,385} \quad (3.1)$$

$$t_{c \text{ CorpsofEngineers}} = 0,191 \cdot L^{0,76} \cdot S^{-0,19} \quad (3.2)$$

$$t_{c \text{ VenTeChow}} = 0,160 \cdot L^{0,64} \cdot S^{-0,32} \quad (3.3)$$

Nas equações apresentadas, t_c é o tempo de concentração em horas (h), L o comprimento do percurso hidráulico em quilômetros (km) e S a declividade do percurso hidráulico em metros por metro (m/m). As variáveis L e S foram encontradas pelo QGIS, a primeira através da Tabela de Atributos do vetor do maior percurso hidráulico exportado; já a segunda foi necessário utilizar algumas relações matemáticas para se chegar ao resultado mais representativo para a declividade média do comprimento hidráulico.

Dessa maneira, escolheu-se utilizar quatro métodos e fez-se a média aritmética entre os resultados obtidos por eles para encontrar o valor médio final da declividade. Suas respectivas equações foram retiradas de Barbosa Jr. (2022) e estão expressas a seguir.

$$S_1 = \frac{(z_{\text{cabeceira}} - z_{\text{foz}})}{L} \quad (3.4)$$

$$S_{10-85} = \frac{z_{85\%} - z_{10\%}}{0,75L} \quad (3.5)$$

$$S_2 = 2 \frac{A_p}{L^2} - 2 \frac{z_{foz}}{L} \quad (3.6)$$

$$S_3 = \frac{L^2}{\left[\sum \left(\frac{L_i}{\sqrt{S_i}} \right) \right]^2} \quad (3.7)$$

onde: S_1 é a declividade entre extremos; $z_{cabeceira}$ é a cota da cabeceira; z_{foz} é a cota da foz; L é o comprimento do percurso hidráulico; S_{10-85} é a declividade entre extremos 10% e 85%; $z_{85\%}$ e $z_{10\%}$ são a altitude a 85% e a 10%, respectivamente, do comprimento hidráulico medido a partir da foz; S_2 é a declividade ponderada; A_p é a área abaixo da linha do perfil do canal; S_3 é a declividade equivalente constante; L_i é o comprimento do trecho i e S_i é a declividade do trecho i .

O valor médio da declividade foi usado em cada uma das equações escolhidas para o tempo de concentração, Kirpich, Corps of Engineers e Ven-Te-Chow. Com os valores encontrados para cada fórmula, eliminou-se o valor mais discrepante entre as três equações e fez-se a média entre os outros dois valores.

3.7.2 Hietograma

Para a construção dos hietogramas de blocos alternados, considerou-se o tempo de duração da chuva crítica como sendo igual ao tempo de concentração da sub-bacia e o período de retorno de 100 anos. Através destes dados e com as equações IDF obtidas, calcularam-se as intensidades das chuvas correspondentes às durações acumuladas de 10 em 10 minutos (intervalo de discretização adotado) até a duração da chuva crítica, em mm/h.

A partir dos valores de intensidade, calcularam-se as precipitações, que são valores acumulados. Logo em seguida, desacumularam-se os valores das precipitações e reordenaram-se em uma sequência alternada, de maneira que no centro estivesse o bloco de maior precipitação e os demais organizados em ordem decrescente, um à esquerda e outro à direita do bloco de maior altura, sucessivamente. Esses valores reordenados foram acumulados, para então se aplicar

a Equação 2.14, os resultados encontrados foram desacumulados a fim de se determinar as precipitações efetivas em cada intervalo. Todo esse processo foi feito com o auxílio do *software* Microsoft Excel, individualmente para cada sub-bacia e para o valor de CN calculado para cada cenário.

3.7.3 Transformação Chuva-Vazão

As transformações de chuva para vazão também foram realizadas com o auxílio do *software* Microsoft Excel, utilizando-se o método do SCS que possibilitou determinar os hidrogramas de resposta das sub-bacias para o tempo de retorno adotado (100 anos).

Nas simulações feitas, os dados de precipitação foram inseridos por meio de hietogramas de blocos alternados da chuva efetiva. Foram desconsideradas as perdas por evapotranspiração e evaporação, preocupando-se apenas com as perdas por infiltração. Além disso, o tempo de retardo foi considerado como sendo 60% do tempo de concentração das sub-bacias.

Determinou-se o hidrograma unitário para chuva de duração de 10 minutos e a partir dele, obtiveram-se os hidrogramas de escoamento superficial direto correspondentes à chuva efetiva, P_{ef} , e mesma duração, t_d , para cada uma das sub-bacias. Para isto, primeiramente, multiplicaram-se as ordenadas do HU ($t_d = 10$ min) pela primeira chuva efetiva, em centímetros. Repetiu-se o processo para a segunda chuva efetiva, levando-se em consideração a defasagem t_d em relação à chuva anterior (neste caso, de 10 minutos), dessa forma, multiplicou-se o HU deslocado pela segunda chuva efetiva. Este mesmo processo foi realizado para as demais chuvas efetivas. Sendo assim, os hidrogramas resultantes foram obtidos pela superposição (soma) dos hidrogramas isolados gerados por cada uma das precipitações de duração $t_d = 10$ min.

4 RESULTADOS

4.1 Delimitação de duas sub-bacias da bacia hidrográfica do ribeirão Cachoeira do Brumado

O tema escolhido para ser abordado neste TCC faz parte de um projeto juntamente com o NuCat (Núcleo da Cátedra da UNESCO: Águas, mulheres e desenvolvimento) e a Defesa Civil de Mariana que busca estudar as inundações no distrito de Cachoeira do Brumado. Para o presente trabalho escolheram-se duas sub-bacias (Figura 9) afluentes do ribeirão Cachoeira do Brumado, que é o maior contribuinte para a ocorrência de inundações na área estudada.

A escolha das duas sub-bacias em questão objetivou também comparar a influência do uso e cobertura do solo na vazão de pico do escoamento superficial, e consequentemente na contribuição para que aconteçam inundações em Cachoeira do Brumado. A primeira sub-bacia escolhida para estudo possui uma área de 4,62 km², já a segunda contempla uma área de 5,00 km², sendo ambas de pequeno porte, portanto, não foi preciso subdividi-las em outras sub-bacias menores.

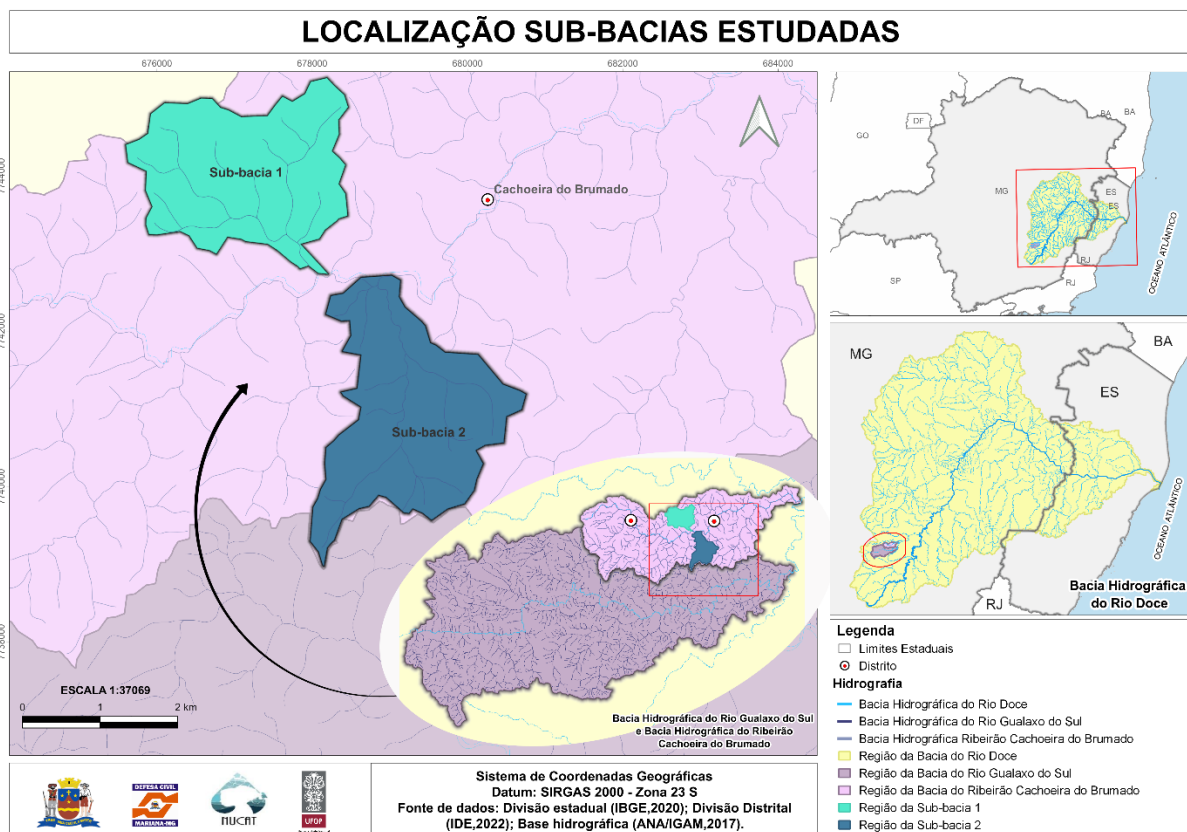


Figura 9: Delimitação de duas sub-bacias do ribeirão Cachoeira do Brumado (AUTORA, 2022).

4.2 Equação IDF

Neste trabalho, o critério adotado considerou um dado como *outlier* somente se este resultado fosse observado nos dois métodos escolhidos. Este fato não ocorreu, visto que o teste de Grubbs (1969) apresentou apenas um *outlier* máximo, enquanto o teste de Grubbs e Beck (1972) resultou somente em um *outlier* mínimo. Dessa forma, não foram excluídos valores de precipitação da série histórica.

Os coeficientes de determinação (R^2), os valores de $D_{\text{máx}}$ e de p-Valor do teste de Kolmogorov-Smirnov, obtidos para as distribuições teóricas estão dispostos na Tabela 6. As Figuras 10 a 14 apresentam os gráficos obtidos através do Excel.

Todos os valores de $D_{\text{máx}}$ foram menores que o $D_{\text{crítico}}$ que, para o nível de significância de 10% e uma amostra de 80 valores, vale 0,1349, o que fez com que nenhuma das distribuições testadas fosse rejeitada para explicar a tendência dos dados.

Tabela 6: Valores do coeficiente de determinação, $D_{\text{máx}}$ e de p-Valor por distribuição de probabilidade (AUTORA, 2022).

Distribuição de Probabilidade	R^2	$D_{\text{máx}}$	p-Valor
Log Normal	0,9958	0,0533	0,0264
Pearson Tipo III	0,9952	0,0546	0,0330
Log Pearson Tipo III	0,9872	0,0981	0,5867
Gumbel Teórica	0,9930	0,0660	0,1350
Gumbel Finita	0,9946	0,0612	0,0830

A distribuição que obteve as melhores métricas, ou seja, o maior R^2 , o menor $D_{\text{máx}}$ e o menor p-Valor foi a Log Normal, portanto ela foi usada para determinação das equações IDF. Após analisar os gráficos plotados, constatou-se também que ela explica bem a tendência dos maiores valores de precipitação, o que é de extrema importância para o estudo de cheias.

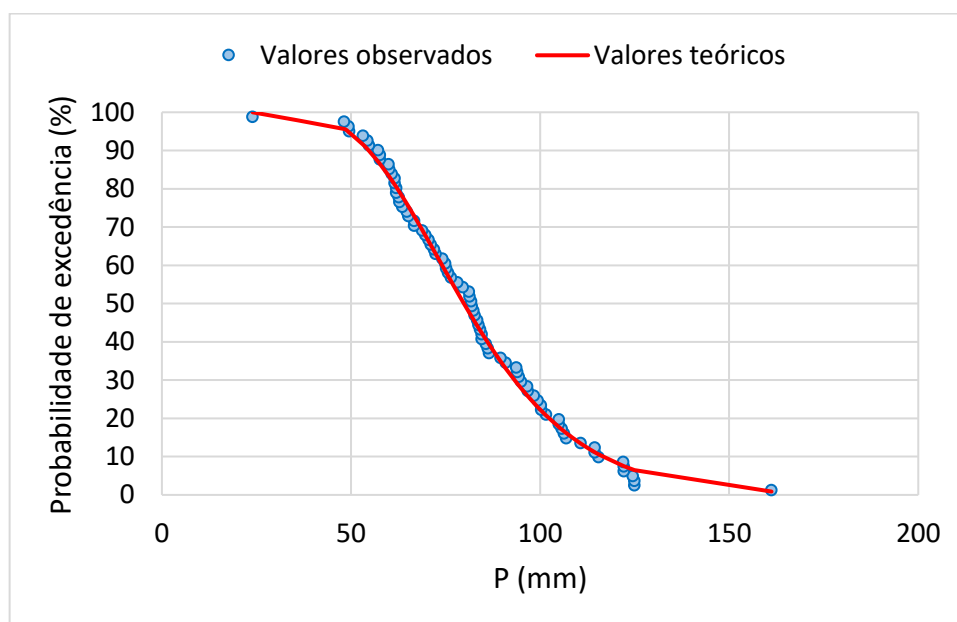


Figura 10: Gráfico da distribuição Log Normal (AUTORA, 2022).

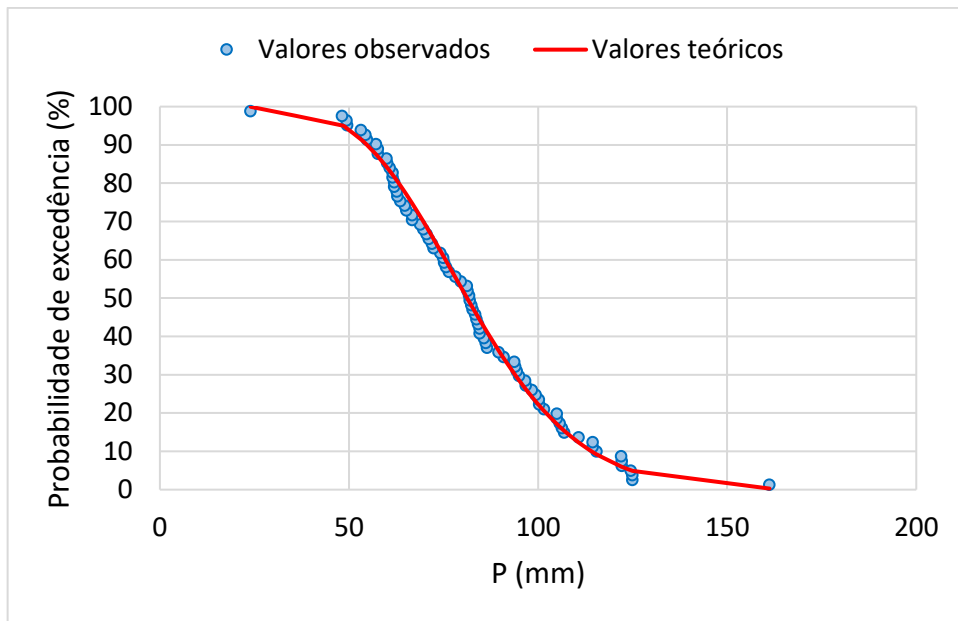


Figura 11: Gráfico da distribuição Pearson tipo III (AUTORA, 2022)

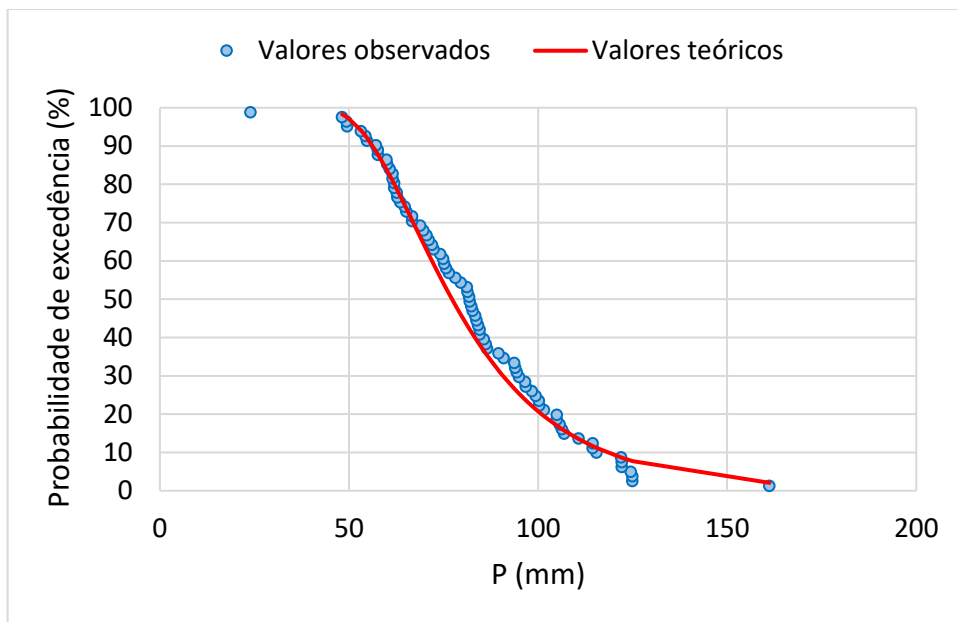


Figura 12: Gráfico da distribuição Log Pearson tipo III (AUTORA, 2022).

