

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS**

**NATÁLIA APARECIDA LOPES**

**EFEITO DA DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO  
CÓRREGO VARGENS DE CALDAS - POÇOS DE CALDAS/MG NA MODELAGEM  
HIDROLÓGICA UTILIZANDO O MODELO COMPUTACIONAL SWMM**

**POÇOS DE CALDAS/MG**

**2025**

**NATÁLIA APARECIDA LOPES**

**EFEITO DA DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO  
CÓRREGO VARGENS DE CALDAS - POÇOS DE CALDAS/MG NA MODELAGEM  
HIDROLÓGICA UTILIZANDO O MODELO COMPUTACIONAL SWMM**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pelo Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de Alfenas.

Área de concentração: Recursos Hídricos e Meio Ambiente  
Orientador: Prof. Dr. Alexandre Silveira

**POÇOS DE CALDAS/MG**

**2025**

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas  
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Lopes, Natália Aparecida .

Efeito da discretização espacial da bacia hidrográfica do Córrego Vargens de Caldas - Poços de Caldas /MG na modelagem hidrológica utilizando o modelo computacional SWMM / Natália Aparecida Lopes. - Poços de Caldas, MG, 2025.

88 f. : il. -

Orientador(a): Alexandre Silveira.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2025.

Bibliografia.

1. Simulação hidrológica. 2. Detalhamento espacial. 3. Modelos hidrológicos. I. Silveira, Alexandre, orient. II. Título.

Ficha gerada automaticamente com dados fornecidos pelo autor.

NATÁLIA APARECIDA LOPES

**EFEITO DA DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO VARGENS DE CALDAS – POÇOS DE CALDAS/MG NA MODELAGEM HIDROLÓGICA UTILIZANDO O MODELO COMPUTACIONAL SWMM**

O Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação da Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestra em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Recursos Hídricos e Meio Ambiente.

Aprovada em: 14 de novembro de 2025.

Prof. Dr. Alexandre Silveira  
Presidente da Banca Examinadora  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi  
Instituição: Universidade Estadual Paulista

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



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Silveira, Professor do Magistério Superior**, em 24/11/2025, às 15:53, 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 [https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1671752** e o código CRC **9F481926**.

Dedico este trabalho à minha mãe, alicerce fundamental da minha trajetória e força essencial na realização dos meus sonhos.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por guiar meus passos, me proporcionar oportunidades e, mesmo diante das dificuldades, me dar forças para seguir e acreditar na realização de mais este sonho.

À minha mãe, Selma, minha maior fonte de apoio e inspiração, que me lembra todos os dias do porquê desta caminhada. Sua dedicação, amor e confiança foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

Ao meu namorado, Maicon, pela presença constante e pelo suporte emocional que sempre me ofereceu ao longo do percurso.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alexandre Silveira, por compartilhar seu conhecimento, dedicar seu tempo e me incentivar a ir além, aprofundando meus estudos e aprimorando minha visão sobre recursos hídricos.

Ao Prof. Dr. Paulo Henrique Bretanha Junker Menezes, pelo auxílio na criação do banco de dados utilizado no desenvolvimento deste trabalho, especialmente no uso das ferramentas de geoprocessamento.

Aos meus amados bichinhos de estimação, cuja presença e carinho trouxeram conforto e leveza ao meu coração, transformando o peso da rotina em momentos de afeto. Em especial, ao meu Pipoca, companheiro fiel de jornada, que esteve comigo até o fim, mas precisou partir no último momento.

À Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL *campus* Poços de Caldas, aos docentes e ao corpo técnico-administrativo, que, direta ou indiretamente, tiveram papel fundamental na minha formação e nesta caminhada acadêmica, sempre se mostrando solícitos e prestativos.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“O insucesso é apenas uma oportunidade para  
recomeçar com mais inteligência”.

(Ford, 1925, p. 29)

## RESUMO

A gestão dos recursos hídricos, especialmente em ambientes urbanos, requer uma compreensão minuciosa dos processos hidrológicos que ocorrem nas bacias hidrográficas, sobretudo, diante dos impactos do crescimento urbano e consequente impermeabilização do solo. Um dos principais desafios enfrentados é o controle de cheias urbanas, intensificados pela redução das áreas de infiltração e pela sobrecarga das redes de drenagem. Nesse contexto, os modelos hidrológicos computacionais surgem como ferramentas essenciais para simular o escoamento superficial e apoiar o planejamento e a tomada de decisões. Entre os fatores que influenciam a qualidade dessas simulações, destaca-se a discretização espacial, isto é, a forma de subdividir a bacia em unidades menores para representar de maneira mais precisa sua heterogeneidade, considerando variações de relevo, tipo de solo, uso e ocupação e outras características que afetam significativamente a geração e a concentração do escoamento. Diante disso, buscou-se, através deste estudo, avaliar a influência da discretização espacial na modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Córrego Vargens de Caldas, localizada na cidade de Poços de Caldas/MG, por meio de simulações de cenários realizadas com o modelo computacional *Storm Water Management Model* (SWMM). Foram elaborados sete cenários distintos, variando desde a bacia não discretizada até configurações com 2, 3, 4, 5, 6 e 7 sub-bacias, com o intuito de analisar como o nível de detalhamento impacta os resultados simulados, especialmente em relação aos hidrogramas de vazão máxima e no balanço hídrico final. As simulações foram conduzidas com base em chuvas de projeto associadas à períodos de retorno de 25 e 50 anos, geradas por meio de métodos sintéticos. Os parâmetros hidrológicos foram definidos a partir de dados obtidos por geoprocessamento e literatura técnica, incluindo coeficientes de escoamento, percentuais de área impermeável, rugosidade, profundidade de armazenamento e *Curve Number* (CN). A rede de drenagem foi modelada com base em sessões transversais levantadas em campo e inseridas manualmente no modelo, conectando os exutórios (nós) das sub-bacias aos trechos principais de canal. Os hidrogramas mostraram que, no nó de exutório, a magnitude das vazões de pico tende a reduzir com maior discretização, embora em nós intermediários essa relação nem sempre seja linear. O balanço hídrico indica que, a partir do segundo nível de discretização, as variações entre as componentes tornam-se pouco significativas, evidenciando tendência à estabilização, enquanto a ausência de subdivisões subestima o escoamento e provoca o desvio das demais componentes do padrão geral.

**Palavras – chave:** simulação hidrológica; detalhamento espacial; modelos hidrológicos.

## ABSTRACT

Water resources management, especially in urban environments, requires a thorough understanding of the hydrological processes occurring in watersheds, particularly in light of the impacts of urban growth and the consequent soil sealing. One of the main challenges faced is the control of urban flooding, which is intensified by the reduction of infiltration areas and the overloading of drainage networks. In this context, computational hydrological models emerge as essential tools for simulating surface runoff and supporting planning and decision-making. Among the factors that influence the quality of these simulations, spatial discretization stands out, that is, the way of subdividing the basin into smaller units to more accurately represent its heterogeneity, considering variations in terrain, soil type, land use, and other characteristics that significantly affect runoff generation and concentration. In this regard, this study aimed to evaluate the influence of spatial discretization on the hydrological modeling of the Córrego Vargens de Caldas watershed, located in the city of Poços de Caldas, Minas Gerais (Brazil), through scenario simulations using the Storm Water Management Model (SWMM). Seven different scenarios were developed, ranging from a non-discretized watershed to configurations with 2, 3, 4, 5, 6, and 7 sub-watersheds, in order to analyze how the level of detail impacts the simulation results, especially regarding peak flow hydrographs and the final water balance. The simulations were conducted based on design storms associated with 25 and 50 year return periods, generated through synthetic methods. Hydrological parameters were defined based on data obtained through geoprocessing and technical literature, including runoff coefficients, percentages of impervious area, roughness, storage depth, and Curve Number (CN). The drainage network was modeled based on cross-sections surveyed in the field and manually entered into the model, connecting the outlets (nodes) of the sub-watersheds to the main channel segments. The hydrographs showed that, at the outlet node, peak flow magnitudes tend to decrease with increased discretization, although in intermediate nodes this relationship is not always linear. The water balance indicates that, from the second level of discretization onward, variations among the components become insignificant, showing a tendency toward stabilization, while the absence of subdivisions underestimates runoff and causes the other components to deviate from the general pattern.

**Keywords:** hydrological simulation; spatial detailing; hydrological models.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema simplificado do ciclo hidrológico.....	17
Figura 2 – Representação da bacia hidrográfica do Rio Pardo/SP .....	19
Figura 3 – Esquema de bacia como reservatório não-linear.....	25
Figura 4 – Esquema de subdivisão de uma bacia pela metodologia de Otto Pfafstetter .....	31
Figura 5 – Fluxograma simplificado da metodologia adotada .....	33
Figura 6 – Localização da área de estudo.....	35
Figura 7 – Bairros inseridos na bacia com destaque para o Jardim Kennedy II .....	36
Figura 8 – Modelo Digital de Terreno.....	37
Figura 9 – Classes de declividade da bacia hidrográfica do Córrego Vargens de Caldas.....	38
Figura 10 – Representação dos sete níveis de discretização espacial da bacia hidrográfica....	40
Figura 11 – Mapa de uso e ocupação do solo da bacia não discretizada.....	42
Figura 12 – Mapa pedológico da área de estudo .....	45
Figura 13 – Hietograma para TR de 25 anos.....	50
Figura 14 – Hietograma para TR de 50 anos.....	51
Figura 15 – Configuração dos nós e trechos para os diferentes níveis de discretização da bacia hidrográfica .....	52
Figura 16 – Seção transversal T1 .....	53
Figura 17 – Seção transversal T2 e T8 .....	53
Figura 18 – Seção transversal T3 .....	54
Figura 19 – Seção transversal T4 .....	54
Figura 20 – Seção transversal T5, T7 e T10.....	54
Figura 21 – Seção transversal T9 .....	55
Figura 22 – Seção transversal T6 .....	55
Figura 23 – Representação esquemática no modelo com sete sub-bacias e rede de drenagem associada .....	57
Figura 24 – Parâmetros de entrada inseridos no SWMM para sub-bacia, trecho e nó.....	58
Figura 25 – Hidrogramas em N7 para TR 25 .....	59
Figura 26 – Hidrogramas em N7 para TR 50 .....	61
Figura 27 – Variação das vazões de pico em TR 25 e TR 50.....	62
Figura 28 – Variação das vazões em N2 .....	63
Figura 29 – Variação das vazões em N3 .....	64
Figura 30 – Variação das vazões em N4 .....	65

Figura 31 – Variação das vazões em N6 .....	66
Figura 32 – Balanço hídrico para os sete níveis de discretização para TR 25 .....	67
Figura 33 – Percentuais de cada componente em relação à precipitação total para TR 25.....	68
Figura 34 – Balanço hídrico para os sete níveis de discretização para TR 50 .....	69
Figura 35 – Percentuais de cada componente em relação à precipitação total para TR 50.....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros morfométricos da bacia hidrográfica do Córrego Vargens de Caldas	38
Tabela 2 – Parâmetros morfométricos das sub-bacias	40
Tabela 3 – Quantitativo de áreas por sub-bacia	43
Tabela 4 – Condições de umidade antecedente	44
Tabela 5 – Classes hidrológicas dos solos	45
Tabela 6 – Valores de CN por sub-bacia	46
Tabela 7 – Valores de armazenamento em depressões	47
Tabela 8 – Valores de coeficiente de rugosidade por sub-bacia	48
Tabela 9 – Cotas altimétricas e coordenadas dos nós	53
Tabela 10 – Características dos trechos em cada nível de discretização	55
Tabela 11 – Variações das vazões máximas em N7 para TR 25	60
Tabela 12 – Variações das vazões máximas em N7 para TR 50	61
Tabela 13 – Desvio padrão entre os níveis 2SUB e 7SUB	71
Tabela 14 – Desvio padrão entre os níveis 1SUB e 7SUB	71
Tabela 15 – Valores absolutos e relativos correspondentes a cada classe de uso e cobertura do solo	83
Tabela 16 – Valores de CN por tipo de solo e classes de uso e ocupação discriminados por sub-bacia	86

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CBERS	<i>China-Brazil Earth Resources Satellite</i>
CN	Curva número
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
GPRH	Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos
HEC-HMS	<i>Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISE	<i>Integral Square Error</i>
KNN	<i>K-Nearest Neighbors</i>
LENHS	Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento
LID	<i>Low Impact Development</i>
LSE	<i>Simple Least Square Regression</i>
MDT	Modelo Digital de Terreno
MHD	Modelo Hidrológico Distribuído
MRs	Microreservatórios
NRCS	<i>Natural Resources Conservation Service</i>
NSE	Coefficiente de Nash e Stouffle
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SEE	<i>Standard Error of Estimate</i>
SIGs	Sistemas de Informações Geográficas
SMU	Sistemas de microdrenagem urbana
SRTC	<i>Sensitivity-based Radio Tuning Calibration</i>
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
TC	Tempo de concentração
TR	Tempo de retorno

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1	O CICLO HIDROLÓGICO .....	17
2.2	ESCOAMENTO SUPERFICIAL.....	18
2.3	BACIAS HIDROGRÁFICAS .....	19
2.4	DRENAGEM URBANA.....	20
2.5	MODELOS HIDROLÓGICOS .....	21
<b>2.5.1</b>	<b>Classificação dos modelos .....</b>	<b>22</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Aplicabilidade dos modelos .....</b>	<b>23</b>
2.6	SWMM.....	24
2.7	ESTUDOS ENVOLVENDO MODELAGEM NO SWMM.....	25
2.8	DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL .....	30
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>33</b>
3.1	DADOS DE ENTRADA DO MODELO .....	33
<b>3.1.1</b>	<b>Caracterização da área de estudo .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Discretização em sub-bacias .....</b>	<b>39</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Classificação do uso e ocupação do solo .....</b>	<b>41</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Parâmetros de infiltração e escoamento .....</b>	<b>44</b>
<b>3.1.5</b>	<b>Obtenção de dados de precipitação e vazão .....</b>	<b>49</b>
<b>3.1.6</b>	<b>Configuração da rede de drenagem .....</b>	<b>51</b>
3.2	MODELAGEM HIDROLÓGICA .....	56
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>59</b>
4.1	HIDROGRAMAS NO EXUTÓRIO .....	59
4.2	HIDROGRAMAS EM NÓS INTERMEDIÁRIOS .....	63
4.3	BALANÇO HÍDRICO .....	67
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>73</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>75</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O escoamento superficial, é uma das principais componentes do ciclo hidrológico, ocorrendo quando a água da chuva não consegue infiltrar no solo devido à saturação do terreno ou a presença de superfícies impermeáveis, como asfalto e concreto. Logo, essa água esco sobre a superfície até alcançar rios, lagos ou outras áreas de acumulação. Esse fenômeno sofre a influência de diversos fatores, como a intensidade e duração da precipitação, características do solo e terreno e, principalmente, o grau de impermeabilização da área. A partir do conhecimento destas informações, é possível empregar modelos de análise hidrológica para simular o comportamento da água em uma determinada área.