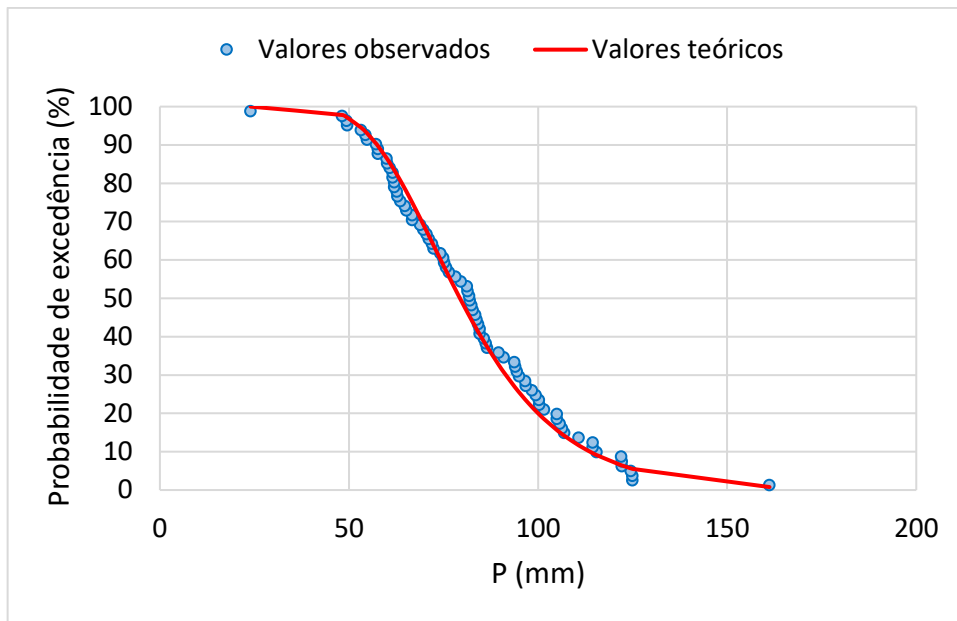


Figura 13: Gráfico da distribuição Gumbel Teórica (AUTORA, 2022).

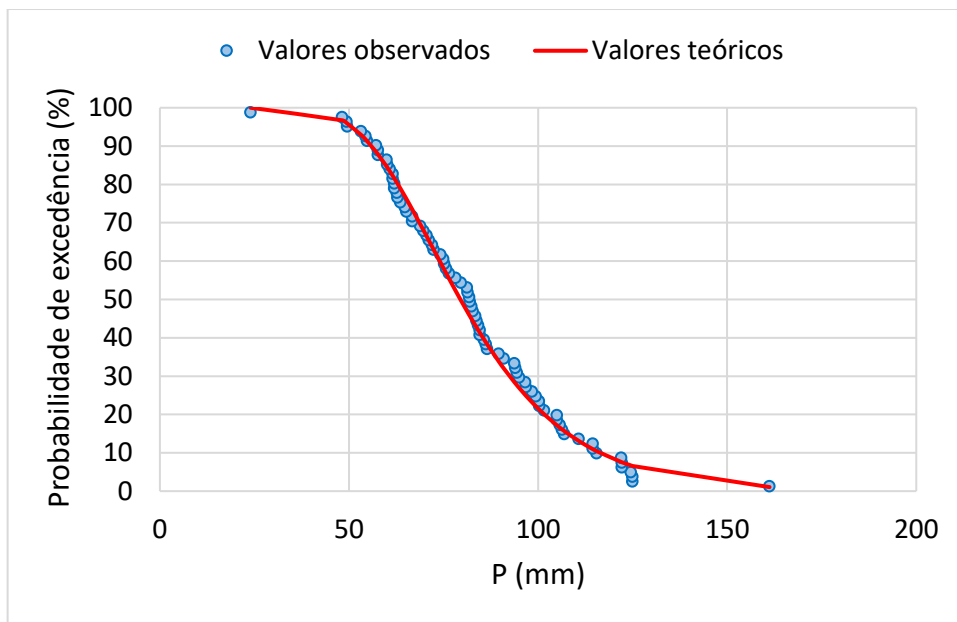


Figura 14: Gráfico da distribuição Gumbel Finita (AUTORA, 2022).

Depois de realizar a regressão não linear, obtiveram-se os parâmetros, apresentados na Tabela 7, de calibração da equação IDF para cada um dos dois intervalos de tempos de duração considerados, sendo que esses parâmetros devem

ser inseridos na Equação 2.1, com T_r em anos e t_d em minutos, para encontrar a intensidade em mm/h.

Tabela 7: Parâmetros de ajuste das equações IDF (AUTORA, 2022).

Intervalo (min)	K	m	c	n
$5 \leq t_d \leq 60$	592,918	0,155	7,218	0,651
$60 \leq t_d \leq 1.440$	985,996	0,151	11,385	0,760

Comparando os valores da intensidade real com aqueles calculados pela equação IDF, chegou-se a um erro relativo menor que 3% (primeiro intervalo: 2,769%; segundo intervalo: 2,878%). Isso comprova que a distribuição de probabilidade Log Normal representou de maneira satisfatória os dados da série histórica, o que pode ser comprovado pelos gráficos das Figuras 15 e 16, uma vez que os valores calculados são bem semelhantes aos valores observados, pois a linha de tendência tem inclinação próxima a 45°, o que indica $y = x$, e o coeficiente de determinação pode ser considerado praticamente 1, indicando que essa linha descreve bem o comportamento dos pontos plotados.

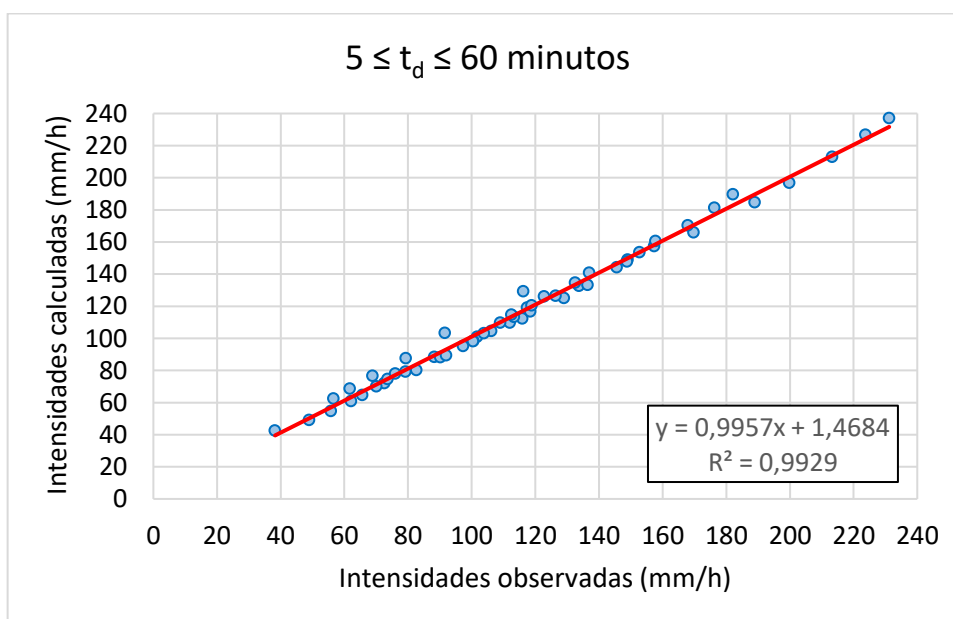


Figura 15: Comparação entre valores observados e calculados para o intervalo de 5 a 60 minutos (AUTORA, 2022).

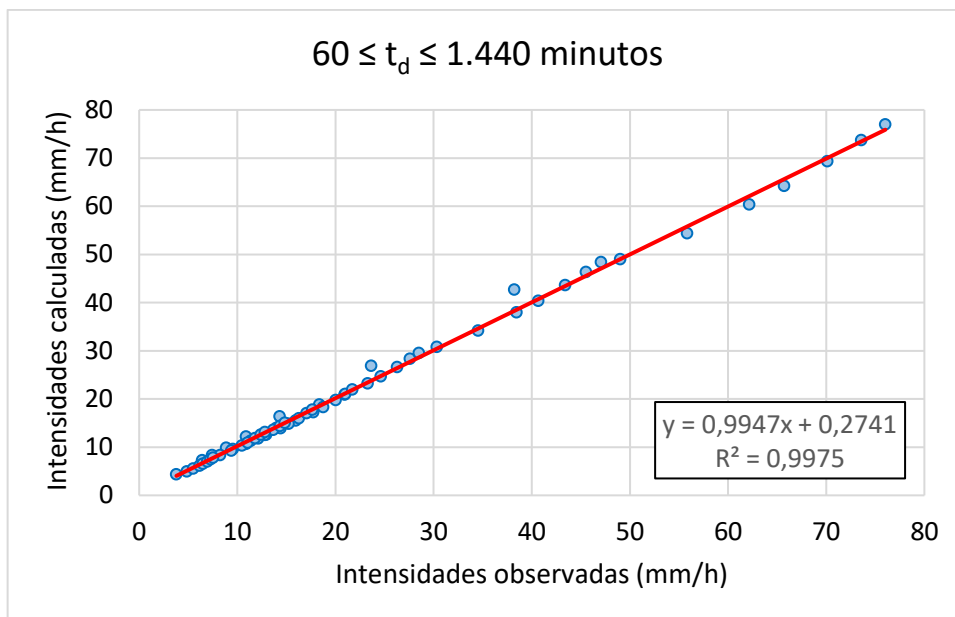


Figura 16: Comparação entre valores observados e calculados para o intervalo de 60 a 1.440 minutos (AUTORA, 2022).

4.3 Classificação hidrológica do solo

Após ser plotado o mapa com a pedologia da região das sub-bacias em estudo, identificaram-se os solos ali presentes e suas respectivas áreas. Foram constatados os solos com as siglas LVd13 e LVAd28. Para obter as áreas de cada um, utilizou-se a Calculadora da Tabela de Atributos no QGIS, a Tabela 8 quantifica a porcentagem da área ocupada por cada tipo de solo encontrado para cada sub-bacia e sua disposição está demonstrada na Figura 17.

Conforme FEAM (2010), as siglas se referem a:

- LVd13 → LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, A moderado, textura muito argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo forte ondulado/montanhoso (35%) + LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico, A moderado, textura muito argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo forte ondulado/ montanhoso (30%) + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico, A moderado, textura argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo forte ondulado/ montanhoso (20%) + ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico, A moderado,

textura muito argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo ondulado (15%) e

- LVAd28 → LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico, A moderado, textura argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo forte ondulado (35%) + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico, A moderado, textura argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo forte ondulado (30%) + LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, A moderado, textura argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo forte ondulado (20%) + ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico, A moderado, textura argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo forte ondulado (15%).

Em ambas as siglas, o tipo de solo predominante é o Latossolo, de acordo com Sartori, Neto & Genovez (2005) e FEAM (2010), tem-se que os Latossolos são solos constituídos por material mineral, encontrados em relevos pouco movimentados, com declives inferiores a 5%. Apresentam excepcional porosidade total sendo comuns valores de 50 a 60% mesmo nos mais argilosos. São solos que possuem boa drenagem interna, atribuída a essa grande porosidade. No conjunto apresentam baixa erodibilidade associado a baixo potencial de escoamento superficial direto, porém quando submetidos à concentração d'água proveniente da ocupação antrópica, podem desenvolver ravinas profundas e, se interceptar o lençol freático, voçorocas.

Tabela 8: Tipo de solo e área ocupada nas sub-bacias (AUTORA, 2022).

Sub-bacia	Tipo de solo	Área ocupada (km²)	Área ocupada (%)
1	LVd13	3,74	81,0
	LVAd28	0,88	19,0
2	LVAd28	5,00	100

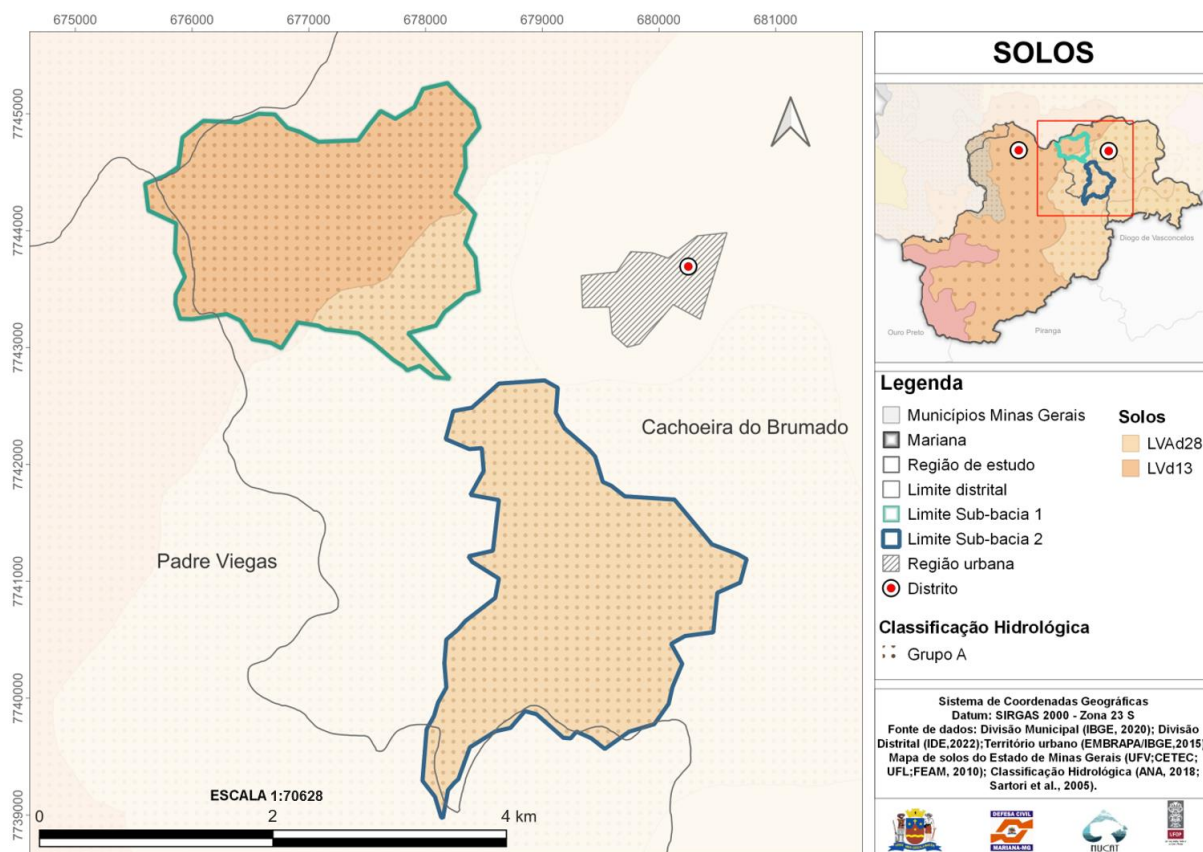


Figura 17: Mapa pedológico das sub-bacias (AUTORA, 2022).

Para os Cenários 1, 2 e 3, tanto o LVd13 quanto o LVAd28 foram enquadrados no grupo A, por ter o Latossolo predominante. Para o Cenário 4, os solos Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Amarelo foram classificados como grupo A; o Cambissolo Háplico como grupo C e por fim, o Argissolo Vermelho-Amarelo foi classificado como do grupo B.

4.4 Uso e ocupação do solo

Fazendo o recorte das sub-bacias em estudo, constatou-se que Árvores é a ocupação predominante do solo na sub-bacia 1, já na sub-bacia 2 predomina-se a ocupação de Pastagem, como mostra a Figura 18 e a Tabela 9.

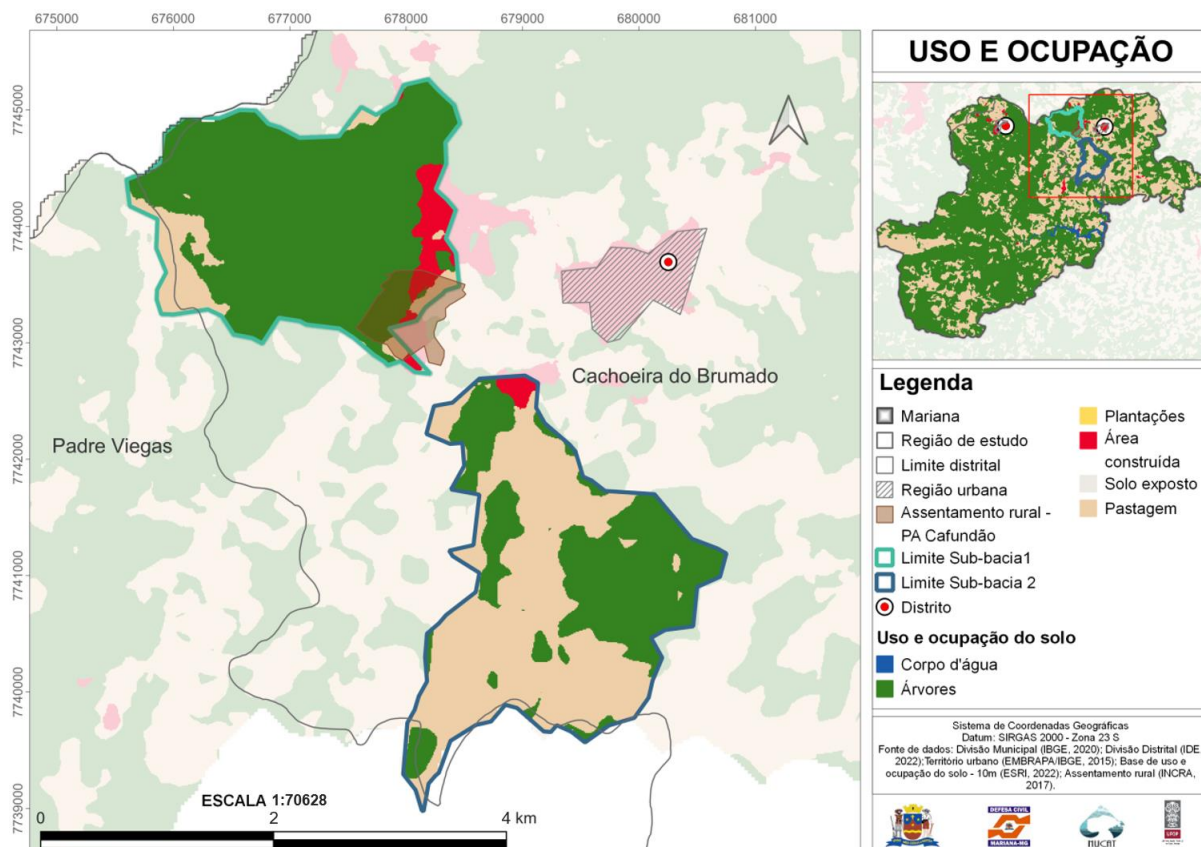


Figura 18: Uso e ocupação do solo das sub-bacias hidrográficas do ribeirão Cachoeira do Brumado (AUTORA, 2022).