De um modo geral, os modelos hidrológicos podem ser entendidos como representações simplificadas de sistemas reais, como uma bacia hidrográfica, onde ocorrem diversos fenômenos hidrológicos. Com capacidade para simular processos como escoamento, infiltração, armazenamento da água, entre outros, os modelos hidrológicos são ferramentas fundamentais para a análise, previsão e gerenciamento dos recursos hídricos, auxiliando na tomada de decisões envolvendo o planejamento urbano e controle de cheias.

Estes modelos se consolidaram como ferramentas de representação desses comportamentos com alto potencial para a simulação de cenários de mudanças climáticas, de alterações do uso do solo e de intervenções antrópicas em diferentes escalas espaciais e temporais (Blainski; Acosta; Nogueira, 2017). Como forma de auxiliar na compreensão destas alterações e projetar mudanças futuras nos ecossistemas, estudos ambientais têm, de forma crescente, recorrido a modelos hidrológicos, que consistem em um conjunto de equações e métodos, integrando variáveis e parâmetros (Silva, 2007).

Com o advento dos computadores na década de 60, surgiram os primeiros modelos hidrológicos, a partir de então, foram desenvolvidas diversas propostas para simular as diferentes etapas do ciclo hidrológico (Collodel, 2009). Ao longo dos anos, estudiosos da área hidrológica criaram diversas ferramentas preditivas, como modelos empíricos, concentrados, distribuídos e regionalizações estatísticas, que possibilitam decisões objetivas e quantitativas sobre a gestão dos recursos hídricos, a qualidade da água e a avaliação de riscos naturais (Santos, 2024).

Nesse sentido, o SWMM (ou *Storm Water Management Model*), desenvolvido pela EPA - *Environmental Protection Agency*, nos Estados Unidos, é um modelo hidrológico computacional que simula a quantidade e a qualidade das águas pluviais em áreas urbanas.

Trata-se de um software aberto e de domínio público, que têm sido amplamente difundidos em estudos envolvendo a elaboração de estratégias e o manejo eficiente das águas pluviais.

A partir da caracterização física e climática da área de estudo, dados previamente fornecidos ao modelo, o SWMM simula o hidrograma de escoamento direto em cada sub-bacia. Além disso, o modelo estima outras variáveis importantes como por exemplo, vazão, profundidade, velocidade em trechos e nós, além da qualidade da água da rede. Essas informações são a base para a análise e controle de enchentes e inundações, dimensionamento de sistemas de microdrenagem e impactos ambientais. Embora se destaque como uma importante ferramenta para fins de diagnóstico de bacias hidrográficas, simulação de cenários e gestão urbana, o modelo SWMM apresenta certas restrições: a predisposição a erros devido à necessidade de grande quantidade de dados de entrada e a contraindicação para sua utilização em bacias rurais (Rocha, 2013).

A precisão dos resultados gerados pelo SWMM está associada tanto à qualidade dos dados de entrada quanto à forma de representação da área no modelo. Dessa maneira, é conveniente realizar a divisão da bacia, como um todo, em áreas menores. A esse procedimento de divisão, dá-se o nome de discretização espacial, a qual influencia diretamente no produto das simulações.

Mediante a discretização espacial, é possível realizar uma análise mais detalhada de cada sub-área. Essa abordagem permite a avaliação individual dos parâmetros fisiomorfológicos, padrões de infiltração e escoamento, especialmente em regiões de uso e ocupação do solo bastante diversificados. Como cada sub-bacia possui características particulares, sua contribuição para o escoamento superficial também será distinta. Os critérios para a sub-divisão dependem, entre outros fatores, do foco do estudo, das características da bacia e do nível de detalhamento que se pretende atingir.

Segundo Collischonn (2001), a subdivisão de bacias em sub-bacias menores surgiu como solução para superar obstáculos dos modelos conceituais concentrados, que demandam uma série de dados históricos para calibração e são limitados quanto a representação da variabilidade espacial da chuva em regiões distintas da bacia e a previsão de cenários de mudanças no uso do solo. O aumento da necessidade de respostas mais detalhadas em diferentes pontos da bacia, associado à maior disponibilidade e à otimização do gerenciamento de dados, criou um ambiente favorável para o desenvolvimento de modelos distribuídos, capazes de considerar a heterogeneidade das características físicas da bacia hidrográfica (Collischonn, 2001; Filho *et al.*, 2012).

Partindo desse contexto, o presente estudo tem como finalidade principal analisar a resposta hidrológica da bacia hidrográfica do Córrego Vargens de Caldas, localizada no município de Poços de Caldas/MG, frente a diferentes níveis de discretização espacial. Para tanto, são realizadas simulações no software SWMM, buscando compreender de que forma o refinamento da discretização afeta os hidrogramas obtidos e contribui para resultados mais representativos.

### 1.1 OBJETIVO GERAL

O trabalho aqui desenvolvido tem como principal objetivo avaliar como diferentes níveis de discretização espacial interferem no comportamento hidrológico de uma mesma área, por meio de simulações utilizando o software SWMM.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Analisar a influência do nível de discretização da bacia nas vazões máximas no exutório e em nós intermediários, observando como o aumento no número de sub-bacias altera a magnitude e o tempo de pico;
- b) Comparar o balanço hídrico obtido em diferentes níveis de discretização, verificando as variações entre as componentes de escoamento, infiltração e armazenamento;
- c) Investigar o efeito da discretização sobre a lâmina d'água escoada, analisando possíveis tendências de superestimação ou subestimação do volume escoado;
- d) Identificar o nível de discretização a partir do qual as variações entre os resultados simulados tornam-se pouco significativas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

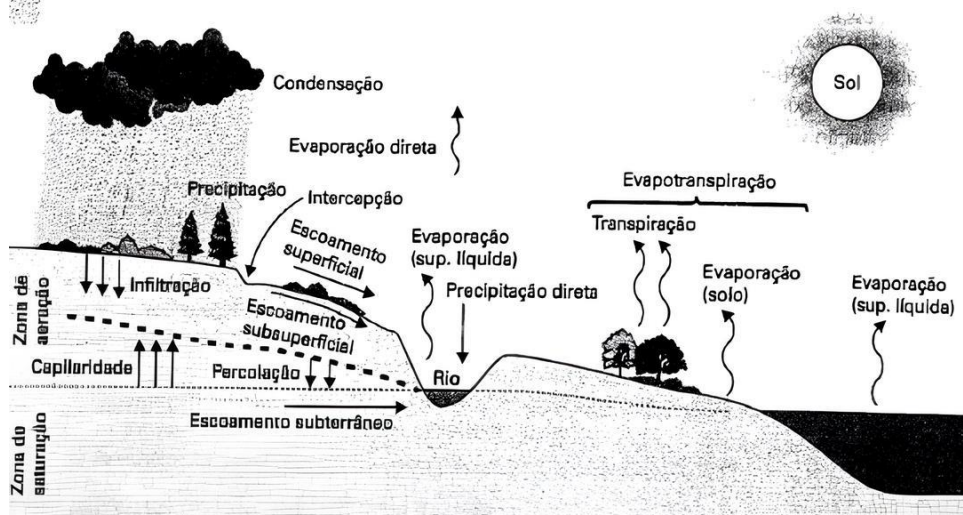
### 2.1 O CICLO HIDROLÓGICO

A presença de água nas suas três diferentes fases: vapor no ar, líquido nos oceanos, rios e lagos, e sólido em seres vivos, solos e rochas, resulta da complexa interação entre diversos fenômenos que envolvem componentes e processos da hidrosfera, atmosfera, biosfera e litosfera, que determina a distribuição da água no espaço e no tempo (Avelar; Coelho Netto, 2007). O ciclo hidrológico é impulsionado por diversos fatores, entre eles a energia térmica do sol, que aquece a água e promove a evaporação, e a ação dos ventos, que leva o vapor d'água para os continentes, e pela gravidade, que é responsável pelos processos de precipitação, infiltração e deslocamento das massas de água (Tundisi, 2003).

Conforme o *United States Federal Council of Science and Technology*, citado por Tucci (2001), "a hidrologia é a ciência que trata da água da terra, sua ocorrência, circulação e distribuição, suas propriedades físicas e químicas, e suas relações com o meio ambiente, incluindo suas relações com a vida." A hidrologia se dedica a investigar o ciclo da água, que pode ser descrito como um processo cíclico onde a água circula entre a atmosfera e a Terra, passando pelos estados líquido ou sólido e retornando ao estado de vapor (Guimarães, 2012).

Para fins de compreensão, o início do ciclo hidrológico (Figura 1), se dá a partir da evaporação da água dos oceanos, gerando vapor, que é então transportado pelo movimento das massas de ar e, quando atinge condições específicas, condensa-se formando nuvens, que eventualmente podem levar à ocorrência de precipitação (Balbinot *et al.*, 2008).

Figura 1 – Esquema simplificado do ciclo hidrológico



Fonte: Adaptado de Braga *et al.* (2005, p. 35).

Quando a precipitação ocorre, uma parte da água é retida pela vegetação ou outras barreiras ao escoamento, o que resulta na interceptação e evita que toda a água chegue diretamente ao solo; essa água retida posteriormente passa por evaporação e retorna à atmosfera, contribuindo de maneira significativa para o equilíbrio hídrico da bacia hidrográfica ao suavizar as variações na vazão dos rios ao longo do ano e diminuir os picos de enchentes (Tucci, 2001).

Quando a água atinge o solo, uma fração segue como escoamento superficial, eventualmente alcançando cursos d'água ou reservatórios de superfície, enquanto a outra parte é temporariamente armazenada por infiltração no solo, podendo ser liberada para a atmosfera através da evapotranspiração, permanecer como água no solo por um período adicional ou infiltrar-se para formar água subterrânea (Freitas *et al.*, 2013). De acordo com Bueno, Galbiatti e Borges (2005), a degradação de grandes áreas, que afeta tanto a hidrologia quanto a biodiversidade, tem aumentado significativamente devido à remoção da cobertura vegetal, uma vez que diferentes tipos de vegetação influenciam de maneira diversa as propriedades do solo e da água.

Nos países em desenvolvimento, a urbanização e as obras de drenagem frequentemente são conduzidas de maneira insustentável, resultando em sérios impactos no ciclo hidrológico, que é intensamente alterado nas áreas urbanas devido principalmente à modificação das superfícies e à canalização do escoamento, bem como ao aumento da poluição causada pela contaminação do ar, das superfícies urbanas e dos resíduos sólidos gerados pela população (Tucci, 2003).

## 2.2 ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Pode-se dizer que o escoamento superficial é o elemento do ciclo hidrológico que mais se destaca na hidrologia, sendo amplamente estudado, observado e modelado devido a sua forte influência nos estudos sobre aproveitamento hídrico, gestão integrada de bacias hidrográficas e no dimensionamento de obras hidráulicas (Mello; Silva, 2013).

Durante um evento de chuva, uma parte da água precipitada é absorvida pela vegetação, outra parte é evaporada ou infiltrada no solo, até que a taxa de infiltração seja excedida, momento em que os espaços porosos já se encontram totalmente preenchidos, iniciando assim o escoamento superficial, que termina quando a intensidade de precipitação diminui a ponto de ser menor do que a taxa de infiltração da água no solo (Brito, 2018; Pruski; Rodrigues, 2019).

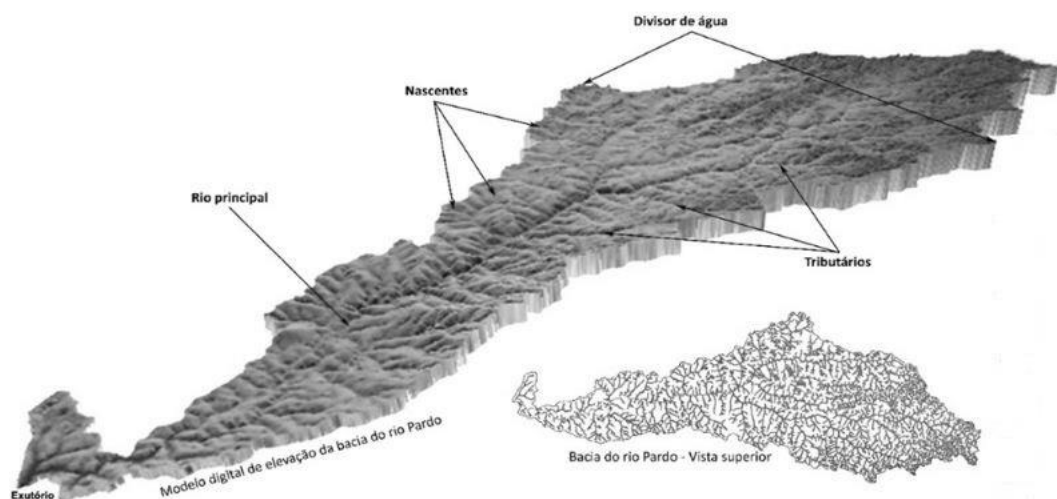
Assim como na infiltração da água, as características do solo, tais como uso e cobertura, estrutura e teor de umidade, são fatores que têm influência significativa no escoamento superficial, que, por sua vez, tende a aumentar com o aumento da intensidade e duração da precipitação (Mello, 2009). A remoção da vegetação para dar lugar a construção urbana altera as condições naturais ao reduzir a capacidade do solo de infiltrar água e, conseqüentemente, a recarga dos aquíferos subterrâneos, enquanto aumenta o escoamento superficial, e superfícies impermeáveis, como telhados, ruas e estacionamentos pavimentados, com sua menor rugosidade hidráulica, aceleram a velocidade do escoamento e os processos de transporte associados. (Lima, 2010).

### 2.3 BACIAS HIDROGRÁFICAS

A bacia hidrográfica desempenha um papel crucial na compreensão do ciclo hidrológico, especialmente na fase terrestre, envolvendo processos como infiltração e escoamento superficial, podendo ser pensada como uma região delimitada por uma linha natural, o divisor de águas, que a destaca das demais bacias vizinhas, onde a água das chuvas é armazenada e direcionada por uma rede de cursos d'água que convergem para um único ponto de descarga, o exutório (Linsley; Franzini, 1978; Tucci, 2001).

A Figura 2 representa uma bacia hidrográfica e seus principais elementos.

Figura 2 – Representação da bacia hidrográfica do Rio Pardo/SP



Fonte: Adaptado de Piroli (2022, p. 44).

Segundo Tucci (2001), as alterações do processo hidrológico são influenciadas por vários fatores que definem uma bacia hidrográfica, dentre os quais estão o tipo de rocha e solos,

o relevo da área, a vegetação presente e, também, as condições climáticas, como a precipitação, a taxa de evaporação e a radiação solar. Clarke; Tucci e Collischonn (2003) destacam que a análise do regime de vazões, bem como os padrões das massas de ar e os eventos de chuva local, podem ser significativamente influenciados por fatores como a altitude e a posição geográfica, elementos que desempenham um papel crucial nos resultados obtidos. O comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é igualmente influenciado pelas atividades humanas, pois, ao modificar o meio natural, o homem altera os processos do ciclo hidrológico (Tonello, 2005).

O padrão de urbanização, que se deu de forma acelerada e desordenada, resultou na impermeabilização de grandes áreas, inclusive nos fundos de vales onde foram construídas amplas avenidas para facilitar a circulação de veículos, desafia os processos naturais e, mesmo em cidades com topografia relativamente plana, cuja infiltração, em tese, deveria ser favorecida, causa sérios problemas relacionados à gestão das águas (Tavares; Silva, 2008).

Diversas metodologias podem ser empregadas para o estudo de uma bacia hidrográfica urbana, dentre as quais se destaca a análise morfométrica, que busca identificar as relações entre os parâmetros mensuráveis da bacia e seus fatores condicionantes, mensurando vários componentes físicos e suas variáveis para avaliar a situação ambiental da bacia hidrográfica (Venceslau; Miyazaki, 2019). Estas características morfométricas normalmente se dividem em: características geométricas, características do relevo e características da rede de drenagem (Tonello, 2005).

## 2.4 DRENAGEM URBANA

A drenagem urbana pode ser traduzida como um procedimento que envolve a captação e direcionamento das águas provenientes das chuvas através de um sistema de condutos denominado microdrenagem, que visa conduzir essas águas até um ponto de descarga final, conectando-se à drenagem natural, composta, por exemplo, por rios e córregos, conhecida como macrodrenagem (Cavalcanti, 2020).

O crescimento urbano no contexto brasileiro tem gerado impacto substancial nos sistemas de gestão das águas, com reflexos, sobretudo, na drenagem urbana, podendo ser notados nos frequentes e intensificados episódios de inundações, bem como a consequente degradação ambiental (Tucci, 2002). De acordo com Christofidis *et al.* (2019), as implicações da expansão populacional abrangem, dentre outras, a impermeabilização do solo, expansão de áreas ocupadas para as faixas marginais e canalização dos rios, contribuindo para o

agravamento de cheias no período chuvoso, trazendo diversos prejuízos de ordem humana, material e ambiental.

Em geral, para contornar tais problemas, são implementadas alternativas que se limitam a intervenções locais, desconsiderando a transferência para a jusante, sendo estas, muitas das vezes, áreas de várzea destinadas a comportar o volume de água em épocas de cheia, e, uma vez que essas áreas dão lugar a obras de urbanização, soluções serão sempre requeridas a jusante (Canholi, 2015). Cruz; Souza e Tucci (2007) observam que esta abordagem, além de ser onerosa, apenas desloca o problema de lugar, não surtindo efeitos a longo prazo.

Nessa perspectiva, o sistema de drenagem deve atuar de modo integrado, com soluções abrangendo todos os aspectos da micro e macrodrenagem, incluindo, lotes, áreas públicas, rios canais e lagos, considerando os efeitos das intervenções pontuais sobre toda a bacia (Araújo, 2018). De acordo com Lima *et al.* (2007), tais ações demandam planejamento e controle eficazes dos sistemas hídricos, os quais necessitam de metodologias capazes de realizar a previsão espacial e temporal dos sistemas hidrológicos.

## 2.5 MODELOS HIDROLÓGICOS

Em geral, um modelo pode ser entendido como uma simplificação da realidade ou parte desta que seja relevante para o conhecimento do pesquisador, permitindo por meio desta reconstrução, a identificação dos reflexos e intervenções no mundo real (Christofollette, 1999). Na concepção de Silva (2007), um modelo hidrológico consiste em um sistema de equações e procedimentos constituídos por variáveis e parâmetros aplicados extensivamente em estudos ambientais, auxiliando no entendimento da influência das mudanças no uso da terra e nas projeções futuras para os ecossistemas.

Segundo Tucci (2005), a heterogeneidade física das bacias e a complexidade dos processos envolvidos propiciaram o desenvolvimento de variados modelos, cuja distinção se baseia nos dados empregados, discretização, abordagem dos aspectos mais importantes e nos objetivos pretendidos. Os exemplos mais comuns são os modelos chuva-vazão, que atuam com a conversão da chuva em escoamento, sendo empregados na realização de simulações e previsão de séries temporais de vazão a partir de dados de precipitação (Gontijo, 2007).

Nesse sentido, os modelos de simulação associados ao monitoramento hidrológico e a ferramentas de geoprocessamento, apresentam-se como meios eficientes para prever os impactos do crescimento urbano nas bacias hidrográficas (Collodel, 2009; Cavalcanti, 2020),

já tendo apresentado resultados satisfatórios tanto na simulação e previsão de cenários, bem como recurso para a concepção de projetos hidrológicos e hidráulicos (Filho *et al.*, 2012).

Para Paiva (2001), o acompanhamento hidrológico é fundamental para uma caracterização quali-quantitativa precisa dos recursos hídricos. Machado e Vettorazzi (2003) também destacam o emprego de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) como uma solução viável para a construção do banco de dados desses modelos, uma vez que, a principal restrição à utilização destes reside na complexa tarefa de trabalhar com a infinidade de dados que caracterizam a diversidade dos sistemas naturais.

No processo de modelagem, todos os modelos, ainda que medidos em campo, necessitam do ajuste de seus parâmetros para otimizar seu desempenho, cujas principais dificuldades de determinação incluem a precisão das estimativas de precipitação e a imensa variedade de interações internas, que podem assumir inúmeras combinações, potencialmente distorcendo os parâmetros obtidos (Collischonn; Tucci, 2001). Este procedimento de ajuste, também conhecido como calibração pode ser realizado manualmente, por meio de tentativa e erro ou então de forma automatizada, onde a calibração é realizada por algoritmos de otimização (Cavalcanti, 2020).

### **2.5.1 Classificação dos modelos**

Os modelos hidrológicos podem ser classificados com base em diferentes critérios, sendo os mais comuns, pelo tipo de variável utilizada (modelos estocásticos ou determinísticos), pela relação estabelecida entre essas variáveis (modelos empíricos ou conceituais), pela forma de representação de seus dados (modelos discretos ou contínuos), pela consideração da posição espacial da bacia (modelos concentrados ou distribuídos) e da dependência temporal (modelos estacionários ou dinâmicos) (Moreira, 2005).

Os modelos estocásticos são construídos a partir da análise de séries históricas de vazão, tendo em consideração como estas se relacionam ao tempo em que ocorrem e, assim, permitem a realização de previsões futuras com base nas mesmas características da série de vazões observadas (Warren, 2013). Já os modelos determinísticos têm o propósito de quantificar os processos físicos que ocorrem em uma bacia ao converter a chuva em vazão, de modo que para um mesmo conjunto de dados de entrada, os resultados gerados serão sempre os mesmos (Wheater, 2008; Caldeira *et al.*, 2018).

Um modelo é considerado empírico quando suas relações têm como base observações realizadas para uma região específica, o que o torna limitado para simulações em condições

distintas daquelas observadas, como alterações no uso do solo e chuvas muito intensas (Moreira, 2005). Segundo o autor supracitado, os modelos conceituais são mais complexos do que os modelos empíricos, pois procuram reproduzir todos os processos físicos envolvidos no fenômeno estudado, exigindo, para isso, um conjunto de dados robusto e parametrização cuidadosa.

De acordo com Filho *et al.*, (2012), um modelo hidrológico discreto é aquele cujo objetivo se concentra em representar um determinado período da série, como um evento de cheia ou recessão. Já os modelos contínuos, segundo os mesmos autores, foram desenvolvidos para simular períodos longos de série, considerando as variações das condições hidrológicas no decorrer do tempo, razão pela qual apresentam uma configuração mais complexa.

Nos modelos concentrados, a bacia hidrográfica é tratada como uma área homogênea, sendo atribuído a cada parâmetro um valor médio que represente toda a bacia (Almeida; Serra, 2017). Por outro lado, os modelos distribuídos incorporam a variabilidade espacial presente nas diferentes variáveis do modelo e, em alguns casos, também consideram a existência de relação topológica entre os elementos da bacia (Rennó, 2004).

Por fim, os modelos são ditos estacionários quando geram um resultado específico para um instante, assumindo que as características do sistema analisado não mudam com o tempo (Moreira, 2005). Em contrapartida, um modelo dinâmico representa a evolução de um sistema ao longo do tempo, levando em consideração, por exemplo, as variações geomorfológicas da bacia (Carvalho, 2020).

### **2.5.2 Aplicabilidade dos modelos**

Os modelos hidrológicos desempenham um papel fundamental na estimativa e compreensão dos processos físicos naturais, tendo em vista as limitações existentes para a medição direta destes, tornando-se, assim, ferramentas indispensáveis para suprir informações cruciais no planejamento e gestão dos recursos hídricos (Almeida; Serra, 2017).

As principais aplicações dos modelos hidrológicos foram listadas por Lou (2010), sendo estas:

- Compreensão do comportamento dos fenômenos hidrológicos no exutório da bacia: o detalhamento do modelo possibilita analisar a sensibilidade dos fenômenos em bacias com características distintas e testar diferentes formulações dos processos;
- Análise de consistência e preenchimento de falhas: devido à maior disponibilidade de dados de precipitação em comparação aos de vazão, os modelos hidrológicos, após

ajustados, permitem estender as séries de vazão com base nos dados de precipitação. Além disso, podem ser empregados para verificar a consistência de curvas-chave, níveis e chuvas observadas, bem como identificar alterações no rio e na bacia;

- Previsão de vazão: a previsão de vazão é essencial para atividades como o controle de cheias e operação de obras hidráulicas. Essa previsão pode ser feita a partir da precipitação, da vazão a montante ou da combinação de ambas. Para isso, utilizam-se modelos com estruturas computacionais específicas, capazes de incorporar e atualizar, em tempo real, as informações disponíveis;
- Dimensionamento e previsão de cenários de planejamento: sendo de conhecimento a precipitação e sua probabilidade de ocorrência, é possível estimar a vazão para diferentes cenários de uso e alteração da bacia e, com isso, dimensionar e planejar o sistema. No entanto, os modelos hidrológicos podem apresentar limitações ao simular condições distintas daquelas para as quais foram ajustadas, como mudanças no uso do solo;
- Efeitos resultantes da modificação do uso do solo: a análise do escoamento gerado por alterações no uso do solo é complexa e exige metodologias mais avançadas. Os modelos disponíveis geralmente são conceituais e baseados em formulações empíricas, o que limita sua precisão quantitativa. Seus parâmetros abrangem diversas características da bacia, dificultando a análise isolada de características específicas, como desmatamento ou urbanização. Já os modelos mais detalhados fisicamente, com menor empirismo, enfrentam limitações devido à heterogeneidade da bacia.