Tabela 9: Uso e ocupação do solo das sub-bacias e suas respectivas áreas (AUTORA, 2022).

Sub-bacia	Tipo de uso e ocupação do solo	Área ocupada (km²)	Área ocupada (%)
1	Árvores	3,81	82,468
	Pastagem	0,52	11,255
	Área Construída	0,29	6,277
2	Árvores	2,10	42,000
	Pastagem	2,84	56,800
	Área Construída	0,06	1,200

A classificação supervisionada adotada, conforme o que se tem na área das sub-bacias, está de acordo com a classificação do IBGE (2020), visto que a classificação:

- Árvores se enquadra na classe Vegetação Florestal, já que compreende uma mata densa e preservada, com formações arbóreas de alto porte;
- Pastagem é compatível com a classe Pastagem com Manejo, uma vez que se caracteriza por uma área de pastoreio de gado e outros animais, com a presença de vegetação herbácea cultivada e
- Área Construída corresponde à classe Área Artificial, pois representa áreas urbanas com construção.

As definições detalhadas dessas classes estão transcritas a seguir (IBGE, 2020):

- Mosaico de Ocupações em Área Florestal: área caracterizada por ocupação mista de agricultura, pastagem e/ou silvicultura associada ou não a remanescentes florestais, na qual não é possível uma individualização de seus componentes. Inclui também áreas com perturbações naturais e antrópicas, mecânicas ou não mecânicas, que dificultem a caracterização da área;
- Pastagem com Manejo: áreas destinadas ao pastoreio do gado e outros animais, com vegetação herbácea cultivada (braquiária, azevém etc.) ou vegetação campestre (natural), ambas apresentando interferências antrópicas de alta intensidade. Estas interferências podem incluir o plantio; a limpeza da terra (destocamento e despedramento); eliminação de ervas daninhas de forma mecânica ou química (aplicação de herbicidas); gradagem; calagem; adubação entre outras que descaracterizem a cobertura natural e
- Área Artificial: áreas onde predominam superfícies antrópicas não-agrícolas. São aquelas estruturadas por edificações e sistema viário, nas quais estão incluídas as metrópoles, cidades, vilas, as aldeias indígenas e comunidades quilombolas, áreas de rodovias, serviços e transportes, redes de energia, comunicações e terrenos associados, áreas ocupadas por complexos industriais e comerciais e edificações que podem, em alguns casos, estar situadas em áreas peri-urbanas. Também pertencem a essa classe as áreas onde ocorrem a exploração ou extração de substâncias minerais, por meio de lavra ou garimpo.

4.5 CN para cada cenário

A interseção dos dados de grupos hidrológicos com os dados de uso e ocupação do solo e suas respectivas áreas, foi utilizada como parâmetro de entrada para obter o CN médio ponderado de cada cenário. Utilizaram-se os valores das Tabelas 2 e 3 para determinar os CNs individuais.

Conforme explicado no item 3.6 e os resultados apresentados no item 4.3, para os Cenários 1, 2 e 3, os solos LVd13 e LVAd28 foram classificados como grupo A, portanto o CN corresponde a 100% do valor tabelado para esse grupo e para o Cenário 4 fez-se uma média ponderada pelos solos que integram as siglas LVd13 e LVAd28, de acordo com as porcentagens da sua composição, sendo, portanto:

- LVd13
 - Latossolo Vermelho (35%)
 - Latossolo Vermelho-Amarelo (30%)
 - Cambissolo Háplico (20%)
 - Argissolo Vermelho-Amarelo (15%)

$$CN_{LVd13} = 0,65 \cdot CN_A + 0,15 \cdot CN_B + 0,20 \cdot CN_C \quad (4.1)$$

- LVAd28
 - Latossolo Vermelho-Amarelo (35%)
 - Cambissolo Háplico (30%)
 - Latossolo Vermelho (20%)
 - Argissolo Vermelho-Amarelo (15%)

$$CN_{LVAd28} = 0,55 \cdot CN_A + 0,15 \cdot CN_B + 0,30 \cdot CN_C \quad (4.2)$$

A Tabela 10 apresenta a classificação da condição da superfície de uso e ocupação do solo determinada para cada cenário.

As Tabelas 11 e 12 apresentam a porcentagem da área ocupada por cada classe de uso e ocupação do solo bem como os valores utilizados de CN para os Cenários 1, 2 e 3, sendo o CN médio calculado pela ponderação das áreas. A Tabela 13 exibe o CN ponderado para cada tipo de solo conforme as Equações 4.1 e 4.2 e na Tabela 14 é possível observar a área de cada solo e de cada uso e ocupação do solo, o valor do CN caso a caso e o valor do CN ponderado que foi utilizado para o Cenário 4.

Tabela 10: Condição da superfície de uso e ocupação do solo para cada cenário (AUTORA, 2022).

CENÁRIOS 1 E 4	CENÁRIO 2	CENÁRIO 3
Florestas normais (bacias rurais)	Florestas muito esparsas, baixa transpiração (bacias rurais)	Florestas esparsas (bacias rurais)
Pastagens normais, em curvas de nível (bacias rurais)	Pastagens pobres, em curvas de nível (bacias rurais)	
Área artificial como parques de estacionamento, telhados, viadutos etc. (bacias urbanas)		

Tabela 11: CN para a sub-bacia 1 dos Cenários 1 a 3 (AUTORA, 2022).

SUB-BACIA 1					
Classificação hidrológica		Floresta	Pastagem	Área artificial	CN médio
Grupo A	Área ocupada	82,468%	11,255%	6,277%	
	CN Cenário 1	36	25	98	38,7
	CN Cenário 2	56	47	98	57,6
	CN Cenário 3	46	47	98	49,4

Tabela 12: CN para a sub-bacia 2 dos Cenários 1 a 3 (AUTORA, 2022).

SUB-BACIA 2					
Classificação hidrológica		Floresta	Pastagem	Área artificial	CN médio
Grupo A	Área ocupada	42,000%	56,800%	1,200%	
	CN Cenário 1	36	25	98	30,5
	CN Cenário 2	56	47	98	51,4
	CN Cenário 3	46	47	98	47,2

Tabela 13: CN ponderado para cada tipo de solo do Cenário 4 (AUTORA, 2022).

Tipo de uso e ocupação do solo	CN por grupo hidrológico			CN ponderado	
	A	B	C	LVd13	LVAd28
Floresta	36	60	70	46,4	49,8
Pastagem	25	59	75	40,1	45,1
Área artificial	98	98	98	98,0	98,0

Tabela 14: CN para as sub-bacias 1 e 2 do Cenário 4 (AUTORA, 2022).

SUB-BACIAS 1 E 2						
Classificação hidrológica			Floresta	Pastagem	Área artificial	CN médio
Sub-bacia 1	LVd13	Área ocupada	69,9134% 3,23km ²	9,0909% 0,42km ²	1,9481% 0,09km ²	49,5
		CN Cenário 4	46,4	40,1	98	
	LVAd28	Área ocupada	12,5541% 0,58km ²	2,1645% 0,10km ²	4,3290% 0,20km ²	
		CN Cenário 4	49,8	45,1	98	
Sub-bacia 2	LVAd28	Área ocupada	42,0000% 2,10km ²	56,8000% 2,84km ²	1,2000% 0,06km ²	47,7
		CN Cenário 4	49,8	45,1	98	

O Cenário 1, com condições intermediárias, foi o que apresentou o menor CN para ambas as sub-bacias, enquanto o Cenário 2 que é para pior configuração de propiciar escoamento superficial direto foi o que apresentou o maior CN, conforme era esperado. A diferença entre esses dois cenários foi de aproximadamente 49% e 69% para a sub-bacia 1 e 2, respectivamente, o que é muito significativo, evidenciando o cuidado que se deve ter ao enquadrar a condição da superfície de uso e ocupação do solo. Para ambas as bacias, os Cenários 3 e 4 resultaram em CNs muito próximos e intermediários aos Cenários 1 e 2; ao considerar cada tipo de solo que compõe os grupos LVd13 e LVAd28 e condições normais da superfície encontrou-se um CN bastante próximo a apenas considerar o solo principal das siglas para determinar o grupo hidrológico e condições ruins da superfície de cada uso e ocupação.

4.6 Modelagem hidrológica

Nos três subtópicos seguintes apresentam-se os resultados para o tempo de concentração, hietogramas e hidrogramas do escoamento superficial direto para cada uma das sub-bacias.

4.6.1 Tempo de concentração

Com o auxílio do QGIS, obtiveram-se os parâmetros necessários para o cálculo do tempo de concentração das duas sub-bacias, que são: comprimento do maior percurso hidráulico (L) em quilômetros e sua declividade (S) em metros por metro.

Foi considerado como maior percurso hidráulico o comprimento do rio principal em cada sub-bacia, conforme destacado pela linha mais grossa nas Figuras 19 e 20.

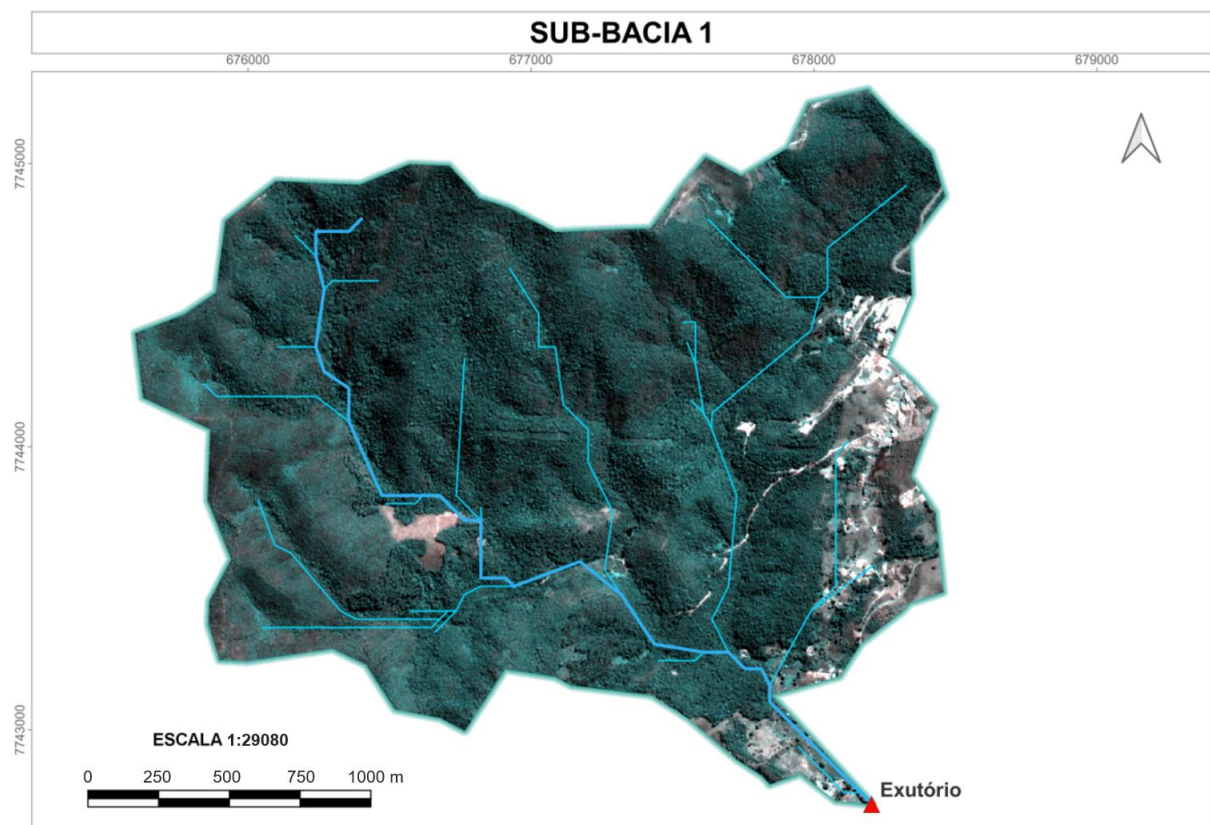


Figura 19: Maior percurso hidráulico da sub-bacia 1 (AUTORA, 2022).

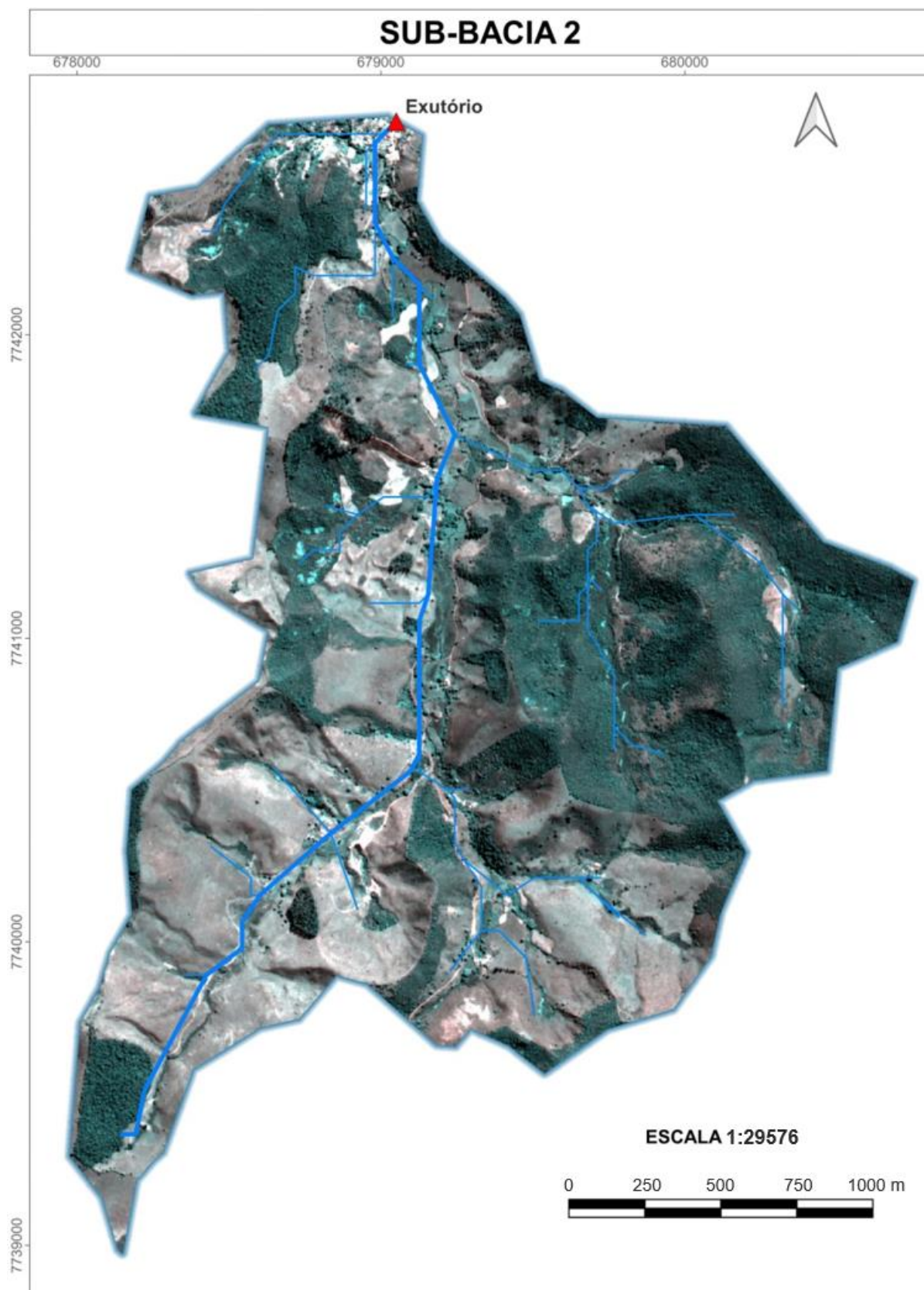


Figura 20: Maior percurso hidráulico da sub-bacia 2 (AUTORA, 2022).

Ao realizar o cálculo das declividades, percebeu-se que na sub-bacia 2 a altitude encontrada para a cota máxima ($z_{\text{cabeceira}}$) apresentou um valor de 724 m e o ponto anterior de 720 m em um intervalo de apenas 2,24 m, como pode-se verificar na Figura 21, o que resultou em um alto valor de declividade na cabeceira. Por se tratar do último ponto e como o comprimento do trecho em relação ao comprimento do rio é muito pequeno, considerou-se que este ponto não afetaria a análise. Infere-se que este fato ocorreu devido a algumas imperfeições no próprio MDE utilizado. Dessa forma, manteve-se esse valor anômalo para o cálculo das declividades, ressaltando essa observação.

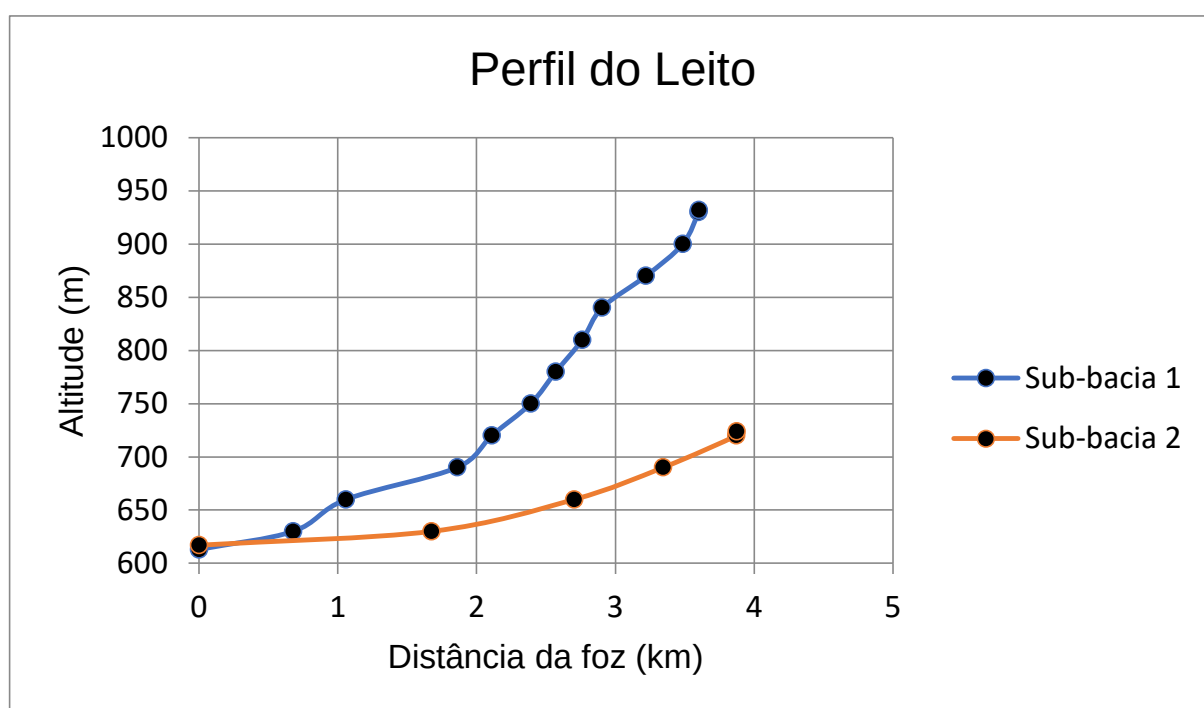


Figura 21: Perfil do leito do rio para as duas sub-bacias (AUTORA, 2022).

Os valores de declividade encontrados pelos quatro métodos utilizados neste trabalho e o valor médio adotado para cada sub-bacia podem ser observados na Tabela 15.

Tabela 15: Valores de declividade (AUTORA, 2022).

Sub-bacia	S₁ (m/m)	S₁₀₋₈₅ (m/m)	S₂ (m/m)	S₃ (m/m)	S adotado (m/m)
1	0,09	0,09	0,06	0,06	0,07
2	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02

Ademais, utilizando-se dessas informações, calculou-se o tempo de concentração para as duas sub-bacias pelas equações escolhidas.

Para a sub-bacia 1 obteve-se um valor de 3.603,71 metros (3,6 km) de comprimento do percurso hidráulico e 0,07 metros/metro de declividade. Sendo assim, os valores de tempo de concentração obtidos com as três equações serão mostrados a seguir.

$$t_{\text{Kirpich}} = 0,49 \text{ horas} \quad (4.3)$$

$$t_{\text{CorpsOfEngineers}} = 0,84 \text{ horas} \quad (4.4)$$

$$t_{\text{VenTeChow}} = 0,85 \text{ horas} \quad (4.5)$$

Já para a sub-bacia 2 o valor do comprimento do percurso hidráulico obtido foi 3.874,74 metros (3,87 km) e a declividade 0,02 metros/metro. Os resultados obtidos para o tempo de concentração desta sub-bacia pelas três equações estão demonstrados a seguir.

$$t_{\text{Kirpich}} = 0,85 \text{ horas} \quad (4.6)$$

$$t_{\text{CorpsOfEngineers}} = 1,12 \text{ horas} \quad (4.7)$$

$$t_{\text{VenTeChow}} = 1,33 \text{ horas} \quad (4.8)$$

Para a escolha do tempo de concentração de cada sub-bacia eliminou-se o valor mais discrepante entre os três obtidos e fez-se a média entre os outros dois valores. A Tabela 16 apresenta o comprimento e a declividade adotados, os tempos de concentração para cada equação e o valor do tempo de concentração utilizado para as duas sub-bacias.

Tabela 16: Tempo de concentração (AUTORA, 2022).

Sub-bacia	L (km)	S (m/m)	tc Kirpich (h)	tc Corps of Engineers (h)	tc Ven-Te-Chow (h)	tc adotado (h)
1	3,60	0,07	0,49	0,84	0,85	0,85
2	3,87	0,02	0,85	1,12	1,33	1,23

Determinou-se, então, que o tempo de concentração da sub-bacia 1 é de 0,85 horas e da sub-bacia 2 é de 1,23 horas.

4.6.2 Hietograma

Na construção dos hietogramas para o período de retorno de 100 anos, adotou-se uma duração de 50 minutos para a sub-bacia 1, arredondando o tempo de concentração de 0,85 horas para baixo, a favor da segurança. O mesmo processo foi feito para a sub-bacia 2, arredondando o tempo de concentração de 1,23 horas para 70 minutos.

Para o CN, foram adotados todos os valores calculados e mostrados anteriormente. Fizeram-se hietogramas para cada valor de CN e para cada sub-bacia, totalizando oito hietogramas.

Os intervalos de tempo considerados foram de 10 minutos, totalizando 5 blocos para a primeira sub-bacia e 7 blocos para a segunda sub-bacia. A equação IDF aplicada na sub-bacia 1 foi aquela obtida para o intervalo de 5 a 60 minutos, devido ao tempo de concentração ser menor que 60 minutos. Já para a sub-bacia 2, utilizou-se esta mesma equação IDF e também a equação obtida para o tempo de 60 a 1.440 minutos, já que o tempo de concentração determinado foi maior que 60 minutos.

Todos os hietogramas obtidos para as sub-bacias estão apresentados a seguir nas Figuras 22 a 29.

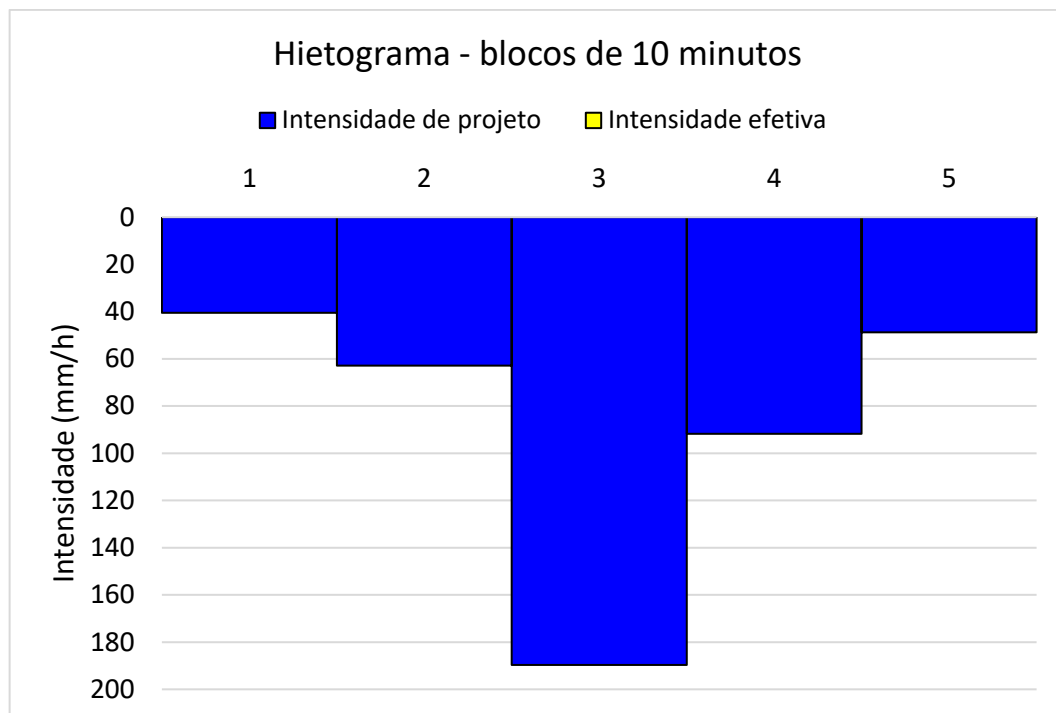


Figura 22: Hietograma de blocos alternados da sub-bacia 1 para o Cenário 1 (AUTORA, 2022).

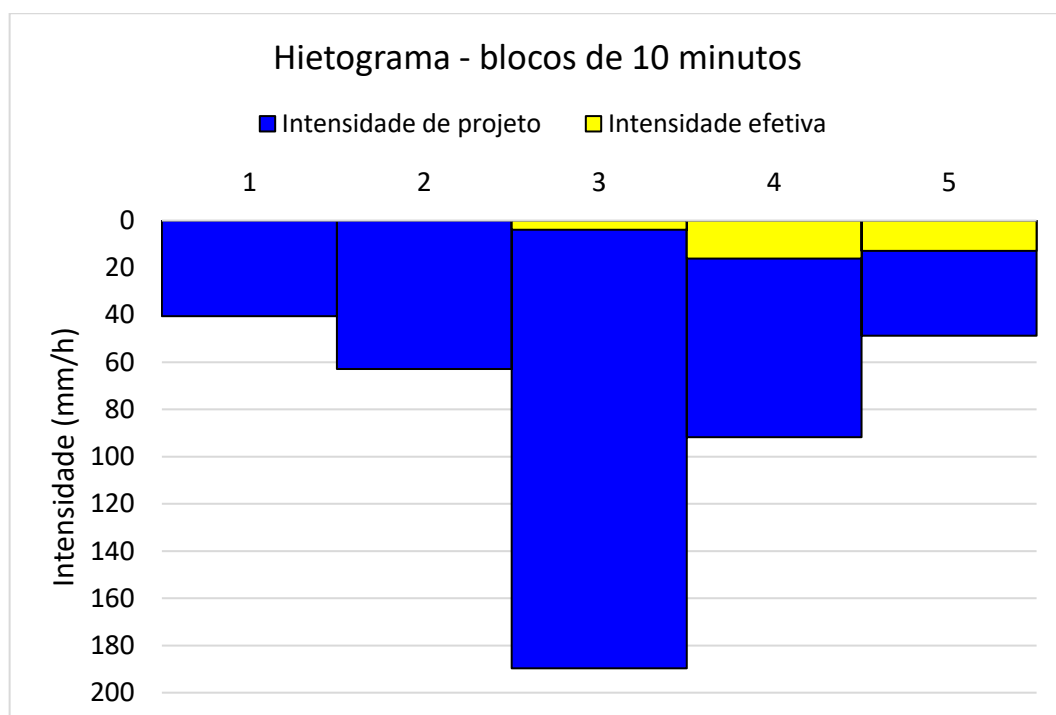


Figura 23: Hietograma de blocos alternados da sub-bacia 1 para o Cenário 2 (AUTORA, 2022).

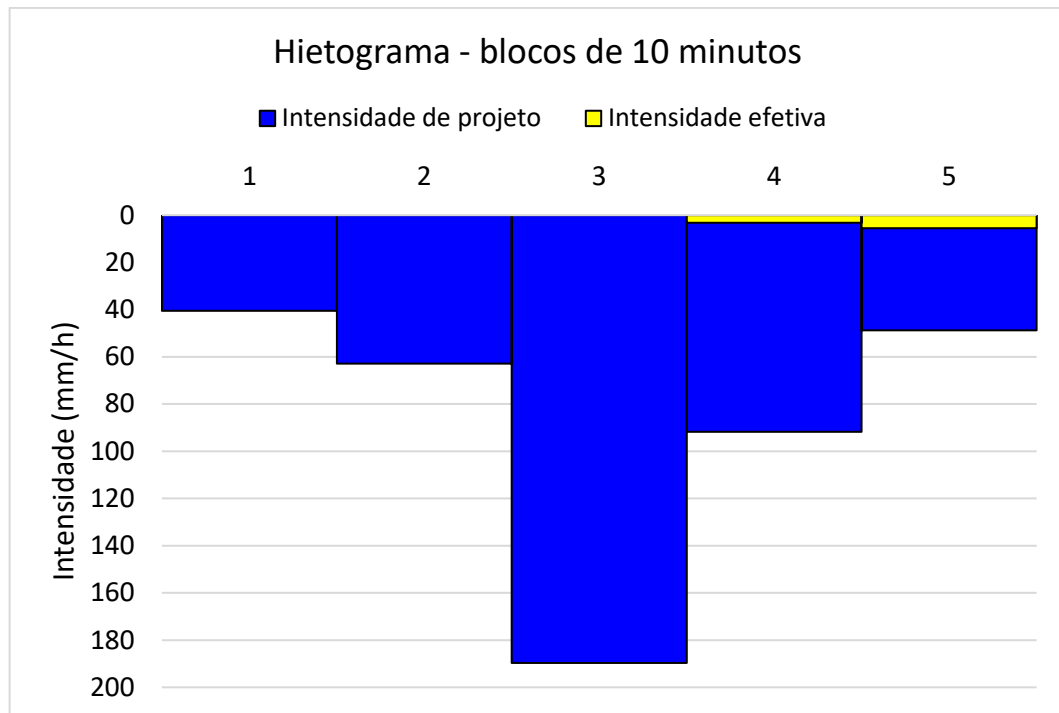


Figura 24: Hietograma de blocos alternados da sub-bacia 1 para o Cenário 3 (AUTORA, 2022).

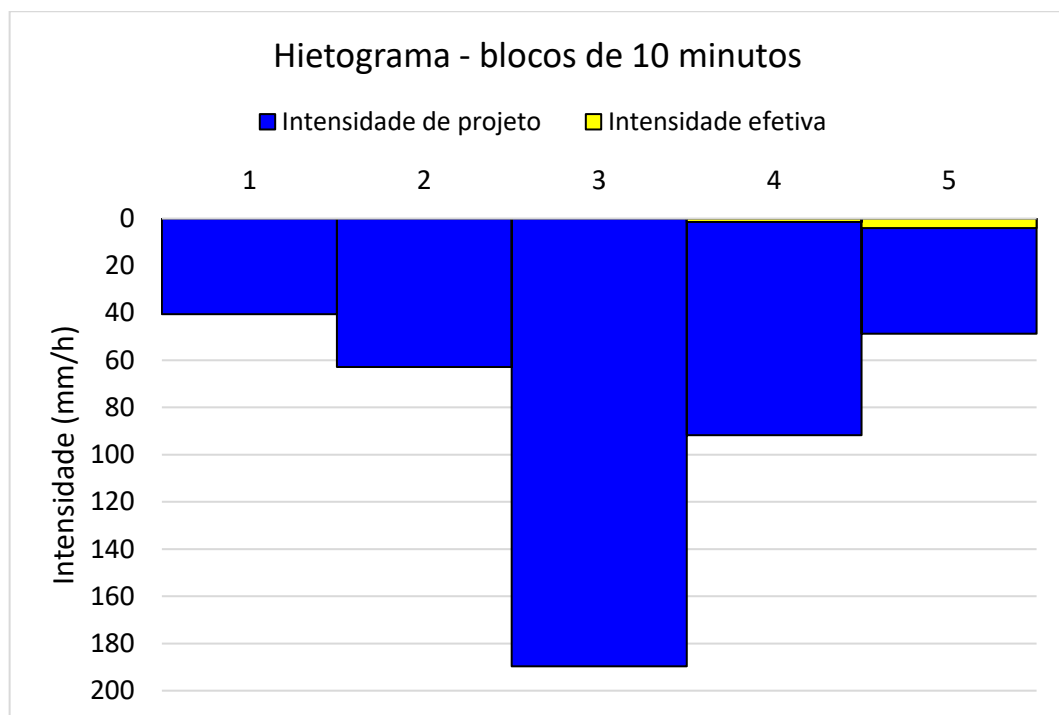


Figura 25: Hietograma de blocos alternados da sub-bacia 1 para o Cenário 4 (AUTORA, 2022).

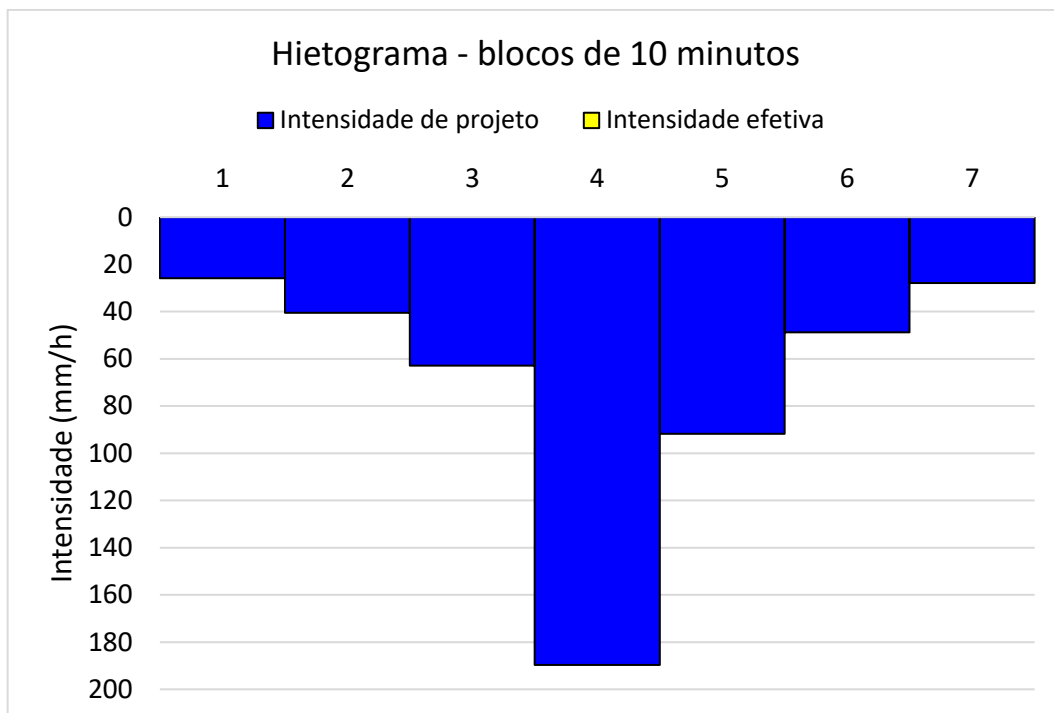


Figura 26: Hietograma de blocos alternados da sub-bacia 2 para o Cenário 1 (AUTORA, 2022).