## 2.6 SWMM

O *Storm Water Management Model* - SWMM, desenvolvido pela U.S EPA (*Environmental Protection Agency*), em 1971, é um software de código aberto e gratuito para uso mundial com aplicações voltadas à análise e planejamento de estratégias relacionadas ao controle das águas pluviais e demais sistemas de drenagem mediante a simulações de eventos de curto ou longo prazo da quantidade e qualidade do escoamento superficial (EPA, 2023).

A partir de dados de entrada, a aplicação simula a resposta de um determinado sistema a precipitações variáveis e outras componentes do ciclo hidrológico, bem como vazões e profundidades em cada canal ou tubulação, o que torna o SWMM uma ferramenta versátil, abrangendo desde sistemas voltados à identificação e controle de enchentes, inundações e

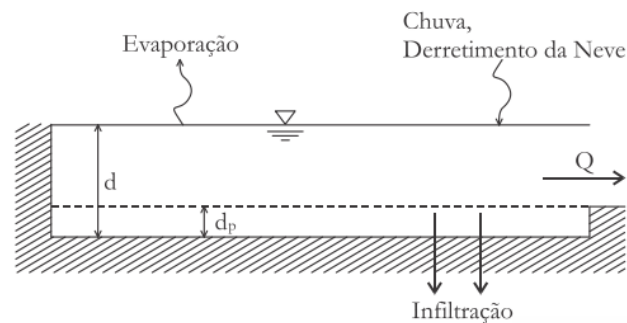
cargas poluentes, até a simulação de técnicas compensatórias em sua versão mais atual (Collodel, 2009; Shinma, 2011; Cavalcanti, 2020).

Segundo Garcia e Paiva (2006) e LENHS (2012), a obtenção do escoamento superficial se dá através de um reservatório não-linear nas sub-bacias ou também por um sistema composto por tubulações e canais, sendo retratado pelas equações de Saint-Venant, que podem ser resolvidas mediante três modelos de propagação: fluxo em regime uniforme (escoamento uniforme e permanente), onda dinâmica (simulação dos efeitos do remanso, ressalto hidráulico, perdas e fluxo pressurizado) e onda cinemática (desprezando os efeitos considerados pelo modelo dinâmico).

A não linearidade mencionada no parágrafo anterior se refere a parcela da profundidade da água no reservatório ( $d$ ) e a profundidade desta que fica retida nas depressões ( $d_p$ ) (Figura 3), esta, quando superada, resulta em escoamento superficial (Silva, 2018).

O SWMM também permite que uma sub-bacia seja dividida em uma parcela permeável e outra impermeável, podendo esta última, ser subdividida em duas outras, contendo áreas com ou sem armazenamento em depressão, permitindo que o processo de infiltração no solo seja conduzido pelo método de Horton, *Green Ampt* ou *Soil Conservation Service – SCS* (Silva, 2018).

Figura 3 – Esquema de bacia como reservatório não-linear



Fonte: LENHS (2012, p. 72).

## 2.7 ESTUDOS ENVOLVENDO MODELAGEM NO SWMM

Conforme Filho *et al.* (2012), a inconstância dos aspectos ambientais e a complexidade das áreas de estudos são razões que justificam a dificuldade em quantificar os fluxos hídricos, fundamentais para a adequada gestão destes recursos e dimensionamento de obras de engenharia, nesta perspectiva. Visando superar tais barreiras, a modelagem hidrológica se

apresenta como alternativa eficaz, permitindo a reprodução de fenômenos hidrológicos, mediante a análise de componentes espaciais e temporais.

O estudo realizado por Collodel (2009) avaliou diferentes níveis de detalhamento na representação hidrológica da bacia do Córrego do Gregório, em São Carlos/SP, utilizando o SWMM. A análise de sensibilidade revelou que alguns dos parâmetros que mais exerceram influência sobre a vazão de pico, assim como o volume escoado foram a porcentagem de áreas impermeáveis e capacidade de infiltração. De modo geral, os resultados apontaram a necessidade da consideração da microdrenagem na concepção dos sistemas e evidenciaram que uma representação mais detalhada refletiu também em maiores vazões de pico resultantes para eventos mais frequentes, além da importância de uma determinação precisa das áreas impermeáveis, dada a influência destas sobre os hidrogramas resultantes.

Rocha (2013) aplicou o software SWMM para correlacionar o uso e ocupação do solo aos processos hidrológicos da bacia hidrográfica do Córrego Samambaia, no município de Goiânia/GO, utilizada para abastecimento público, onde se constatou um processo intensificado de ocupação. A análise considerou três períodos distintos, dentro de uma série histórica de 20 anos, além de mais três cenários com acréscimo nas parcelas de áreas impermeáveis superiores às taxas observadas. Ao verificar os extremos, ou seja, o período mais remoto considerado e o cenário com maior percentual impermeável, notou-se um aumento de aproximadamente 24 vezes em relação ao escoamento superficial, ao passo em que a infiltração se tornou 70% menor. Como conclusão, o estudo propôs medidas para um planejamento urbano adequado, uma vez que, um índice superior à 50% de área impermeável resultaria na inviabilidade da bacia no que se refere ao abastecimento da população.

Faria, Barbassa e Silveira (2014) realizaram simulações empregando o modelo SWMM para avaliar a resposta hidrológica da bacia do Córrego Barbado, localizado na cidade de Cuiabá/MT, mediante diferentes cenários de impermeabilização do solo. A calibração manual dos parâmetros foi realizada para dois eventos e os ajustes foram considerados satisfatórios, com coeficientes médios de determinação ( $R^2$ ) e Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE) de 0,91 e 0,84, respectivamente. O processo de validação foi realizado para outros dois eventos e os valores obtidos se assemelham aos observados na calibração e em estudos anteriores. Concluiu-se pela análise de sensibilidade que o parâmetro mais sensível é a porcentagem de área impermeável, e que o fator preponderante para a ocorrência de enchentes na bacia é o tempo de retorno (TR), em consequência da urbanização.

Silva e Silva (2017) utilizaram o modelo SWMM para avaliar os efeitos da discretização espacial para uma mesma área na geração de escoamento superficial, tendo em vista a forte

heterogeneidade das características desta. Para isso, foram definidos quatro níveis de resolução espacial: D1, sendo este o maior nível de resolução, onde foram obtidas 373 áreas de contribuição e representada toda a rede de microdrenagem; D2, agregando os lotes em áreas maiores e suprimindo as tubulações das ruas secundárias, mantidas apenas as galerias principais da microdrenagem; em D3 dividiu-se a área total de estudo em 3 áreas de contribuição e, por fim, toda a área foi agregada em uma única bacia, a D4, na qual toda a rede de microdrenagem foi suprimida. Para as simulações foram consideradas chuvas de projeto com durações de 25 min. e 1 hora. Para a primeira foram construídos três hietogramas, variando a localização do pico do evento, estando este na metade da duração e deslocado 60% para o início e para o fim da duração. Pôde-se concluir que, em relação ao volume gerado para cada discretização não foram observadas variações significativas para os eventos relacionados à duração de 25 minutos. Contudo, para a duração de 1 hora houve uma variação de  $6,39 \times 10^3 \text{ m}^3$  para  $5,91 \times 10^3 \text{ m}^3$  entre as discretizações D2 e D3. Além disso, para todos os eventos, D1 e D2 apresentaram resultados semelhantes, com tempo de pico variando entre 1 e 3 min e vazão de pico entre 3,35 e  $3,76 \text{ m}^3/\text{s}$ . Esta semelhança também foi observada entre D3 e D4, cujo tempo de pico coincidiu para cada evento chuvoso e as vazões variaram entre 1,96 e  $2,86 \text{ m}^3/\text{s}$ . A maior vazão de pico observada ocorreu para o evento de 25 minutos com 60% do pico de chuva deslocado para o início da duração, com  $1,54 \text{ m}^3/\text{s}$  de diferença para as discretizações D1 e D4. Com isso, é possível indicar que para eventos de precipitação com maior duração as diferenças nos hidrogramas resultantes entre as discretizações tendem a ser menores, ocorrendo, no entanto, maior diferença nos volumes.

Com o objetivo de representar seu comportamento hidrológico e auxiliar na definição de medidas de gerenciamento e controle das águas pluviais do município, Cavalcanti (2020) fez uso do SWMM para a modelagem hidrológica da sub-bacia do Ribeirão Vai e Volta, localizada em Poços de Caldas/MG. Foi observado através da análise de sensibilidade, que os parâmetros mais sensíveis no modelo são, primordialmente: a área impermeável, o coeficiente de rugosidade das superfícies impermeáveis e a largura das sub-bacias, e com menor peso, a declividade destas. Tomando como referência o Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE), o desempenho do modelo na representação hidrológica da bacia analisada pode ser classificado como bom, uma vez que foram obtidos nos processos de calibração e validação, NSE médios de 0,73 e 0,79, respectivamente, e vazão de pico e escoamento superficial com erros inferiores a 15%.

Rodrigues e Santini Júnior (2021) estudaram os efeitos do emprego de técnicas compensatórias na sub-bacia hidrográfica Ribeirão do Santa Rita, situada no município de

Fernandópolis/SP, empregando o modelo hidrológico SWMM. As variáveis analisadas foram a vazão de pico e o tempo de resposta dos cenários, a fim de analisar a capacidade de reduzir a intensidade das inundações. Diversas técnicas compensatórias foram simuladas, de forma isolada e em conjunto e aplicadas para a configuração urbana de 2017. Através dos hidrogramas gerados, observaram-se melhores resultados para tempos de retorno menores. Os percentuais de atenuação das vazões de pico foram de 33,72%, 31,38%, 31,08% e 12,20%, para as técnicas de trincheiras de infiltração, pavimentos permeáveis, jardins de chuva e telhados verdes, respectivamente. Nos cenários com a aplicação de técnicas isoladas, o aumento no tempo de resposta foi de até 16 minutos e com as técnicas em conjunto esse tempo subiu para 18 minutos. A aplicação de todas as técnicas compensatórias em conjunto resultou em uma redução de 37,29% da vazão de pico. Por meio dos resultados apresentados, concluiu-se, portanto, que as técnicas compensatórias empregadas no estudo têm impacto significativo na diminuição de ocorrências de inundações, através da redução das vazões de pico e aumento do tempo de resposta da sub-bacia.

Rocha, Pereira e Lima Neto (2021) aplicaram o SWMM em simulações para avaliar a resposta hidrológica do sistema de macrodrenagem do rio Cocó, que abrange parte do município de Fortaleza e outros adjacentes, localizados no estado do Ceará, cuja bacia fica localizada em uma área de transição urbana-rural e seu exutório sofre influência marítima. A simulação das vazões ocorreu sob condição de precipitação moderada e no período de um mês. Os resultados obtidos mostraram um desvio médio de 8,6% em relação as vazões nos trechos das sub-bacias rurais simuladas e as observadas em campo. O SWMM também conseguiu reproduzir o efeito da maré nos trechos sob influência marítima, apresentando uma oscilação completa. Para a descarga fluvial média obteve-se o valor de 2,35 m<sup>3</sup>/s da bacia ao estuário, a vazão média mensal afluente ao maior reservatório da bacia foi de 0,33 m<sup>3</sup>/s. Trabalhos anteriores apresentaram concordância com o estudo em questão. Ademais, a etapa de validação do modelo, resultou em um NSE satisfatório, de 0,57, indicando que este, têm potencial para auxiliar de forma integrada na gestão das águas urbanas, rurais e costeiras.

Com o objetivo de analisar a calibração do modelo chuva-vazão para a bacia urbana do Riacho Fundo I, no Distrito Federal, para fins de validação do uso do SWMM na gestão da drenagem urbana, Costa, Koide e Tsuji (2021) utilizaram um programa chamado PCSWMM, correspondente ao SWMM acoplado a um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Esse programa, dispõe de uma ferramenta denominada SRTC (*Sensitivity-based Radio Tuning Calibration*), que possui um método automático no qual a calibração dos parâmetros é baseada na análise de incertezas. Os parâmetros calibrados foram: área de contribuição das sub-bacias,

armazenamento em depressões permeáveis (*Dstore perv*), coeficiente de Manning para área impermeável (*N Imperv*), largura de escoamento e declividade das sub-bacias, curva número (CN), rugosidade dos canais da rede de drenagem e condutos, cota de fundo e profundidade dos PV's. No estudo, foram utilizados dados de chuva e vazão monitorados em 21 eventos entre 2018 e 2019. O evento que obteve os melhores resultados para as funções objetivos a partir da calibração foi o do dia 12/03/2019, cujo comportamento de geração do escoamento se aproximou mais do real, com: ISE (*Integral Square Error* - integral do erro quadrático) de 4,64, NSE de 0,851, R<sup>2</sup> (coeficiente de determinação) de 0,865, SEE (*Standard Error of Estimate* - erro padrão da estimativa) de 0,466, LSE (*Simple Least Square Regression*) de 17,4 e RMSE (*Root Mean Square Error* - raiz quadrada do erro médio) de 3,28. De 20 eventos validados, 40% apresentaram NSE negativo devido a superestimação da vazão de pico, no entanto, o desempenho do modelo foi classificado como satisfatório, uma vez que a dificuldade de medição de grandes vazões foi considerada.