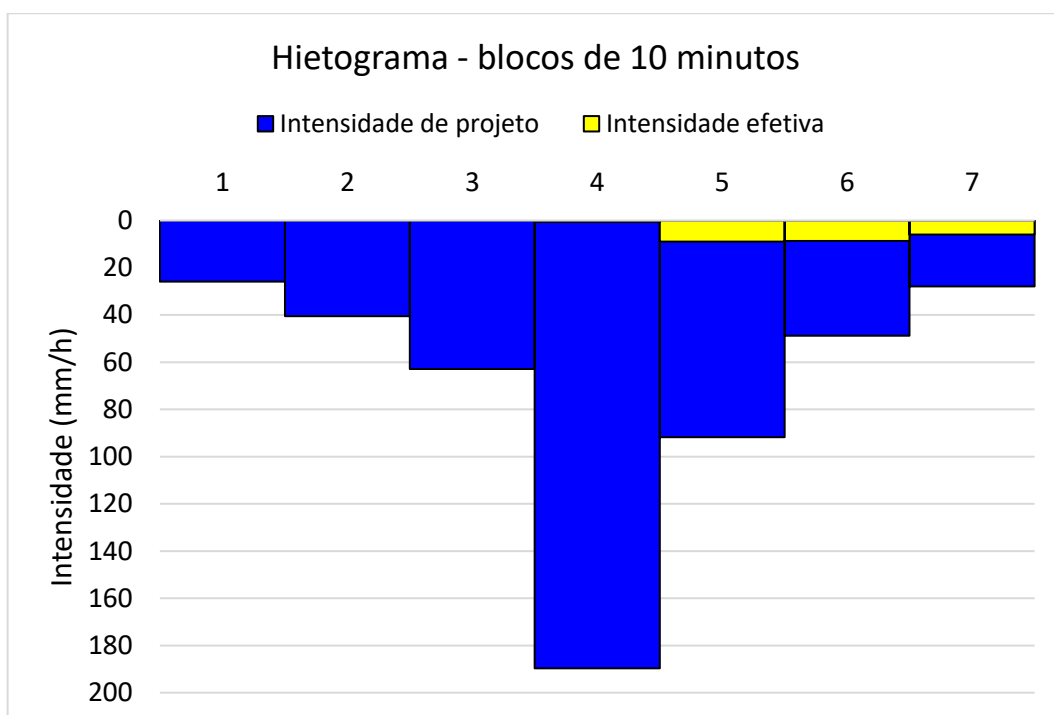


Figura 27: Hietograma de blocos alternados da sub-bacia 2 para o Cenário 2 (AUTORA, 2022).

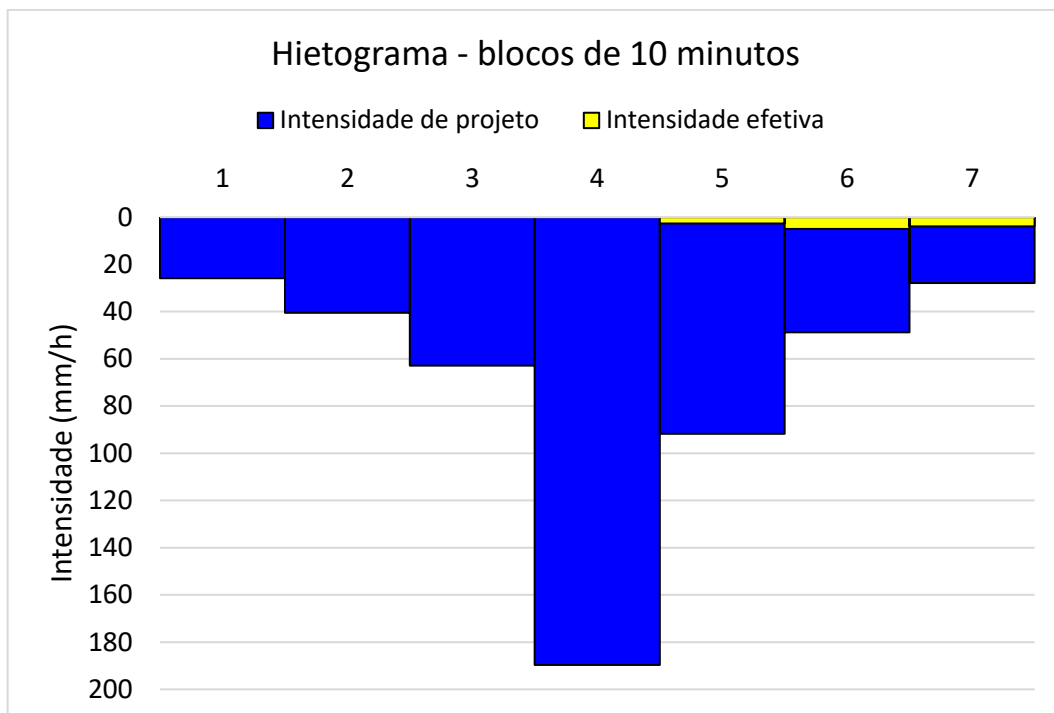


Figura 28: Hietograma de blocos alternados da sub-bacia 2 para o Cenário 3 (AUTORA, 2022).

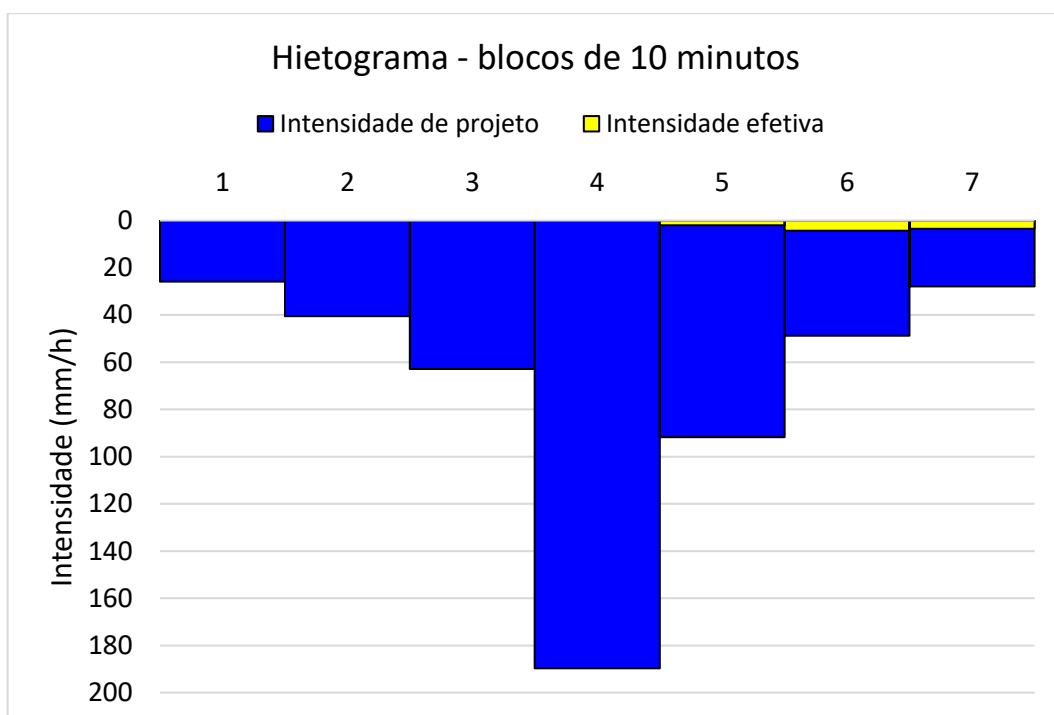


Figura 29: Hietograma de blocos alternados da sub-bacia 2 para o Cenário 4 (AUTORA, 2022).

Ao analisar os gráficos anteriores pode-se perceber que a parcela da intensidade total que é responsável por gerar o escoamento superficial direto, a intensidade efetiva, é insignificante para todos os cenários, inclusive sendo nula para o Cenário 1 de ambas as sub-bacias, que é a configuração intermediária entre uma superfície que gera bastante escoamento superficial direto e outra que absorve muita água. Ou seja, mesmo para o maior CN encontrado para cada sub-bacia, grande parte da chuva de projeto infiltra e/ou compõe as perdas iniciais.

4.6.3 Transformação Chuva-Vazão

Foram feitas quatro modelagens no Excel para cada sub-bacia. Em todas, apenas o valor do CN se alterou, as demais entradas do programa foram mantidas.

Após inserir os parâmetros necessários e utilizar os coeficientes adimensionais para a construção do hidrograma unitário curvilíneo do SCS, o hidrograma unitário encontrado para a sub-bacia 1 foi para a chuva de duração, t_d , de 6,65 minutos, como pode ser observado na Figura 30.

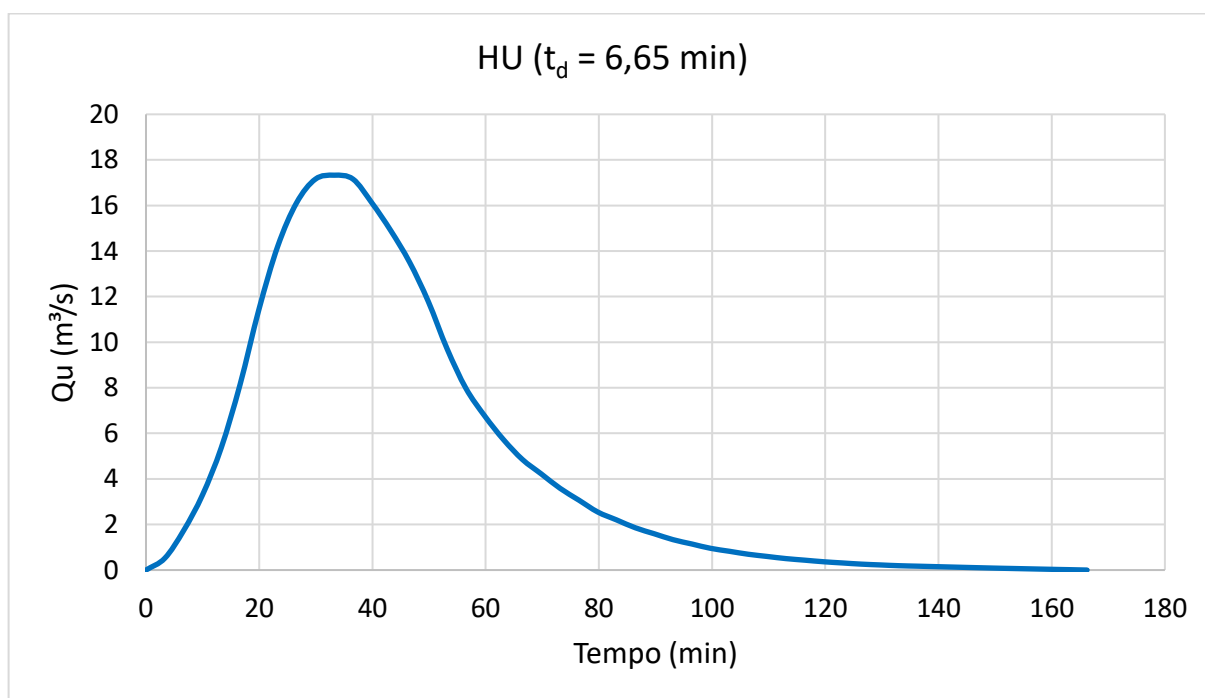


Figura 30: Hidrograma unitário para a sub-bacia 1 com chuva efetiva de 6,65 minutos (AUTORA, 2022).

A fim de obter-se o hidrograma unitário da chuva efetiva de 10 minutos de duração, pois é o intervalo dos blocos do hietograma, converteu-se primeiramente, o HU ($t_d = 6,65 \text{ min}$) mostrado anteriormente, para um HU ($t_d' = 5 \text{ min}$).

Para realizar esse procedimento, utilizou-se da construção da “curva em S”, que é a resposta da sub-bacia a uma precipitação de intensidade constante e duração superior ao seu tempo de concentração. Para obter a “curva em S” deslocou-se o HU ($t_d = 6,65 \text{ min}$) em $t_d = 6,65 \text{ min}$ várias vezes até atingir seu tempo de base, depois somaram-se as ordenadas de mesmo tempo do HU original e de todos os deslocados. Em seguida, defasou-se a “curva em S” em $t_d' = 5 \text{ min}$, construindo o hidrograma $S(t - t_d')$. Subtraindo-se, a cada tempo, as ordenadas de $S(t - t_d')$ das ordenadas de $S(t)$ obteve-se um hidrograma auxiliar e dividindo as ordenadas deste por (t_d'/t_d) obteve-se o HU ($t_d' = 5 \text{ min}$) desejado, como pode ser observado na Figura 31.

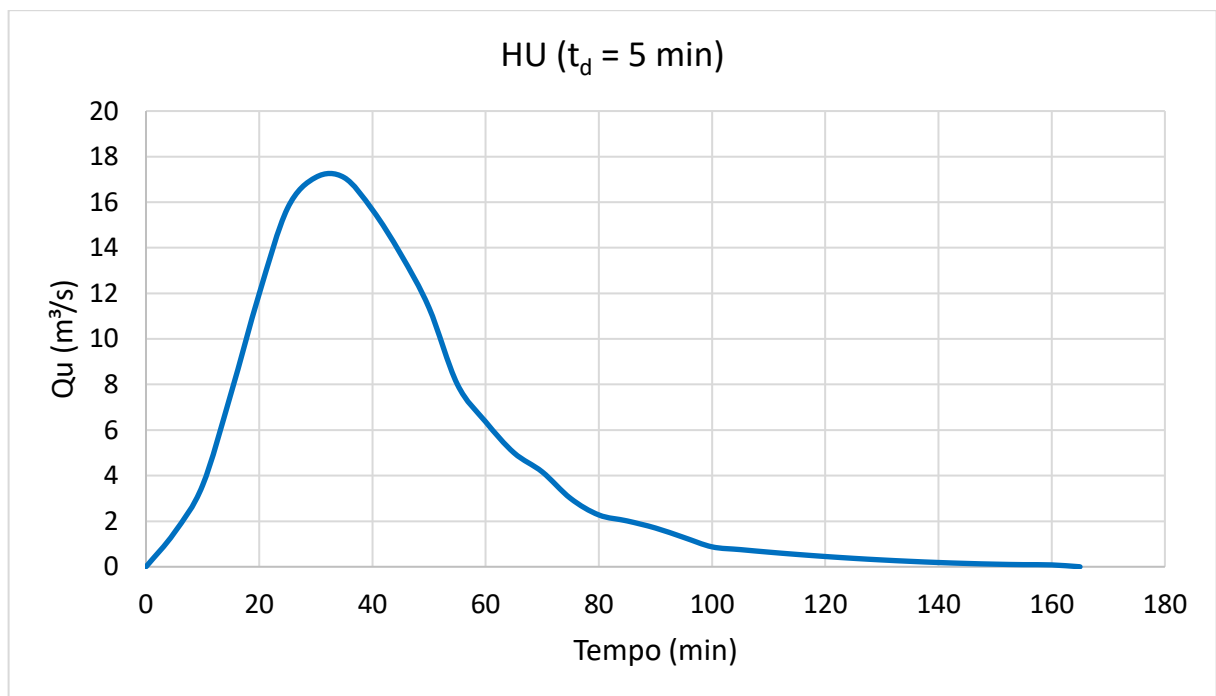


Figura 31: Hidrograma unitário para a sub-bacia 1 com chuva efetiva de 5 minutos (AUTORA, 2022).

Finalmente, para converter o HU ($t_d' = 5 \text{ min}$) em um HU ($t_d'' = 10 \text{ min}$), foi necessário deslocá-lo em $\left[\left(\frac{t_d''}{t_d'}\right) - 1\right]$ vezes e somar as ordenadas dos HUs (original

e deslocados) em cada tempo. Por fim, as novas ordenadas obtidas desse hidrograma auxiliar foram divididas por (t_d''/t_d') para que o “volume unitário” seja mantido. Dessa forma, obteve-se o hidrograma unitário para chuva efetiva de 10 minutos de duração, que pode ser observado na Figura 32.

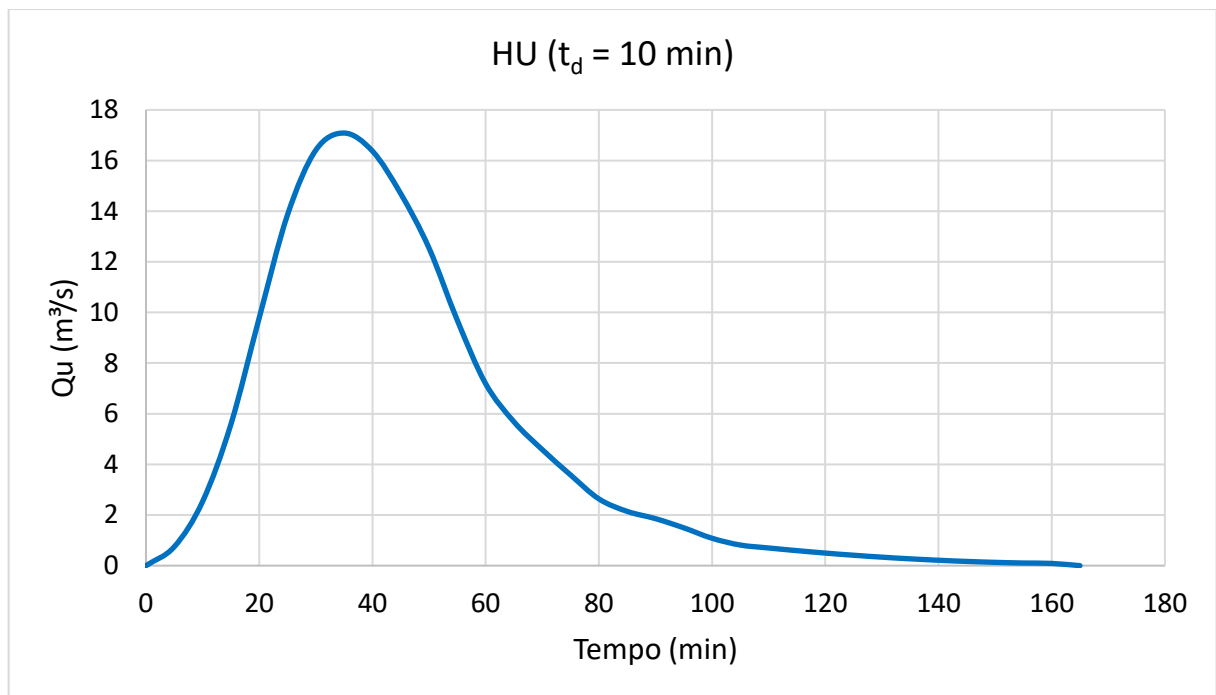


Figura 32: Hidrograma unitário para a sub-bacia 1 com chuva efetiva de 10 minutos (AUTORA, 2022).