A partir da modelagem hidrológica e hidráulica com o SWMM, Pessoa; Obraszka e Ohnuma Júnior (2022) avaliaram uma metodologia específica de implantação de microreservatórios (MRs) em lotes urbanos do bairro da Tijuca/RJ. A área de estudo, uma região densamente ocupada, contava com diversos problemas relacionados a drenagem urbana e histórico de enchentes e alagamentos frequentes devido, em parte, à sobrecarga dos sistemas de microdrenagem urbana (SMU) existentes. A metodologia utilizada contou com a seleção das áreas de microdrenagem e avaliação comparativa das condições de operação dos SMUs com e sem a implantação dos MRs. Os resultados apontaram que os MRs simulados sem áreas de contribuição adjacentes foram capazes de atenuar o pico de cheia de 10 anos de recorrência, com redução da vazão de pico média em 37% e de 31% no sistema de drenagem como um todo. Desta forma, concluiu-se que a modelagem proposta propicia a realização de estudos de viabilidade para a implantação de microreservatórios de retenção intralotes, uma vez que estes, têm potencial para a mitigação de cheias de curta duração, que normalmente trazem prejuízos às redes de microdrenagem.

Sampaio Júnior *et al.* (2023) aplicou o modelo SWMM para modelar um anteprojeto de uma rede de drenagem para um loteamento de aproximadamente 36 ha, situado no bairro de Guaratiba/RJ, integrando e comparando os resultados obtidos nesse cenário tradicional a um segundo, onde foram empregadas técnicas de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID), que na modelagem em questão, abrangeu a implementação de pavimentos permeáveis. A bacia que contempla a região de estudo foi discretizada em 144 sub-bacias de contribuição, totalizando 5 redes de drenagem com exutórios no mesmo rio. As simulações foram realizadas para tempos

de recorrência de 10, 20 e 50 anos, em ambos os cenários, designados como TRAD-10, TRAD-20, TRAD-50 no primeiro, e ALT-10, ALT-20 e ALT-50 no cenário alternativo, com pavimentos permeáveis, constituídos de materiais porosos. Devido à heterogeneidade da cobertura das superfícies das sub-bacias, foram escolhidas para a aplicação destes pavimentos, aquelas com no mínimo 50% da área permeável, ou seja, 61 sub-bacias. Em todos os seis modelos foram analisadas as vazões de pico nos nós e os volumes totais escoados. Comparando-se os dois cenários, para os mesmos tempos de retorno, observou-se uma diminuição das vazões de pico em até 34,53% e também dos volumes totais escoados em até 28,73%, confirmando as expectativas acerca da adoção de LIDs, no que concerne a episódios de inundações mais brandos e redução dos picos de descarga.

## 2.8 DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL

Uma forma simplificada e bastante utilizada de representar uma bacia hidrográfica é tratá-la como uma área homogênea, desconsiderando sua variabilidade espacial e as interações entre seus elementos, o que caracteriza os modelos pontuais, assim chamados por reduzirem os elementos espaciais a pontos sem dimensão (Rennó; Soares, 2007). Por outro lado, os modelos hidrológicos distribuídos (MHD) possibilitam representar a variabilidade espacial das características físicas e hidrológicas da bacia por meio da subdivisão desta em unidades menores, as quais podem ser células regulares ou pequenas sub-bacias (Pontes *et al.*, 2015).

Conforme Bueno *et al.* (2017), a maior dificuldade em dividir as bacias hidrográficas em unidades de resposta hidrológica uniforme está em estabelecer critérios para determinar o que caracteriza uma área com comportamento hidrológico homogêneo. O modelo hidrológico distribuído por sub-bacias permite subdividir a bacia com base nos canais de drenagem, considerando a disponibilidade de dados, os pontos de interesse e a variação dos parâmetros físicos da área (Neto, 2005).

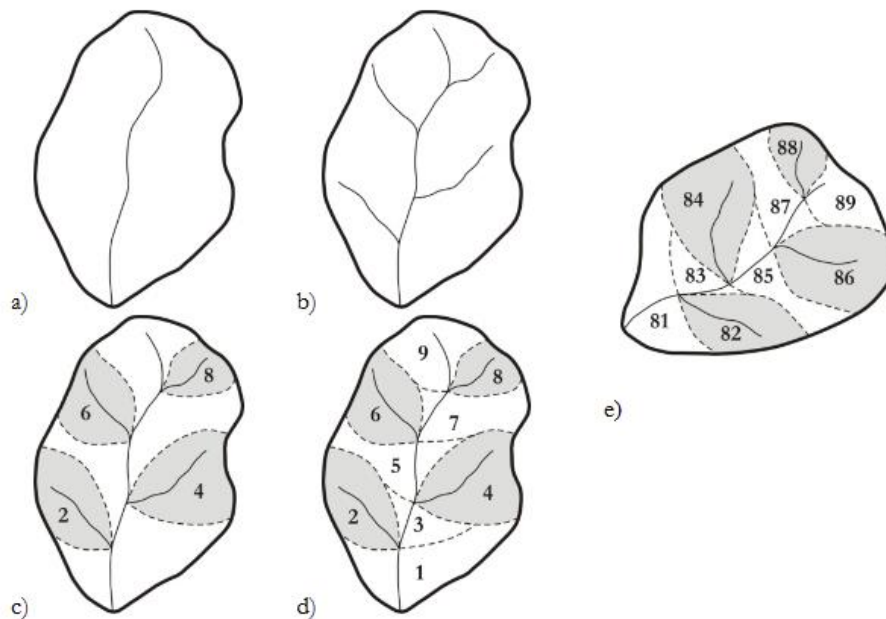
De acordo com Paz *et al.* (2011), existem diversas formas de discretizar uma bacia hidrográfica em um MHD, como por exemplo, pelo método das mini-bacias, em que a área é dividida em pequenas unidades com dimensões compatíveis às de outros métodos, considerando variáveis como a topografia, ainda que essa semelhança entre os elementos possa ser difícil de atingir dependendo do método utilizado. Os mesmos autores ressaltam que há várias maneiras de dividir uma bacia em mini-bacias, sendo as principais:

- Segundo as confluências da rede de drenagem: a rede de drenagem é percorrida de montante para a jusante, identificando-se pontos de confluência, para os quais são

delimitadas as mini-bacias que representam as áreas que contribuem com o escoamento para os trechos localizados a montante dessas junções;

- Pelo método de Otto Pfafstetter (Otto-bacias): a subdivisão é realizada com base na topografia e na topologia da rede de drenagem, atribuindo rótulos numéricos que refletem a posição topológica de cada mini-bacia. Inicialmente, identifica-se o rio principal e seus quatro principais afluentes, e delimitam-se as suas respectivas áreas de drenagem, às quais são atribuídos os números 2, 4, 6, e 8, começando de jusante para montante, e também os números 1, 3, 5, 7 e 9 para as áreas intermediárias (Figura 4). Em seguida, cada sub-bacia é novamente dividida seguindo a mesma lógica, sendo que os novos rótulos correspondem à origem e à nova subdivisão da bacia, respectivamente. O processo é repetido até que se atinja um nível de detalhamento satisfatório;

Figura 4 – Esquema de subdivisão de uma bacia pela metodologia de Otto Pfafstetter



Fonte: Adaptado de Buarque; Paz; Colischonn (2008, p. 3).

Legenda: a) Identificação do rio principal;  
 b) Identificação dos quatro afluentes principais;  
 c) Delimitação das bacias correspondentes aos afluentes principais;  
 d) Delimitação das bacias intermediárias;  
 e) Nível 2 de subdivisão da otto-bacia 8.

- Divisão em elementos de área superficial similar: este método busca subdivisões que resultem em áreas semelhantes. Para isso, o fluxo da água é percorrido de montante para jusante, delimitando uma nova unidade sempre que a área incremental de drenagem ultrapassar um valor mínimo estabelecido. No entanto, a princípio, é necessário verificar se o próximo trecho a jusante também poderá formar uma mini-bacia dentro do intervalo

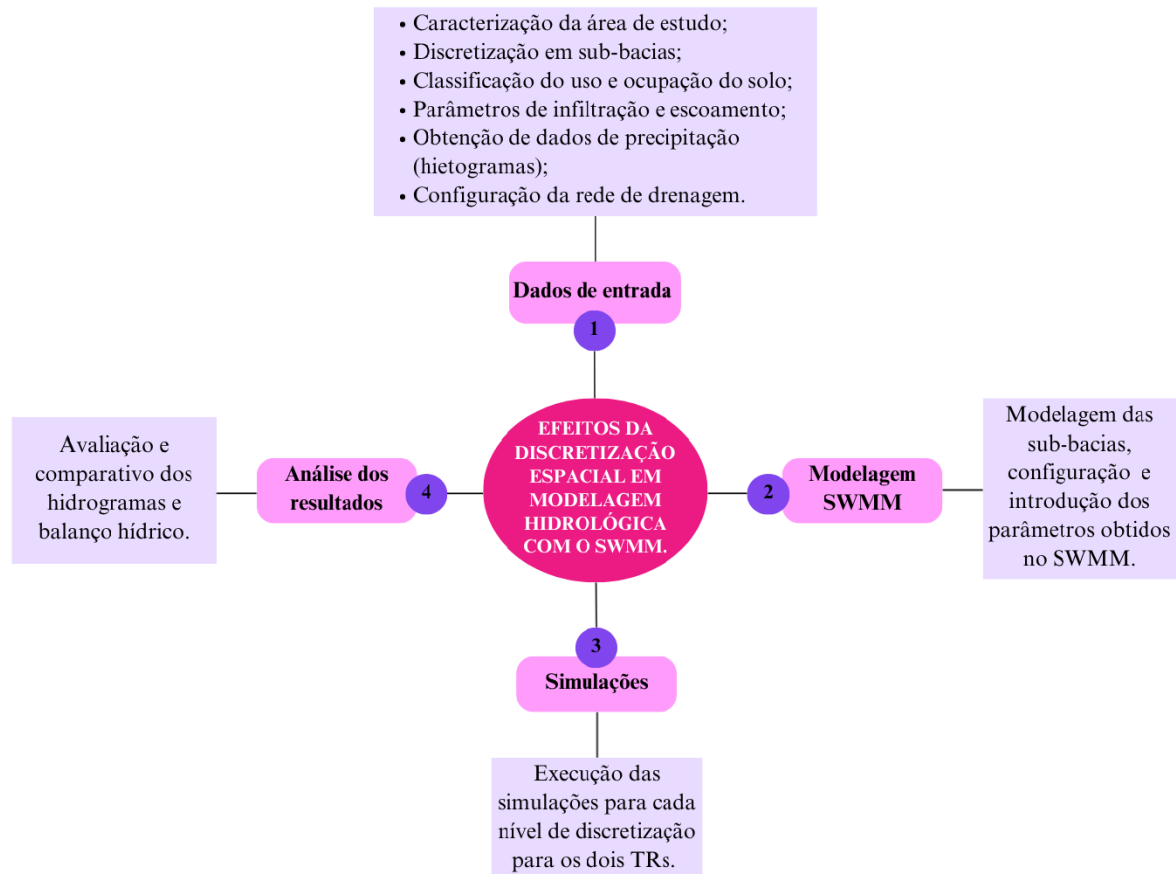
desejado, devendo, em caso contrário, reajustar a delimitação anterior. Esse método é, portanto, um processo iterativo de delimitação.

Silveira Neto *et al.* (2023), avaliaram como diferentes níveis de discretização espacial em microbacias afetam o cálculo das vazões máximas utilizando o modelo chuva-vazão do NRCS, observando que, embora discretizações mais detalhadas tendam a diminuir os picos de vazão, essa relação não é contínua, já que, em alguns casos, níveis de discretização intermediários resultaram em vazões maiores que na bacia não discretizada. Por outro lado, Eid *et al.* (2003), observaram que a variação dos níveis de discretização não produziu diferenças significativas nos resultados do modelo HEC-HMS, mas à medida em que o número de sub-bacias foi reduzido, notou-se uma leve tendência de diminuição da vazão de pico e atraso no momento da descarga máxima.

### 3 METODOLOGIA

Na Figura 5, é apresentado um fluxograma simplificado das etapas adotadas para a realização deste estudo. Nos tópicos a seguir estas etapas serão descritas detalhadamente.

Figura 5 – Fluxograma simplificado da metodologia adotada



Fonte: Autora (2025).

#### 3.1 DADOS DE ENTRADA DO MODELO

##### 3.1.1 Caracterização da área de estudo

A cidade sul-mineira de Poços de Caldas situa-se entre as coordenadas geográficas 46° 33' 45" oeste e 21° 47' 18" sul, e encontra-se a uma altitude de 1200 m. Localizada na divisa dos estados de Minas Gerais e São Paulo, a cidade conta com uma área territorial de 546,96 km<sup>2</sup> e densidade demográfica de 299,37 hab/km<sup>2</sup>, de acordo com o censo do IBGE (2022).

Segundo a classificação climática de Köppen (1948), o clima da região é categorizado como Cwb, que é caracterizado como temperado úmido. Ele apresenta invernos mais secos e

verões suaves, mostrando variações significativas de temperatura, que oscilam entre 18 e -3°C, podendo chegar a ultrapassar os 22°C.

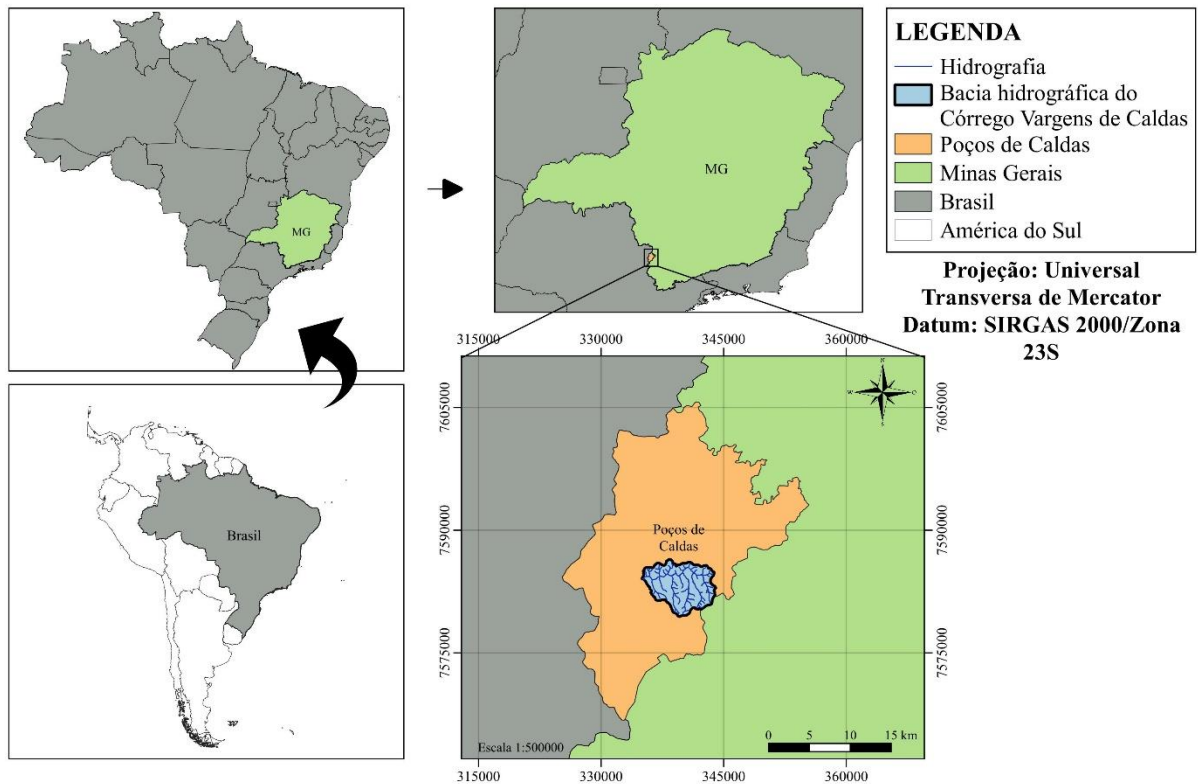
O maciço alcalino de Poços de Caldas tem um perfil geológico com predominância de rochas plutônicas do tipo foiaitos e rochas efusivas, como os tinguaitos (Tinós, 2011). Outras formações litológicas como sienitos de granulação média, fonolitos, rochas piroclásticas, lujaurito e chibinito também podem ser encontradas no maciço (Moraes; Jiménez-Rueda, 2008). No contexto pedológico, as classes mais abundantes de solo presentes são argissolo vermelho e amarelo, latossolo vermelho, cambissolo, neossolos e gleissolo (Sardinha *et al.*, 2016).

A formação vegetal do município é marcada por contrastes entre floresta estacional semidecidual, floresta ombrófila mista e campo cerrado (Sardinha *et al.*, 2016). A paisagem composta por planaltos intercalados por serras, formando uma estrutura anelar caracterizada por terrenos acidentados e repletos de vertentes conferem à região, inserida na Província Mantiqueira, características singulares de relevo (Doranti-Tiritan *et al.*, 2014; Souza *et al.*, 2014).

O desenvolvimento urbano em Poços de Caldas se dá principalmente de jusante para montante ao longo dos rios que atravessam a cidade, padrão este, fortemente influenciado pela geomorfologia local em regiões com propensão de ocupação em direção às serras, o que leva a ampliação das superfícies impermeabilizadas, prejudicando a infiltração da água das chuvas, que é convertida em escoamento superficial e intensificando o risco de deslizamentos de terra nas áreas com vegetação suprimida, resultando em enchentes nas áreas de várzea (Sardinha *et al.*, 2016).

Inserida no planalto de Poços de Caldas, a bacia hidrográfica do Córrego Vargens de Caldas, representada pela Figura 6, drena uma área de 41,37 km<sup>2</sup> e apresenta um perímetro de 29,66 km. Seu curso d'água principal, o Córrego Vargens de Caldas, integra um sistema de drenagem hierárquico, no qual suas águas escoam para o Ribeirão das Antas, que, por sua vez, contribui para o Rio Pardo – afluente do Rio Grande, um dos principais rios da região sudeste do país. Na área, coexistem diferentes tipos de uso e ocupação do solo, incluindo bairros residenciais, áreas agrícolas, campos abertos e zonas industriais em processo de expansão.

Figura 6 – Localização da área de estudo



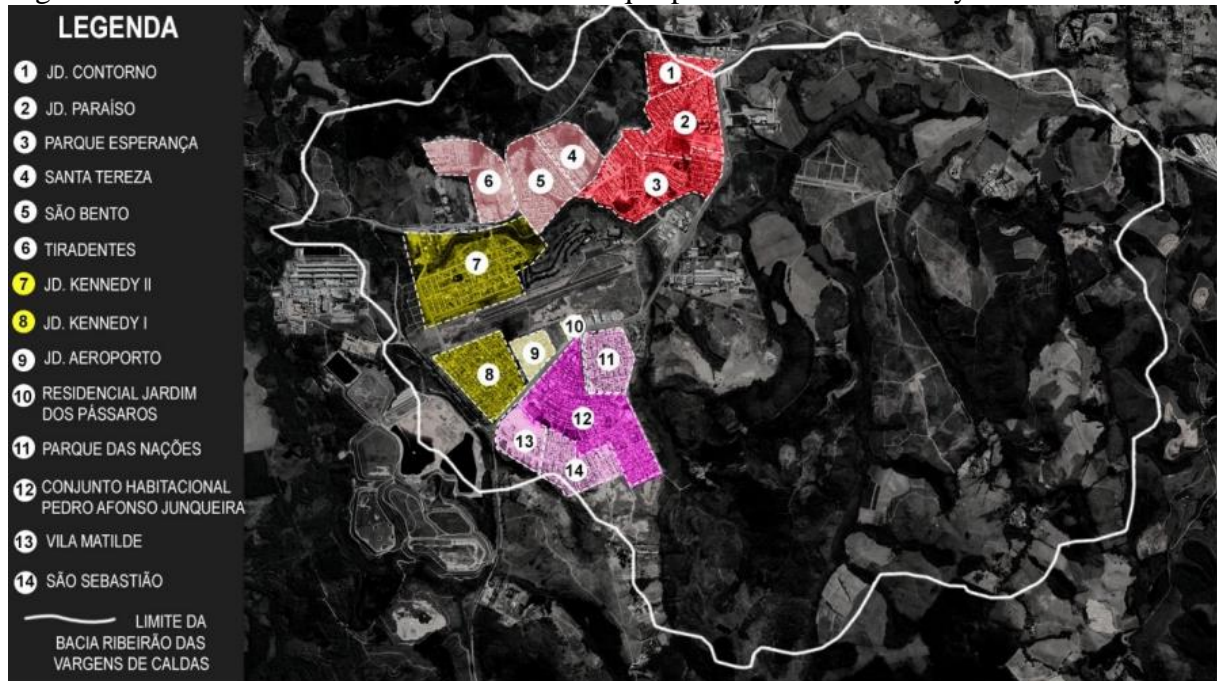
Fonte: Autora (2025).

Do ponto de vista socioambiental, a região onde se insere a bacia apresenta elevada vulnerabilidade social, concentrando grande parte da população menos favorecida do município. Segundo Francisco (2024), isso se deve, em grande parte, à implantação de conjuntos habitacionais voltados a famílias de baixa renda e ao baixo custo do solo, que atraiu também outras famílias de perfil semelhante, ampliando a ocupação popular da área. Ainda segundo a autora, fatores como a distância ao centro, proximidade com atividades mineradoras e as características naturais da bacia, como áreas sujeitas a alagamentos, corroboram para o desinteresse do mercado imobiliário e, conseqüentemente, para a permanência dessa população no local.

Situado na parte mais baixa da bacia, o bairro Jardim Kennedy II (Figura 7), apresenta, com frequência, impactos mais evidentes, com ocorrência de alagamentos, risco de remoções e precariedade no sistema de abastecimento de água (Francisco, 2024). De acordo com um estudo realizado por Amaral *et al.* (2023), onde foram levantados os 20 bairros da cidade com maior número de desastres registrados nos últimos 50 anos, o Jardim Kennedy II, localizado na planície de inundação do Córrego Vargens de Caldas, ocupava a segunda posição, com ocorrências relacionadas sobretudo, às chuvas torrenciais. Chuvas estas, cujos volumes

excedem a capacidade do leito do córrego, provocam seu transbordamento e geram diversos transtornos à população local (Poços de Caldas, 2022).

Figura 7 – Bairros inseridos na bacia com destaque para o Jardim Kennedy II



Fonte: Francisco (2016, p. 37).

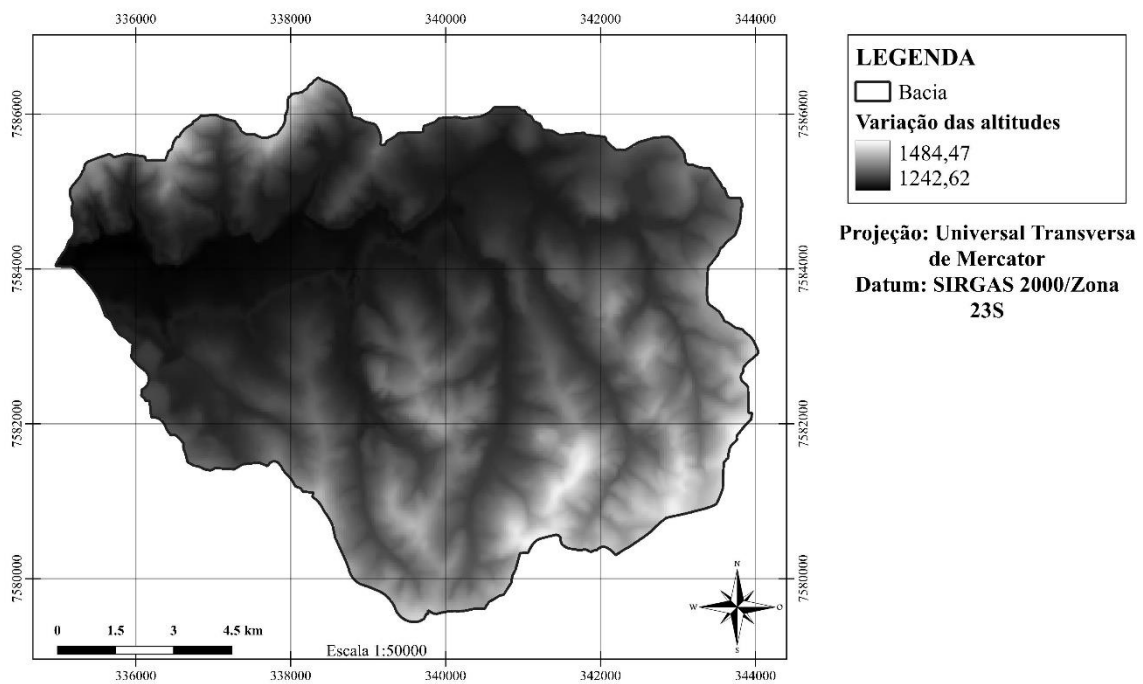
Um evento marcante ocorreu no ano de 2016, quando uma forte chuva, com volume registrado acima da média mensal esperada para a região, concentrado em um período de cerca de duas horas, causou o transbordamento de alguns canais da cidade, incluindo o Córrego Vargens de Caldas, deixando vários moradores das proximidades desalojados e diversas residências alagadas (Vale, 2016). Como medida para evitar novas ocorrências, em 2022, a Prefeitura promoveu a desapropriação consensual de dois terrenos próximos ao córrego, recorrentemente atingidos por inundações (Poços de Caldas, 2022).