Já para a sub-bacia 2 o hidrograma unitário encontrado foi para a chuva de duração, t_d , igual a 9,31 minutos, como pode ser verificado na Figura 33.

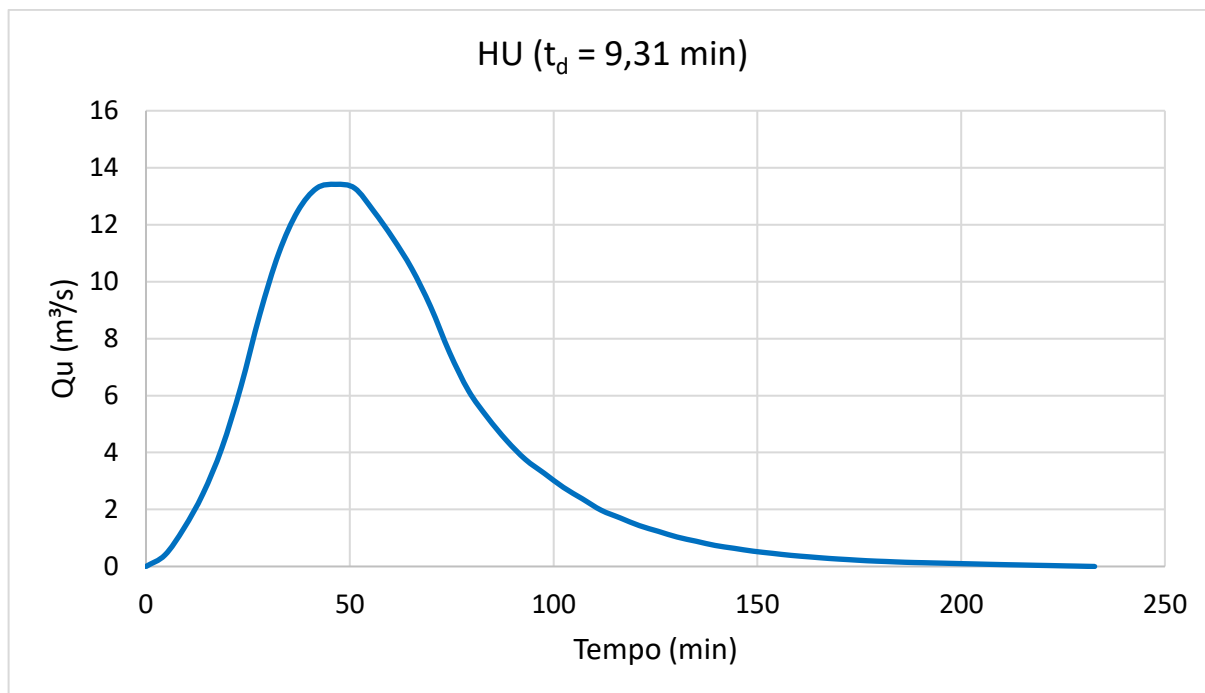


Figura 33: Hidrograma unitário para a sub-bacia 2 com chuva efetiva de 9,31 minutos (AUTORA, 2022).

Não há grande diferença nos hidrogramas unitários se as durações das chuvas unitárias não diferirem muito, sendo admitida como aceitável uma tolerância de até 25% (LINSLEY JR, KOHLER & PAULHUS, 1975). Como a diferença entre 9,31 min e 10 min é menor que 25%, não foi necessário fazer nenhuma conversão de hidrograma, portanto foi utilizado o HU ($t_d = 9,31$ min) para a chuva de 10 minutos de duração.

Conhecidos os hidrogramas unitários das duas sub-bacias para chuva de duração de 10 minutos, obtiveram-se os hidrogramas de cheia mostrados nas Figuras 34 a 41, cujos componentes são:

- nos hietogramas, a região vermelha representa as perdas iniciais e a infiltração, enquanto a região azul equivale à intensidade efetiva. A soma das duas parcelas corresponde à intensidade de projeto e
- a curva localizada na parte debaixo da figura, consiste no hidrograma do escoamento superficial direto, representando o comportamento da vazão ao longo do tempo.

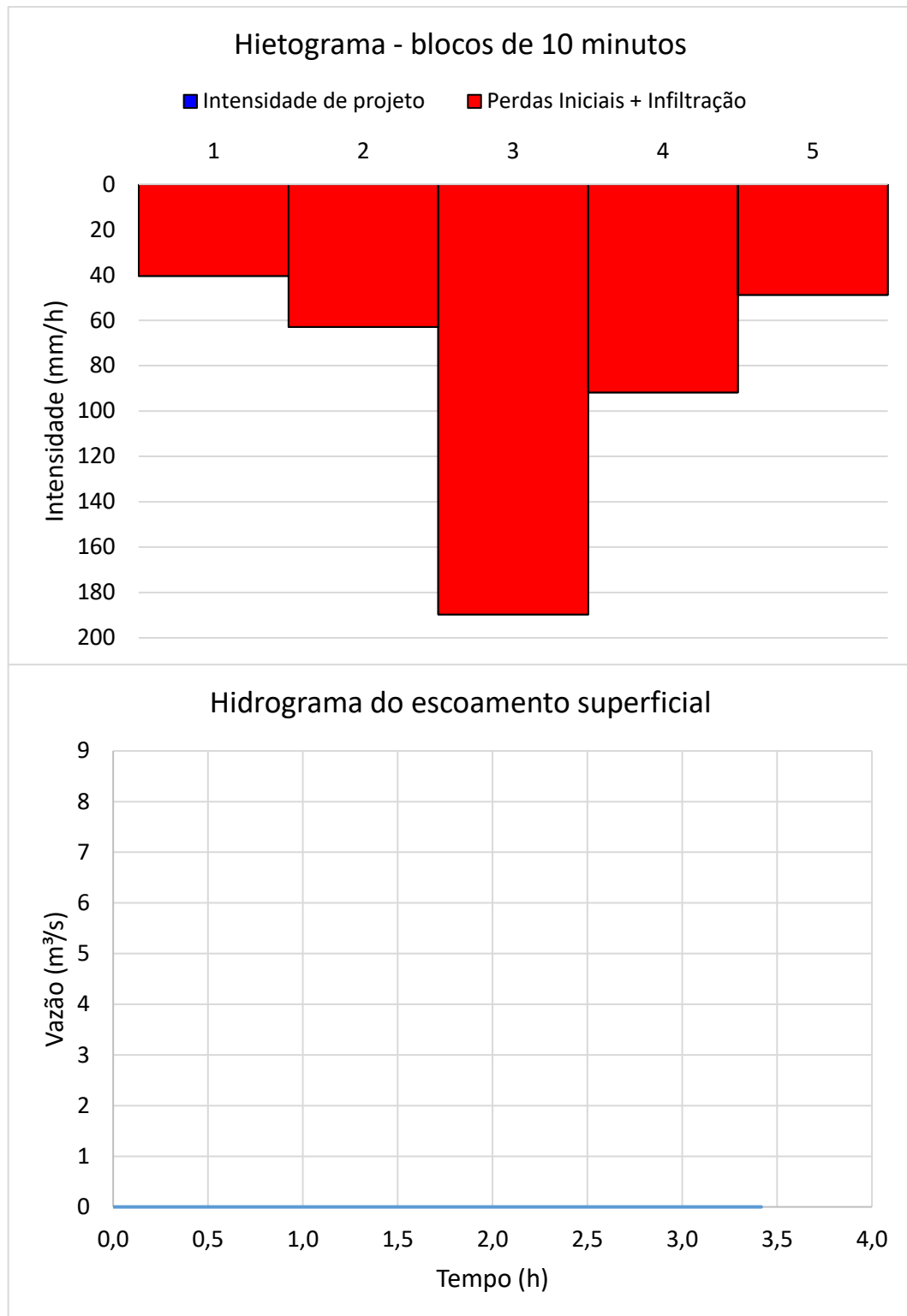


Figura 34: Cenário 1 da sub-bacia 1 (AUTORA, 2022).

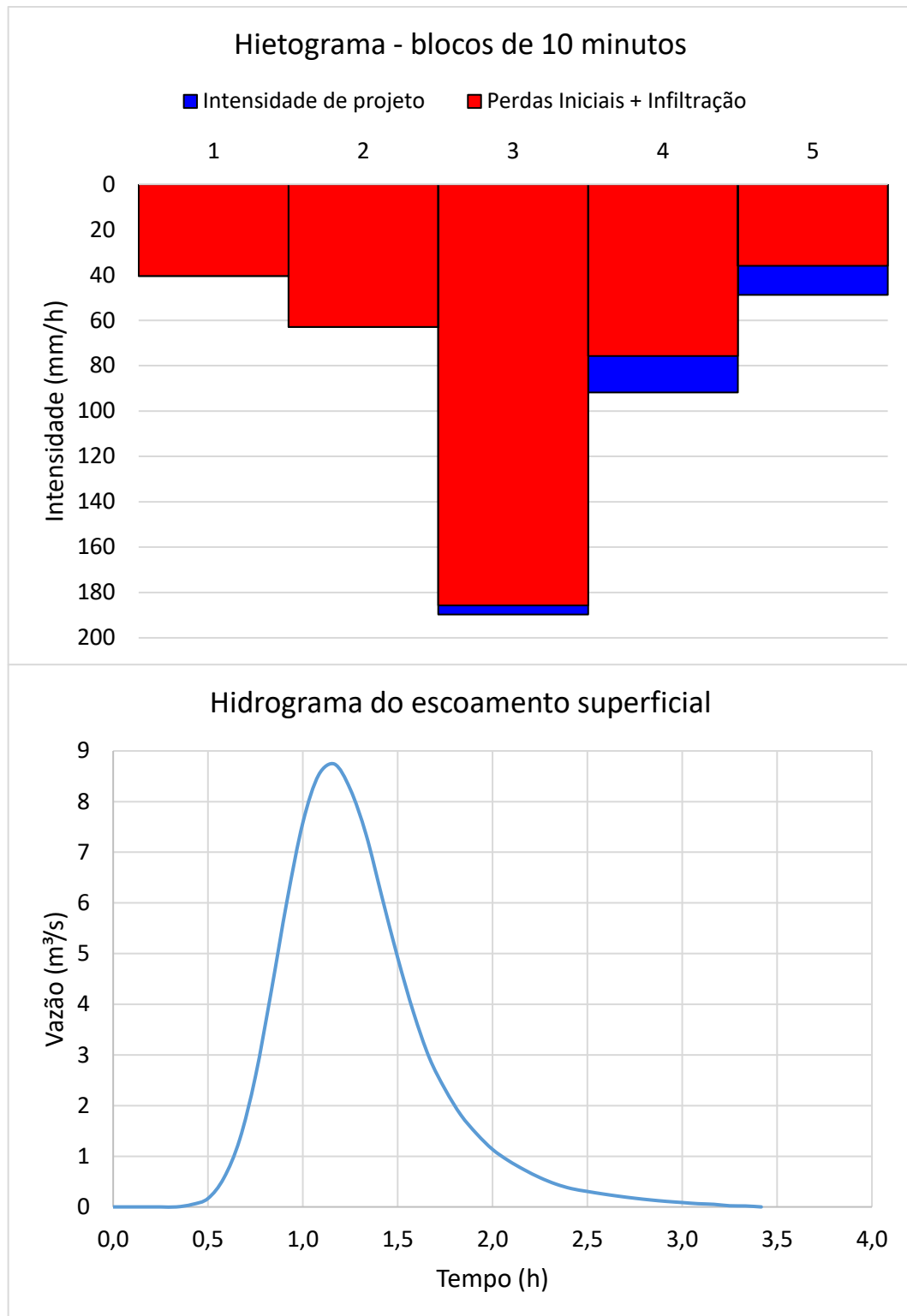


Figura 35: Cenário 2 da sub-bacia 1 (AUTORA, 2022).

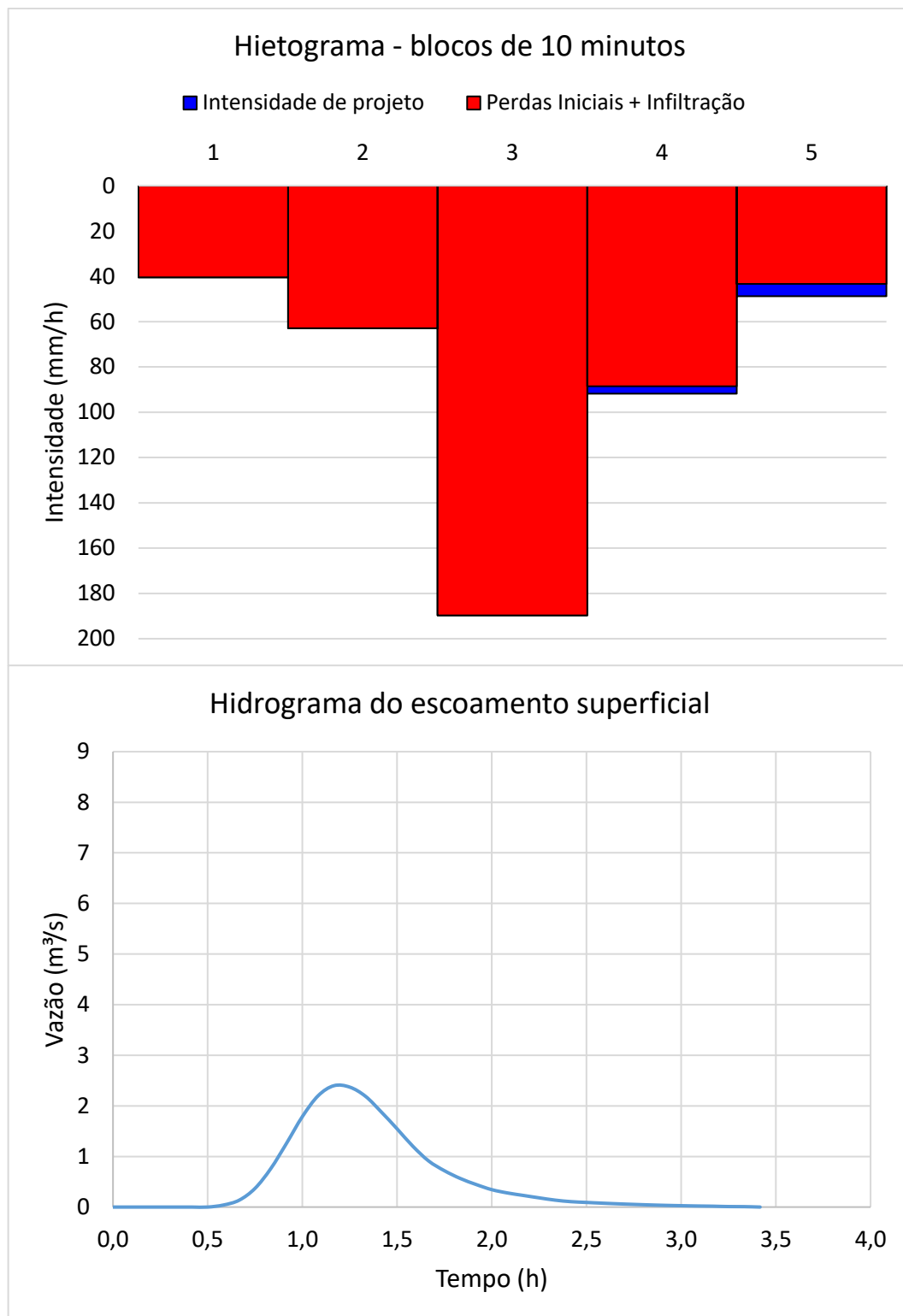


Figura 36: Cenário 3 da sub-bacia 1 (AUTORA, 2022).

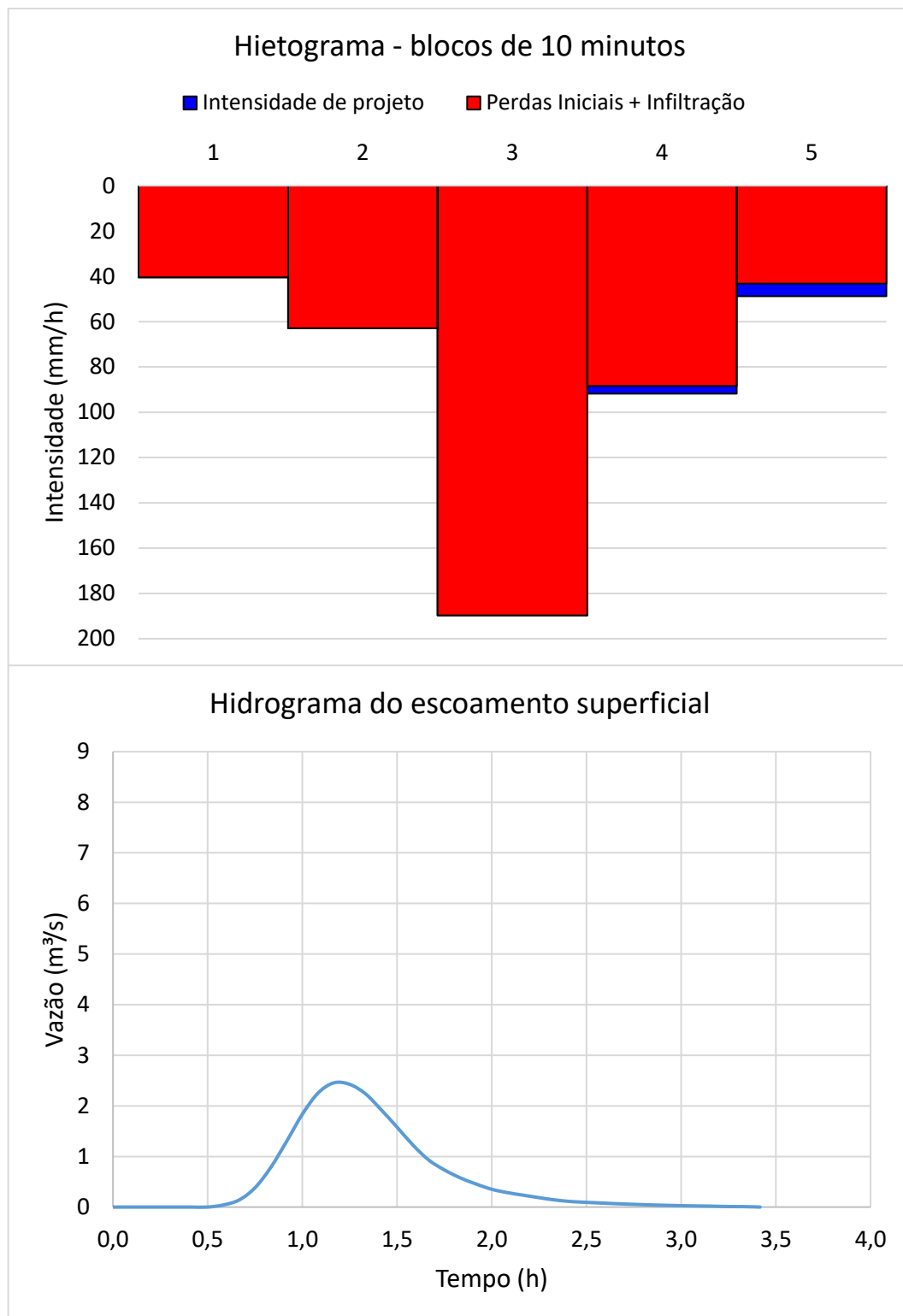


Figura 37: Cenário 4 da sub-bacia 1 (AUTORA, 2022).

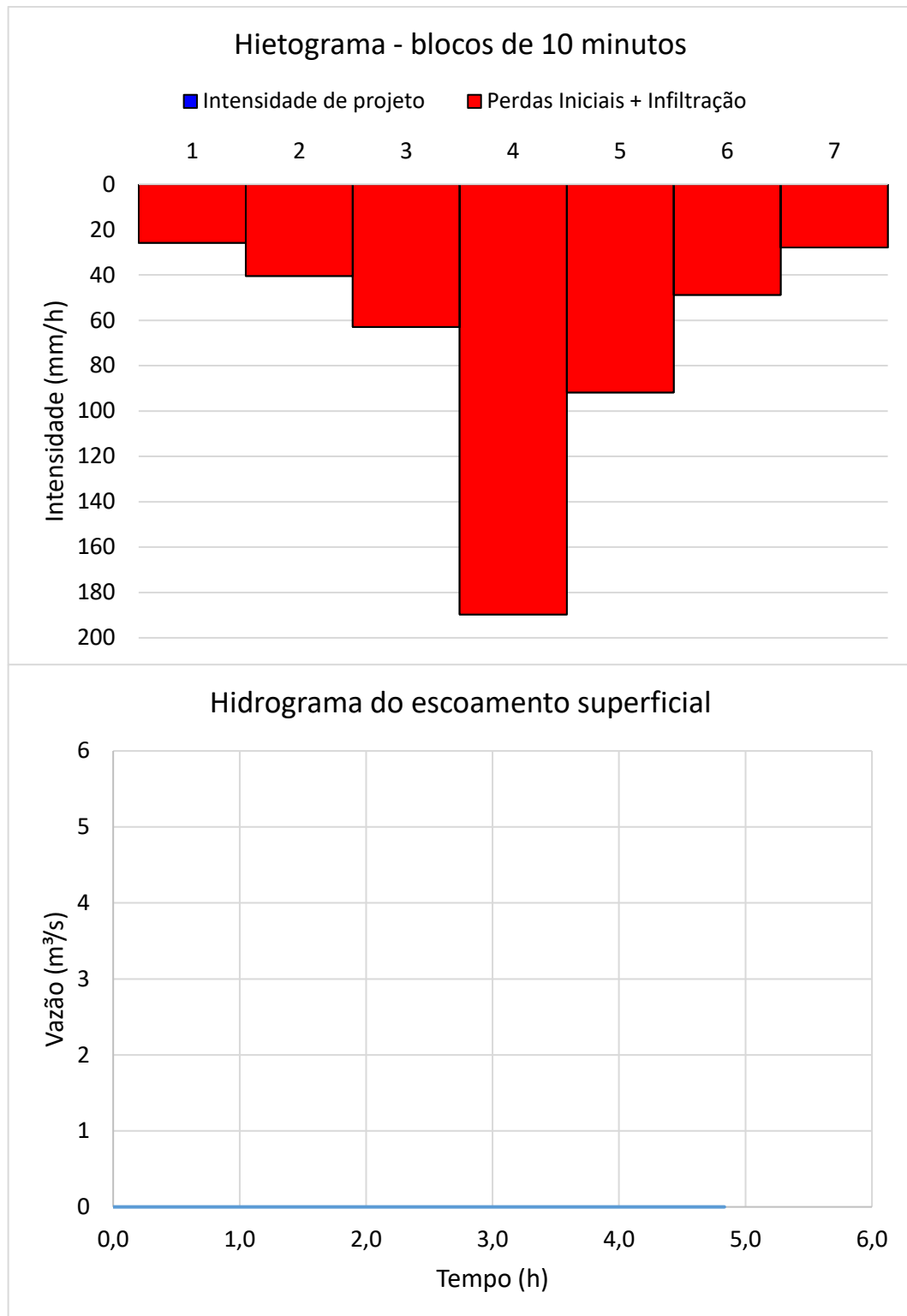


Figura 38: Cenário 1 da sub-bacia 2 (AUTORA, 2022).

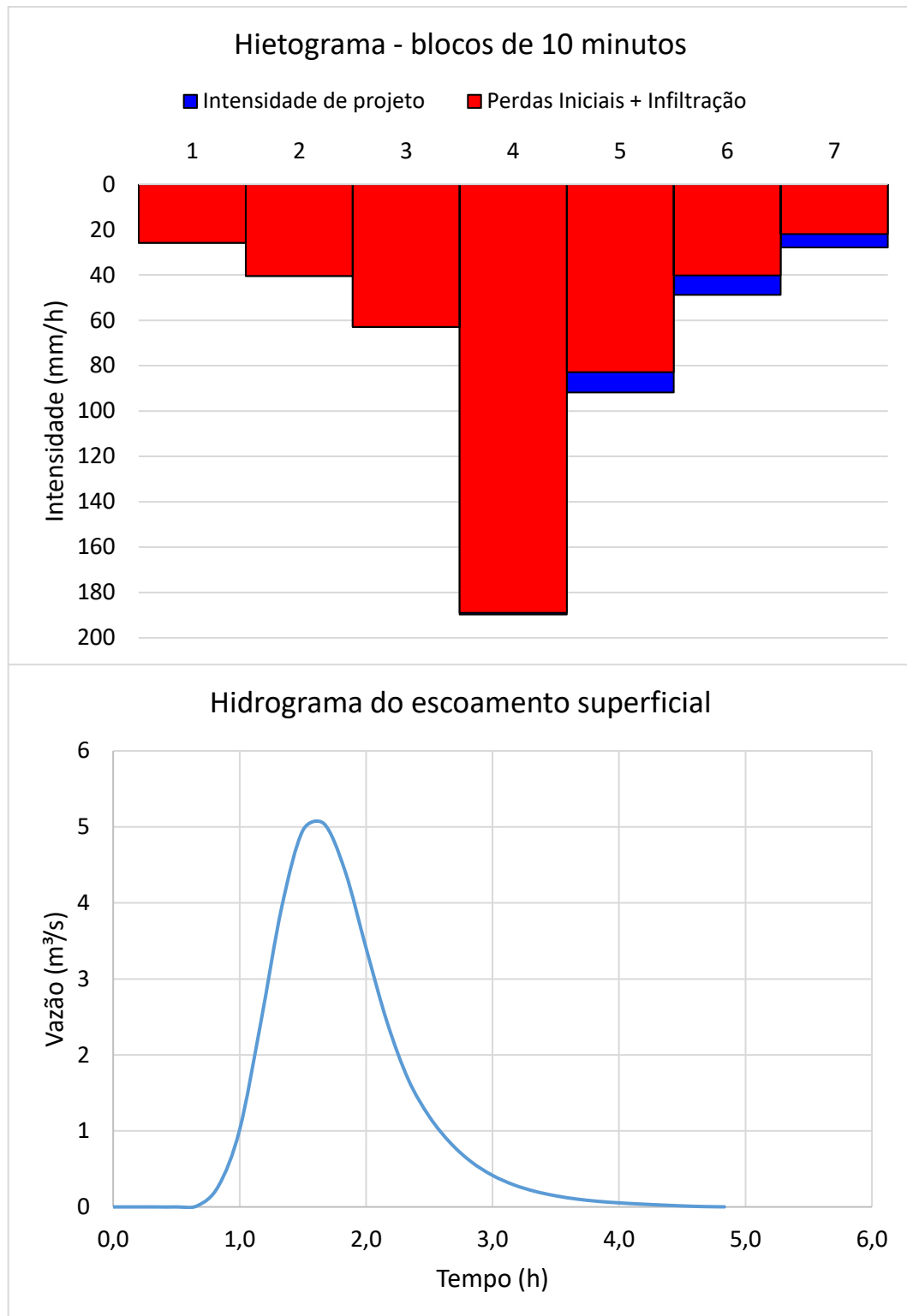


Figura 39: Cenário 2 da sub-bacia 2 (AUTORA, 2022).

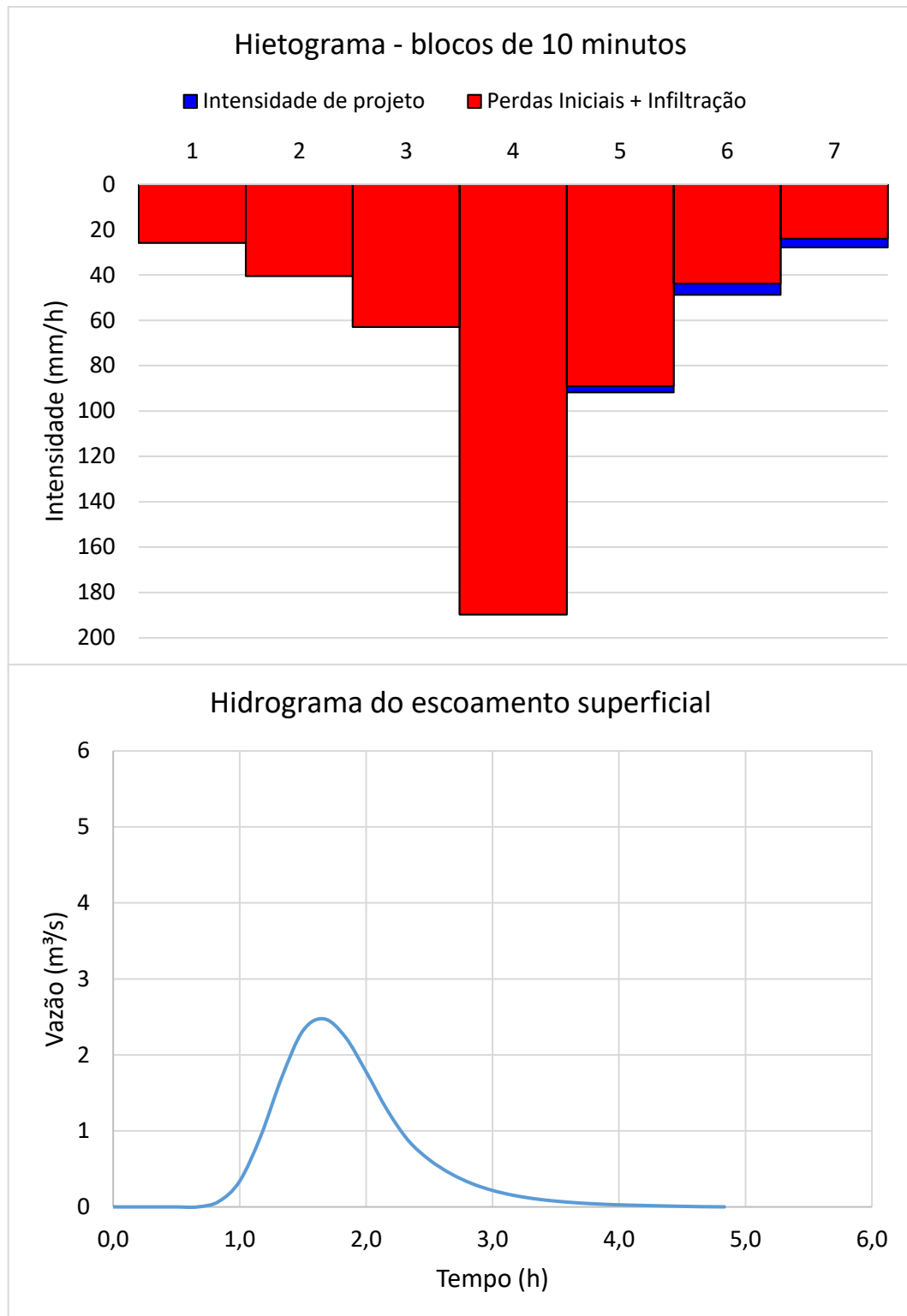


Figura 40: Cenário 3 da sub-bacia 2 (AUTORA, 2022).

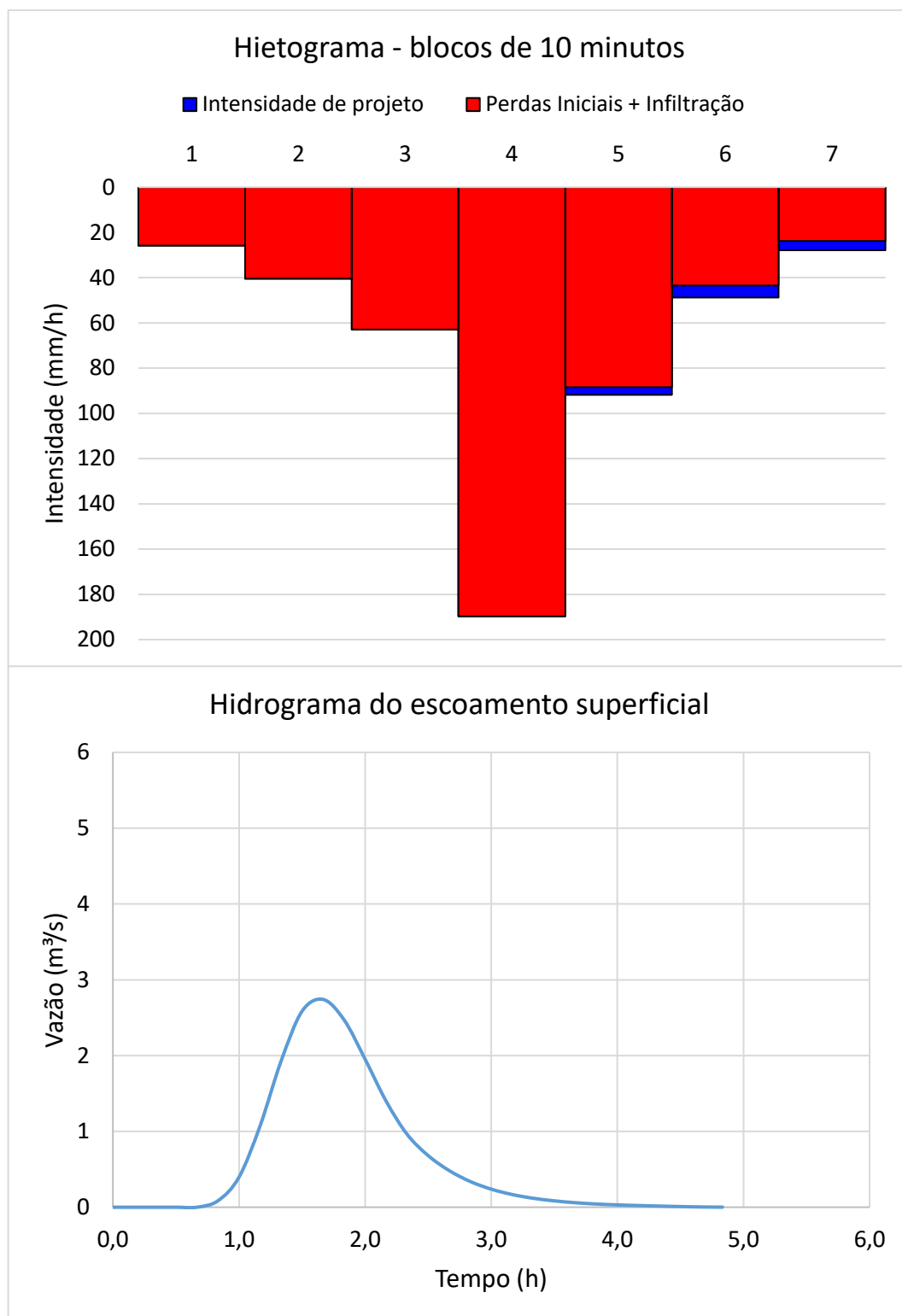


Figura 41: Cenário 4 da sub-bacia 2 (AUTORA, 2022).