Nesse contexto, a caracterização morfométrica da bacia se mostra essencial para compreender seu comportamento hidrológico frente a eventos extremos, subsidiando diagnósticos mais precisos e o uso de modelos de simulação. Parâmetros como área de drenagem, perímetro, declividade, densidade de drenagem e coeficientes de forma influenciam diretamente o escoamento superficial, sendo indispensáveis para a utilização de modelos como o SWMM.

No presente estudo, essas informações, que são a base para a modelagem hidrológica, foram obtidas através de técnicas de geoprocessamento, utilizando um Modelo Digital de Terreno (MDT) e cálculos de índices morfométricos.

O MDT, como mostrado na Figura 8, foi gerado a partir da interpolação de curvas de nível, o que permitiu a construção de uma superfície contínua que representa a topografia da área de estudo. As curvas de nível e a rede hidrográfica foram extraídas de cartas disponíveis em um banco de dados cartográfico municipal, mantido pela Prefeitura de Poços de Caldas, sendo posteriormente processadas em ambiente SIG (QGIS).

Figura 8 – Modelo Digital de Terreno

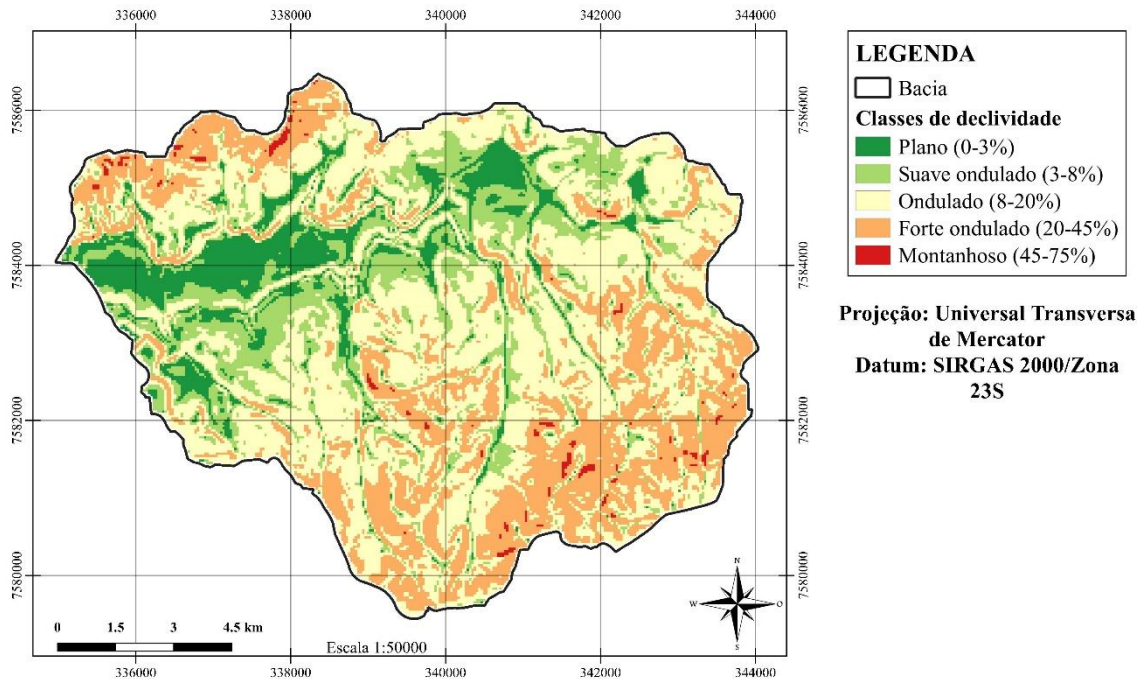


Fonte: Autora (2025).

Com base no Modelo Digital do Terreno, foi criado o mapa de declividade da bacia, utilizando ferramentas de análise do terreno disponíveis no Qgis. Essa informação é de grande importância em estudos hidrológicos, uma vez que a declividade influencia diretamente o escoamento superficial, a velocidade da água e o tempo de concentração da bacia, além de auxiliar na identificação de áreas suscetíveis à erosão.

A classificação das declividades do terreno (Figura 9) foi realizada conforme o estabelecido pela Embrapa (2025).

Figura 9 – Classes de declividade da bacia hidrográfica do Córrego Vargens de Caldas



Fonte: Autora (2025).

A partir dos dados obtidos, foram determinados parâmetros geométricos, de relevo e de hidrografia, fundamentais para a caracterização morfométrica da bacia (Tabela 1).

Tabela 1 – Parâmetros morfométricos da bacia hidrográfica do Córrego Vargens de Caldas

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>	<b>Unidades</b>
<b><i>Geometria</i></b>		
Área de drenagem (A)	41,37	km <sup>2</sup>
Perímetro (P)	29,66	km
Largura média ( $\bar{L}$ )	4,71	km
Coefficiente de compacidade (Kc)	1,30	..
Fator de forma (Kf)	0,54	..
<b><i>Relevo</i></b>		
Altitude mínima	1242,62	m
Altitude média	1316,17	m
Altitude máxima	1484,47	m
Diferença altimétrica	241,85	m
Declividade mínima	0,00	%
Declividade média	14,82	%
Declividade máxima	64,66	%
<b><i>Hidrografia</i></b>		
Comprimento do canal principal (L)	13,34	km
Comprimento total de drenagem (Lt)	67,86	km
Densidade de drenagem (Dd)	1,64	km.km <sup>-2</sup>

Fonte: Autora (2025).

### 3.1.2 Discretização em sub-bacias

Considerando que a bacia em estudo abrange uma área extensa e apresenta grande diversidade em termos de uso e ocupação do solo, características físicas e vegetação, tornou-se necessário subdividi-la em unidades menores. Essa abordagem possibilita representar com mais fidelidade a variabilidade espacial da área, contribuindo para simulações hidrológicas mais precisas e compatíveis com a complexidade do território, além de favorecer a compreensão da dinâmica do escoamento superficial.

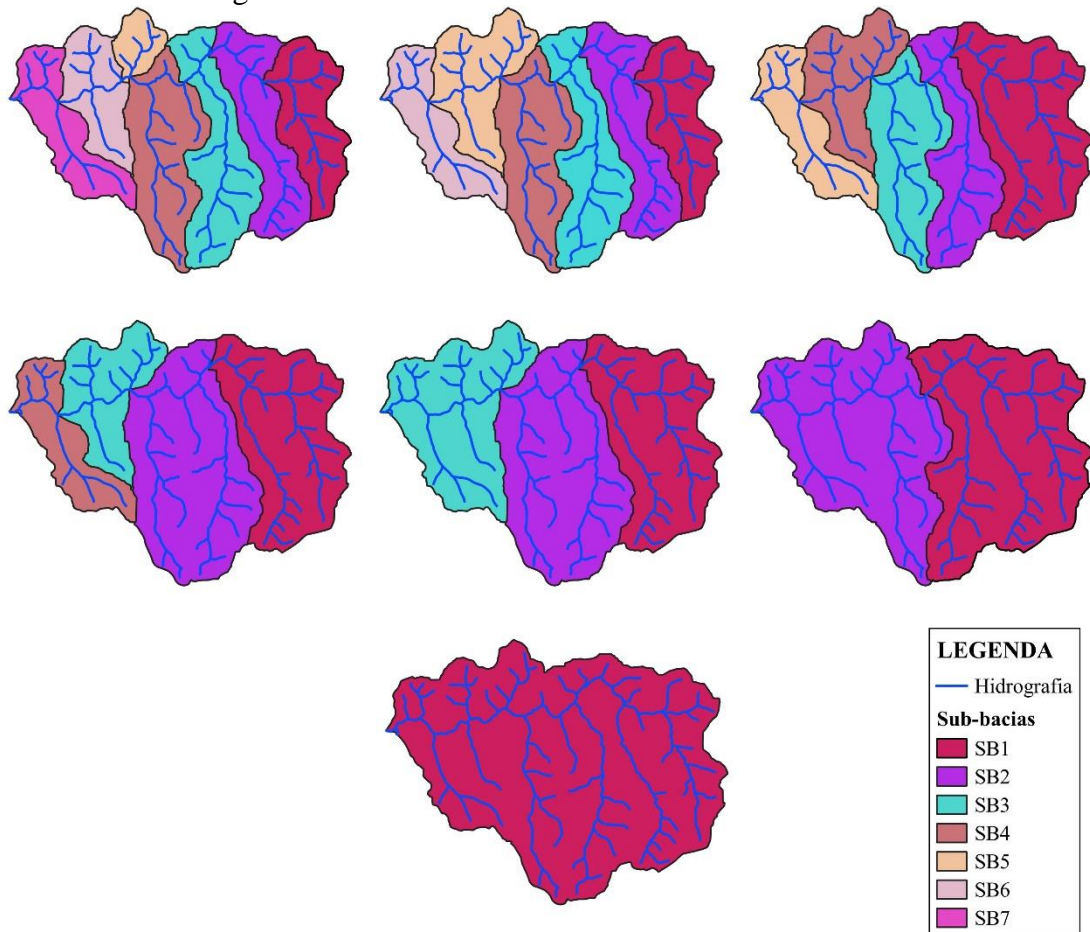
Foram analisados sete diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica, variando desde sua representação como uma única unidade até a divisão em 2, 3, 4, 5, 6 e 7 sub-bacias. Nas subdivisões, foram considerados dois critérios principais: os pontos de confluência da rede de drenagem (nós) e a obtenção de áreas com características semelhantes, como o uso do solo e cobertura vegetal.

Para a realização das discretizações iniciais, utilizou-se um arquivo no formato shapefile correspondente à bacia hidrográfica do Rio Grande, organizado segundo a hierarquização dos níveis de Otto, que permite subdividir grandes bacias em unidades menores denominadas ottobacias. Esse arquivo foi obtido no portal da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), por meio do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH).

O shapefile foi importado no software Qgis, onde as ottobacias foram agrupadas por meio de operações de junção para formar as sete sub-bacias que compõem o maior nível de discretização, de acordo com os critérios previamente definidos. A partir dessas sub-bacias iniciais, os níveis inferiores foram construídos por meio da combinação entre as sub-bacias, conforme ilustrado na Figura 10.

Cada novo nível corresponde a uma combinação diferente entre as sub-bacias.

Figura 10 – Representação dos sete níveis de discretização espacial da bacia hidrográfica



Fonte: Autora (2025).

Após a organização de todos os níveis de discretização, foi possível obter os principais parâmetros morfométricos necessários para a modelagem hidrológica, tais como área, largura média e declividade média de cada sub-bacia, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros morfométricos das sub-bacias

(continua)

Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Largura média (km)	Declividade (%)
<i>1 Sub-Bacia</i>			
SB1	41,37	4,71	14,82
<i>2 Sub-Bacias</i>			
SB1	21,21	5,52	16,46
SB2	20,16	4,04	13,10
<i>3 Sub-bacias</i>			
SB1	13,27	2,32	16,54
SB2	16,21	2,51	15,18
SB3	11,90	3,51	12,40
<i>4 Sub-bacias</i>			
SB1	13,27	2,32	16,54

Tabela 2 – Parâmetros morfométricos das sub-bacias

(conclusão)			
<b>Sub-bacia</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Largura média (km)</b>	<b>Declividade (%)</b>
SB2	16,21	2,51	15,18
SB3	6,52	2,46	12,88
SB4	5,38	1,51	11,78
<i>5 Sub-bacias</i>			
SB1	13,27	2,32	16,54
SB2	7,94	1,28	16,33
SB3	8,26	1,39	14,08
SB4	6,52	2,46	12,88
SB5	5,38	1,52	11,78
<i>6 Sub-bacias</i>			
SB1	6,18	1,33	18,05
SB2	7,09	1,26	15,25
SB3	7,94	1,28	16,33
SB4	8,26	1,39	14,08
SB5	6,52	2,46	12,88
SB6	5,38	1,52	11,78
<i>7 Sub-bacias</i>			
SB1	6,18	1,33	18,05
SB2	7,09	1,26	15,25
SB3	7,94	1,28	16,33
SB4	8,26	1,39	14,08
SB5	1,77	0,89	17,88
SB6	4,75	1,24	11,08
SB7	5,38	1,52	11,78

Fonte: Autora (2025).

### 3.1.3 Classificação do uso e ocupação do solo

Para a elaboração do mapa de uso e ocupação da bacia, foram utilizadas imagens do satélite CBERS 4A (*China-Brazil Earth Resources Satellite*), referentes ao mês de junho de 2023, disponibilizadas pela plataforma do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). As imagens foram processadas no Qgis, utilizando a composição colorida RGB 321, que corresponde às bandas do espectro visível (vermelho, verde e azul), facilitando a identificação visual das diferentes classes de cobertura do solo.