Ao realizar a modelagem hidrológica utilizando os valores de CN do Cenário 1 e um tempo de retorno de 100 anos, percebeu-se que não houve escoamento superficial

direto para as duas sub-bacias, pois a precipitação total de cada intervalo foi menor do que 20% do potencial máximo de retenção da camada superficial do solo. As vazões de pico encontradas para cada cenário podem ser visualizadas nas Tabelas 17 e 18.

Tabela 17: Vazões de pico para a sub-bacia 1 (AUTORA, 2022).

SUB-BACIA 1		
Cenário	CN	Vazão máxima (m³/s)
1	38,7	0,00
2	57,6	8,74
3	49,4	2,40
4	49,5	2,46

Tabela 18: Vazões de pico para a sub-bacia 2 (AUTORA, 2022).

SUB-BACIA 2		
Cenário	CN	Vazão máxima (m³/s)
1	30,5	0,00
2	51,4	5,04
3	47,2	2,47
4	47,7	2,74

Analisando as tabelas apresentadas, pode-se confirmar que, quanto maior o valor do CN, maior será a vazão máxima. Há de se salientar que a determinação do CN não é objetiva, o que leva a diversas interpretações possíveis para enquadrar a região em estudo com base nos mapas pedológico e de uso e ocupação do solo.

O Cenário 2 apresentou um valor de vazão máxima, aproximadamente, quatro e duas vezes maior do que a dos Cenário 3 e 4, para as sub-bacias 1 e 2 respectivamente; essa grande diferença se deu pelo fato de que no Cenário 2 as

florestas foram classificadas como muito esparsas, o que levou a um alto valor de CN. Neste trabalho percebeu-se que apesar das tradicionais tabelas do CN apresentarem muitos usos e ocupação do solo, ainda é difícil enquadrar as classes determinadas pela EMBRAPA em uma das classificações, e uma pequena diferença no CN médio ponderado adotado para representar a bacia hidrográfica impacta em grandes diferenças na vazão final, o que pode levar ao sub ou superdimensionamento de estruturas de drenagem. Sobre essa pequena diferença, notou-se que, para a sub-bacia 1, uma variação de 0,1 no CN do Cenário 3 para o 4 acarretou um aumento de cerca de 2,5% na vazão de pico, enquanto no caso da sub-bacia 2, um aumento de 0,5 entre os mesmos cenários fez com que a vazão de pico aumentasse aproximadamente 10,9%, demonstrando que pequenas imprecisões na determinação do CN podem ser bastante significativas no resultado do hidrograma de cheia.

Ressalta-se o Cenário 1 que devido a um baixo valor de CN, apresentou valor nulo para o escoamento superficial direto, ou seja, ao enquadrar a condição dos usos e ocupações em faixas intermediárias, devido à pequena precisão da base de dados utilizada, florestas normais e pastagens normais, obteve-se um CN que indica que para a IDF encontrada e o tempo de retorno de 100 anos, toda chuva é retida nas depressões do terreno ou evapotranspirada. Portanto, ficou evidente o fato da resolução dos mapas precisar ser aprimorada, além da necessidade de se fazer uma visita de campo para ratificar em qual condição é melhor enquadrar as florestas e as pastagens.

É possível verificar ainda que, apesar da diferença do uso e cobertura do solo entre as duas sub-bacias, sendo uma com predominância de florestas e outra com predominância de pastagens, as vazões de pico apresentaram valores relativamente baixos para ambas, o que indica que há pouco escoamento superficial direto gerado por estas duas sub-bacias estudadas, sendo assim, infere-se que outras sub-bacias mais a montante é que contribuem mais para as enchentes na parte urbana do distrito de Cachoeira do Brumado. Como as duas sub-bacias estudadas não são urbanizadas, poderia-se estudar medidas de contenção de cheias em ambas, como reservatórios de detenção ou retenção, uma vez que há espaço para a construção dessas estruturas, de modo a diminuir o volume do escoamento superficial direto que chega na calha do ribeirão na parte urbanizada do distrito.

5 CONCLUSÕES

A partir do presente trabalho, buscou-se determinar o comportamento hidrológico de duas sub-bacias pertencentes à bacia do ribeirão Cachoeira do Brumado para verificar a influência do uso e cobertura do solo na ocorrência de inundações no distrito estudado e principalmente comparar a influência das imprecisões na determinação do CN para o hidrograma do escoamento superficial direto.

Ao caracterizar as sub-bacias quanto ao uso e ocupação do solo, determinaram-se quatro cenários diferentes para realizar a modelagem hidrológica e comparar o impacto do CN no aumento do escoamento superficial direto. Através dessa caracterização, percebeu-se que o método de determinação do CN não é totalmente objetivo e preciso, visto que as tabelas disponíveis não apresentam números limites (como por exemplo, quanto árvores em média por metro quadrado deve-se considerar para enquadrar uma floresta como densa, normal, esparsa ou muito esparsa) para se determinar em qual condição de uso e ocupação a superfície se enquadra.

Ainda na caracterização do uso e ocupação do solo, constatou-se que a sub-bacia com predominância de pastagens com manejo apresentou menor escoamento superficial direto, se comparada com a outra sub-bacia que apresenta maior porcentagem de florestas. Esse fato ocorre já que as pastagens com manejo em boas condições podem levar à redução do escoamento superficial direto e contribuir para que não ocorram as inundações, pois elas têm como objetivo aumentar a infiltração.

O *software* escolhido para a modelagem hidrológica da região obteve bons resultados para o objetivo deste trabalho, destacando-se ainda que se trata de um recurso de fácil acesso e que não requer computadores com super-processamento.

Enfim, entende-se que este trabalho cumpriu com seu objetivo de forma satisfatória, visto que foi possível simular eventos que podem desencadear inundações no distrito de Cachoeira do Brumado. Porém, a modelagem hidrológica resultou em valores para as vazões de pico não muito altas, o que se subentende que as sub-bacias escolhidas não apresentam grandes contribuições para a ocorrência de inundações no distrito. Apesar disso, sabe-se que estes eventos acontecem de forma recorrente em Cachoeira do Brumado e é essencial que as autoridades tomem medidas preventivas para amenizar os impactos causados por eles, como a

preservação de boas pastagens com manejo; a construção de uma bacia de retenção ou detenção, visando amenizar a vazão que chega à parte urbanizada do distrito e a implantação de sistemas de previsão de alertas em caso de inundações inevitáveis, dentre outras ações.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Este trabalho objetivou o estudo hidrológico de duas sub-bacias da bacia do ribeirão Cachoeira do Brumado para analisar a influência do uso e ocupação do solo na ocorrência de inundações e como o detalhamento das condições da superfície é importante para que se determine CNs mais precisos.

Desse modo, para determinação das condições mais específicas da superfície das sub-bacias, sugerem-se visitas a campo para classificação mais realista delas, como por exemplo, *in loco*, pode-se verificar se as pastagens locais realmente têm manejo ou não, pois isso afeta consideravelmente o valor do CN; pastagens com manejo têm CNs muito baixos ao passo que se elas forem mal cuidadas o CN vai ficando tão mais alto quanto maior for esse descuido.

Outra proposição é fazer todas as combinações possíveis de cenários com as florestas e as pastagens nas condições de superfície existentes nas tabelas do CN.

Além disso, como as sub-bacias estudadas não apresentaram grande contribuição para ocorrência de inundações no distrito, apresentando vazões de pico não muito altas, outra sugestão é realizar o estudo hidrológico de outras sub-bacias que constituem a bacia do ribeirão Cachoeira do Brumado. De forma complementar, em trabalhos futuros, propõe-se a modelagem hidráulica das áreas estudadas neste trabalho bem como dessas outras sub-bacias, para que se identifiquem os locais de possíveis inundações na região.

REFERÊNCIAS

- ACQUALIS. (2022). **Você sabe a diferença entre Enchente, Inundação, Enxurrada e Alagamento.** Disponível em: Acqualis Engenharia Hídrica: <https://acqualisengenharia.com.br/voce-sabe-a-diferenca-entre-enchente-inundacao-enxurrada-e-alagamento>. Acesso em 15 de 06 de 2022.
- AGÊNCIA IBGE NOTÍCIAS. (2018). **Em 2010, Brasil tinha 8,3 milhões de pessoas morando em áreas com risco de desastres naturais.** Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/21565-em-2010-brasil-tinha-8-3-milhoes-de-pessoas-morando-em-areas-com-risco-de-desastres-naturais>. Acesso em 29 de 05 de 2022.
- ANA. (2022). **Domínio de Cursos d'água da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e da Região Hidrográfica do Rio Barra Seca.** Disponível em: Agência Nacional de Águas: <https://arquivos.ana.gov.br/institucional/sag/CobrancaUso/BaciaDoce/MapaRioDoce.pdf>. Acesso em 25 de 07 de 2022.
- BAPTISTA, M.; CARDOSO, A. (2013). Rios e cidades: uma longa e sinuosa história... **Revista UFMG**, Belo Horizonte, v. 20, n. 2, p. 124-153, jul./dez. 2013.
- BARBOSA JR., A. R. (2022). **Elementos de Hidrologia Aplicada.** Editora Blucher, 430 p.
- BELLINASSO, T. B.; SCHNEIDER, V. E. (2017). Avaliação do método da Curve Number (CN-SCS) e obtenção do volume total do escoamento superficial. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis - SC.
- BERGAMIN, D. P. (2017). **Tratabilidade da água do Rio Gualaxo do Sul em Mariana - MG - parâmetros otimizados para projetos de unidades para coagulação e floculação.** 60 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- CANHOLI, A. P. (2005). **Drenagem urbana e controle de enchentes.** São Paulo: Oficina de Textos.

- CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. (1983). **Diagnóstico Ambiental do Estado de Minas Gerais**. Série de Publicações Técnicas/SPT-010. 158p. (Vol. 1). Belo Horizonte.
- CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. (1980). **Drenagem Urbana: manual de projeto**. São Paulo. 476p.
- CHOW, V. T. (1964). Hydrology and its development. *In*: CHOW, V. T. (editor-in-chief). **Handbook of Applied Hydrology: A Compendium of Water-resources Technology**. 1st Edition. USA: McGraw-Hill Inc., Volume 1, chapter 1, pages 1-1 to 1-17.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. (1988) **Applied Hydrology**. International Edition, McGraw-Hill Book Company, New York.
- COBRADE. (2022). **Classificação e Codificação Brasileira de Desastres**. Disponível em: Defesa Civil do Rio de Janeiro: <http://www.defesacivil.rj.gov.br/images/formularios/COBRADE.pdf>. Acesso em 02 de 06 de 2022.
- COELHO, A. L. N. (2007). **Alterações Hidrogeomorfológicas no Médio-Baixo Rio Doce/ES**. 227f. Tese de Doutorado. Universidade Federal Fluminense, Instituto de Geociências, Departamento de Geografia. Niterói.
- COLLINS, S. H. (1978). Algorithms for Dense Digital Terrain Models. Ontario, Canada, pp. 307-317.
- COLLISCHONN, W.; TASSI, R. (2010). Introduzindo Hidrologia - IPH UFRGS. Versão 7. Rio Grande do Sul.
- COSTA, K. T. (2014). **Avaliação de Distribuições de Probabilidades das Vazões Médias Diárias Máximas Anuais do Brasil**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte. 194f.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil (1993). **Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Mariana – Folha SF.23-XB-1**. Estado de Minas Gerais. Escala 1:100.000. Org. por Orivaldo Ferreira Baltazar e Frederico Ozanam Raposo. Brasília, DNPM/CPRM. 196p.

- CUNHA, J. C. (2001). **O Uso do Modelo Digital de Elevação como Alternativa para Correção dos Efeitos da Iluminação Diferenciada em Imagens de Satélite.** Monografia de Especialização em Geoprocessamento, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 45p.
- DEFESA CIVIL DE MARIANA. (2022). **Comunicação pessoal com a Defesa Civil de Mariana – MG.**
- FEAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. (2010). **Mapa de Solos de Minas Gerais: Legenda Expandida.** UFV/CETEC/UFLA/FEAM. Belo Horizonte - MG: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 49p.
- FERNANDES, A. Z. (2022). **Ciclo da Água.** Disponível em: <https://www.significados.com.br/ciclo-da-agua/>. Acesso em 25 de 07 de 2022.
- GANDINI, M. L. T. (2016). **Análise Estatística dos Efeitos das Mudanças Climáticas em uma Bacia Hidrográfica.** Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, p. 159.
- HIDROWEB. (2022). **Séries históricas.** Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em 29 de 05 de 2022.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2010). **Censo Demográfico.**
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2020). **Monitoramento da cobertura e uso da terra do Brasil 2016 - 2018.** Rio de Janeiro. 26p. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101703.pdf>. Acesso em 25 de 07 de 2022.
- KIBLER, D. F. (1982). Desktop Methods for Urban Stormwater Calculation, *In*: KIBLER, D. F. (ed.), **Urban Stormwater Hydrology.** American Geophysical Union, Washington DC, USA, pp 87-135.
- LIMA, A. P. (2012). **Análise de Impactos Associados à Precipitação na Cidade de São Carlos-SP.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geografia. Presidente Prudente: FCT/UNESP.

- LINSLEY JR., R. K.; KOHLER, M. A.; PAULHUS, J. L. H. (1975). **Hydrology for Engineers**. 2nd Edition, McGraw Hill, KogaKusha, Tokyo.
- MARTINS, D.; KRUK, N. S.; MAGNI, N. L. G.; QUEIROZ, P. I. B. Comparação de duas metodologias de obtenção da equação de chuvas intensas para a cidade de Caraguatatuba (SP). **Revista DAE**, n.207, p.34-49. 2017.
- MENDONÇA, F. A. (2004). **Impactos Socioambientais Urbanos**. Curitiba-PR: Ed. UFPR.
- OCCHIPINTI, A. G.; SANTOS, P. M. (1966). **Relações entre as precipitações máximas de “um dia” e de “24 horas” na cidade de São Paulo**. São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, USP. 26p.
- OLIVEIRA, T. J. J.; ESTEVAM, T. da S.; RIBEIRO, L. de A.; MILAGRES, N. L.; DUARTE, J. P.; FARIA, A. de O.; SILVÉRIO, R. N.; PIMENTA, J. T.; BATISTA NETO, J.; SANTIAGO, A. da F. (2018). PROJETO SÉPTICA – Experiências em extensão para o saneamento rural na bacia hidrográfica da cachoeira do Brumado (Mariana – MG). **Além dos Muros da Universidade**, volume 3, número 3. Disponível em: <https://periodicos.ufop.br/alemur/article/view/1367>. Acesso em 29 de 05 de 2022.
- PONCE, V. M.; HAWKINS, R. H. (1996). Runoff curve number: Has it reached maturity?. **J. Hydrolog. Engrg.**, A.S.C.E., Vol. 1, No.1, pp. 11-19.
- PORTELA, M. M.; MARQUES, P.; CARVALHO, F. F. de (2000). **Hietogramas de Projecto para a Análise de Cheias Baseada no Modelo do Hidrograma Unitário do Soil Conservation Service (SCS)**. 5º Congresso da Água, Lisboa.
- PREFEITURA DE MARIANA. (2022). **Localização**. Disponível em: <https://www.mariana.mg.gov.br/localizacao#:~:text=O%20munic%C3%ADpio%20de%20Mariana%20situa,Piranga%2C%20Catas%20Altas%20e%20Alvin%C3%B3polis>. Acesso em 28 de 07 de 2022.
- RIGHETTO, A. M. (1998). **Hidrologia e Recursos Hídricos**. São Carlos: EESC/USP, São Paulo, Brasil.
- SANTOS, S., MONTEIRO, A., MOURATOS, S.; FERNANDEZ, P. (2006). Os sistemas de informação geográfica na modelagem hidrológica. *In*: Congresso Nacional

- de Tecnologias de la Información Geográfica, 12., Granada, Espanha. **Anais...** Granada. p. 465-479.
- SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. (2005). 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. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Campinas, v. 10, n. 4, p. 05-18, Outubro/Dezembro 2005.
- SIEBRA, G. (2020). **Método Soil Conservation Service – SCS**. Disponível em: <https://gustavosiebra.github.io/metodo-scs/>. Acesso em 19 de 08 de 2022.
- SILVEIRA, A. L. L. (2005). Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 5-23, Janeiro/Março.
- SOUSA, F. R. C.; COSTA, L. H. M.; PAULA, D. P. (2017). Modelagem Hidrológica Chuva-Vazão Aplicada ao Estudo de Chuvas Intensas na Bacia Hidrográfica Semiárida do Rio Pesqueiro (Ceará - Brasil), Campinas: I Congresso Nacional de Geografia Física, **Anais...** p. 4798-4809, Junho.
- SOUZA, L. A. (2004). **Diagnóstico do meio físico como contribuição ao ordenamento territorial do município de Mariana (MG)**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas. 165p.
- SPRING - DPI/INPE. (2006). **Introdução ao Geoprocessamento**. Spring > Português > Manuais > Tutorial de Geoprocessamento. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_geo.html. Acesso em 06 de 06 de 2022.
- TOMINAGA, L. K. (2009). Desastres Naturais: Por que ocorrem?. In: TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. do (Organizadores). **Desastres Naturais: conhecer para prevenir**. 1ª edição. São Paulo: Instituto Geológico.
- TUCCI, C. E. M. (Organizador) (1993). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. (1ª ed.). EDUSP, Editora da UFRGS. ABRH. 952p.
- TUCCI, C. E. M. (1998). **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre - RS: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

- TUCCI, C. E. M. (Organizador) (2001). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. (2ª ed.). Porto Alegre - RS: Universidade / UFRGS. Coleção ABRH de recursos hídricos, v. 4. 943p.
- TUCCI, C. E. M. (Organizador) (2004). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. (3ª ed.). Porto Alegre - RS: UFRGS. Coleção ABRH de recursos hídricos, v. 4. 943p.
- TUCCI, C. E. M. (2005). **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre - RS: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- VISSMAN JUNIOR, W.; HARBAUGH, T. E.; KNAPP, J. W. (1972). **Introduction to hydrology**. New York: Intext Educational. 432 p.
- VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; ACERBI JR, F. W.; SILVA, A. M. (2009). Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 581-590, Campina Grande.