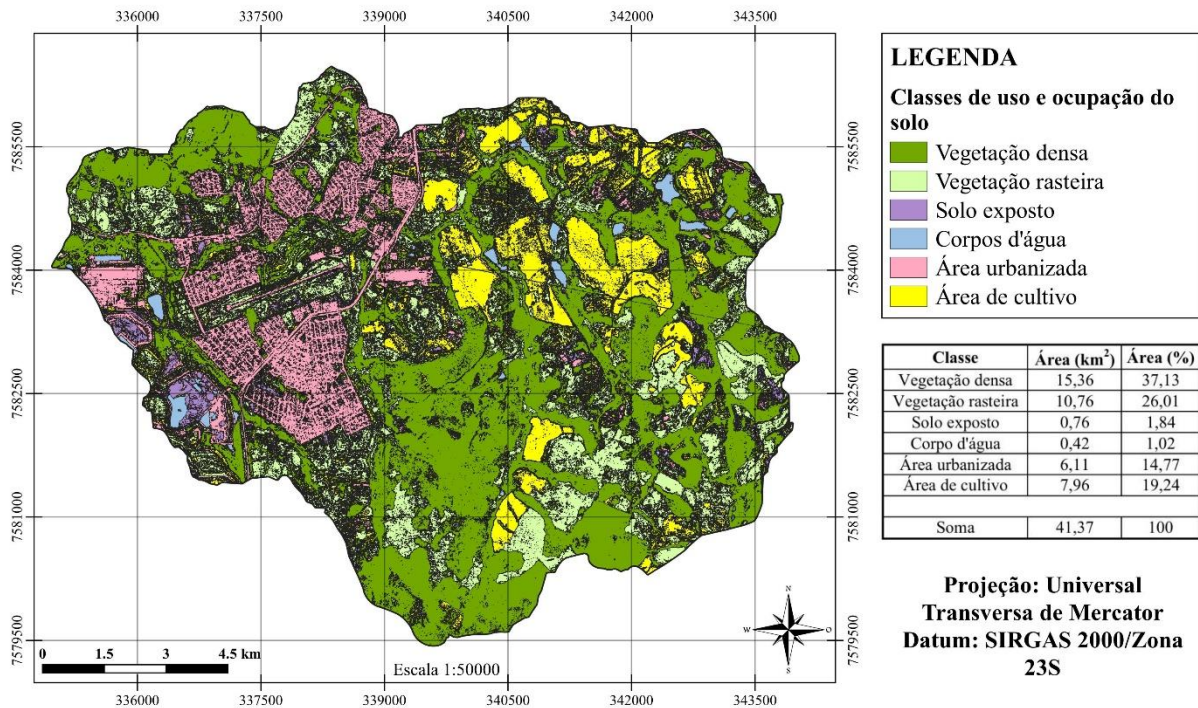
A fim de melhorar o nível de detalhamento da imagem, foi empregada a técnica de *pansharpening*, que consiste na fusão entre a imagem multiespectral com a banda pancromática do satélite, resultando em uma resolução espacial final de 2 metros. Esse aprimoramento proporcionou maior nitidez na identificação das feições da paisagem.

A partir da imagem processada, foi possível realizar a classificação do uso e ocupação do solo por meio do complemento DZetsaka, disponível no Qgis. Esse complemento utiliza algoritmos de aprendizado de máquina para a classificação supervisionada de imagens multiespectrais.

Neste estudo, o algoritmo adotado foi o K-Nearest Neighbors (KNN), que classifica os pixels com base na similaridade entre as amostras previamente selecionadas. Para isso, foram realizadas coletas de diversas amostras representativas para cada classe de uso e ocupação, como vegetação, áreas de cultivo, área urbana, corpos d'água e solo exposto.

Com base nessas amostras, o algoritmo realizou a classificação de todos os pixels da imagem, gerando o mapa temático do uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica (Figura 11).

Figura 11 – Mapa de uso e ocupação do solo da bacia não discretizada



Fonte: Autora (2025).

O mapa classificado, inicialmente gerado no formato raster, foi recortado para as sete sub-bacias do maior nível de discretização previamente delimitadas, de modo a isolar as áreas correspondentes a cada subdivisão da bacia e permitir a análise individualizada de cada unidade.

Para possibilitar a quantificação das áreas correspondentes a cada classe, o raster recortado de cada sub-bacia foi convertido em camada vetorial, o que permitiu a extração dos valores de área ocupada por cada tipo de uso e cobertura do solo. Considerando que os demais

níveis são composições dessas sub-bacias, os valores das áreas foram calculados com base nas informações obtidas dessas sete sub-bacias.

Para o cálculo das áreas permeáveis e impermeáveis, considerou-se como impermeáveis as áreas urbanas e os corpos d'água, enquanto as classes de vegetação, áreas de cultivo e solo exposto foram classificadas como permeáveis. Na Tabela 3, é apresentado um resumo das áreas permeáveis e impermeáveis, discriminadas por sub-bacia nos respectivos níveis.

Tabela 3 – Quantitativo de áreas por sub-bacia  
(continua)

Sub-bacia	Área Permeável		Área impermeável	
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
<i>1 Sub-Bacia</i>				
SB1	34,84	84,22	6,53	15,78
<i>2 Sub-Bacias</i>				
SB1	20,10	94,77	1,11	5,23
SB2	14,73	73,09	5,42	26,91
<i>3 Sub-bacias</i>				
SB1	12,47	94,01	0,79	5,99
SB2	14,42	88,96	1,79	11,04
SB3	7,95	66,79	3,95	33,21
<i>4 Sub-bacias</i>				
SB1	12,47	94,01	0,79	5,99
SB2	14,42	88,96	1,79	11,04
SB3	3,94	60,39	2,58	39,61
SB4	4,01	74,54	1,37	25,46
<i>5 Sub-bacias</i>				
SB1	12,47	94,01	0,79	5,99
SB2	7,63	96,02	0,32	3,98
SB3	6,79	82,17	1,47	17,83
SB4	3,94	60,39	2,58	39,61
SB5	4,01	74,54	1,37	25,46
<i>6 Sub-bacias</i>				
SB1	5,77	93,51	0,40	6,49
SB2	6,70	94,46	0,39	5,54
SB3	7,63	96,02	0,32	3,98
SB4	6,79	82,17	1,47	17,83
SB5	3,94	60,39	2,58	39,61
SB6	4,01	74,54	1,37	25,46
<i>7 Sub-bacias</i>				
SB1	5,77	93,51	0,40	6,49
SB2	6,70	94,46	0,39	5,54
SB3	7,63	96,02	0,32	3,98
SB4	6,79	82,17	1,47	17,83
SB5	1,14	64,02	0,64	35,87

Tabela 3 – Quantitativo de áreas por sub-bacia  
(conclusão)

Sub-bacia	Área		Área	
	Permeável		impermeável	
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
SB6	2,80	59,03	1,94	40,93
SB7	4,01	74,54	1,37	25,46

Fonte: Autora (2025).

### 3.1.4 Parâmetros de infiltração e escoamento

Para o cálculo da infiltração, foi adotado o modelo do *Soil Conservation Service* (SCS-CN). Como dado de entrada, definiu-se o parâmetro *Curve Number* (CN), que representa a capacidade de infiltração do solo, obtido por meio do cruzamento de informações referentes à condição de umidade antecedente, ao uso e cobertura do solo a ao grupo hidrológico associado a cada tipo de solo.

Adotou-se a classe II de umidade antecedente (condição média), que representa um valor intermediário entre as condições seca (classe I) e saturada (classe III), conforme mostrado na Tabela 4, sendo comumente utilizada em estudos hidrológicos quando não há informações específicas disponíveis.

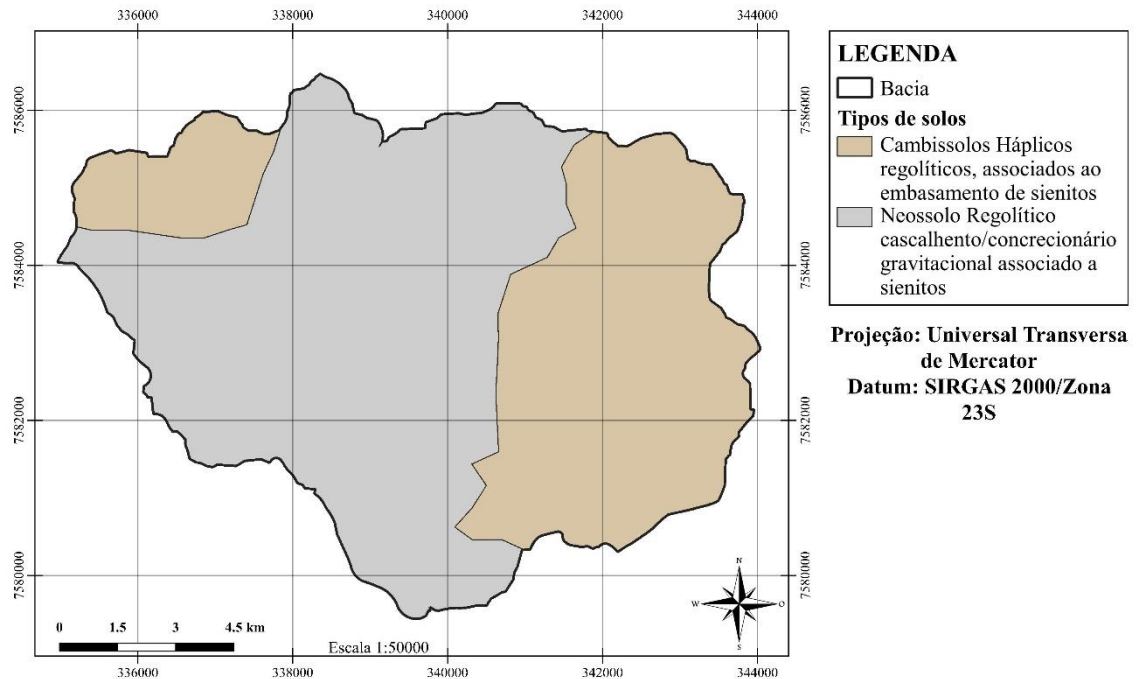
Tabela 4 – Condições de umidade antecedente

AMCI	Situação em que os solos estão secos, mas não no ponto de emurchecimento. A consideração deste caso é pouco recomendável para estudos de vazões de cheias.
AMCII	Situação média em que a umidade do solo deve corresponder à capacidade de campo. Esta situação corresponde provavelmente às condições de umidade antecedente de cheias de pequenas dimensões.
AMCIII	Situação em que ocorrem precipitações consideráveis nos cinco dias anteriores e o solo encontra-se quase saturado. Esta é a situação mais propícia à formação de maiores cheias e, portanto, aquela que tem maior importância para o projeto.

Fonte: Adaptado de Baungarten; Felix; Müller (2003, p. 6).

De acordo com o mapa pedológico apresentado na Figura 12, foram identificados dois tipos de solo na bacia: Cambissolos e Neossolos, sendo este último o de maior predominância.

Figura 12 – Mapa pedológico da área de estudo



Fonte: Autora (2025).

Com base na classificação proposta por Sartori, Neto e Genovez (2005), os Cambissolos com as características apresentadas no mapa possuem textura média, drenagem moderada e baixa taxa de infiltração, enquanto os Neossolos constituem um grupo de solos pouco profundos, cujo contato litólico confere elevado potencial para o escoamento superficial, podendo, dessa forma, ser enquadrados nas classes hidrológicas C e D, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Classes hidrológicas dos solos

(continua)

Grupo	Significado	Condutividade Hidráulica Saturada (pol/h)
A	Escoamento superficial potencialmente baixo. Solos com uma taxa de infiltração alta, mesmo quando completamente saturados e principalmente profundos; areia drenada excessivamente ou cascalhos	$\geq 0,45$
B	Solos com uma taxa de infiltração moderada, quando completamente saturado e, principalmente, com profundidade moderada a profundo; solos moderadamente drenados a bem drenados; solos com textura moderadamente fina a moderadamente grosseira. Por exemplo, solo lemo-arenoso.	0,30 – 0,15

Tabela 5 – Classes hidrológicas dos solos

		(conclusão)
<b>Grupo</b>	<b>Significado</b>	<b>Condutividade Hidráulica Saturada (pol/h)</b>
C	Solos com taxa de infiltração lenta quando completamente saturados e consistindo, principalmente, de solos com uma camada que impede o movimento descendente da água ou solos com uma textura moderadamente fina a textura fina. Por exemplo, solo lemo argiloso, argilo arenoso com profundidade rasa.	0,15 – 0,05
D	Potencial de escoamento superficial alto. Solos com taxa de infiltração muito lenta, quando completamente saturados e consistindo, principalmente, de solos argilosos com um alto potencial de expansão; solos com um lençol freático permanente alto; solos com camada de argila na, ou próxima à superfície, e solos rasos sobre material quase impermeável.	0,05 – 0,00

Fonte: LENHS (2012, p. 168).

Com base nessas informações, foram selecionados, a partir do manual do SWMM, os valores de CN correspondentes a cada tipo de uso e ocupação do solo identificado na área de estudo. Em seguida, para cada sub-bacia, calculou-se o CN médio ponderado, considerando os valores de CN associados a cada classe e suas respectivas áreas dentro da sub-bacia, tal como mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores de CN  
por sub-bacia  
(continua)

<b>Sub-bacia</b>	<b>CN</b>
<i>1 Sub-Bacia</i>	
SB1	75
<i>2 Sub-bacias</i>	
SB1	74
SB2	77
<i>3 Sub-bacias</i>	
SB1	74
SB2	75
SB3	78
<i>4 Sub-bacias</i>	
SB1	74
SB2	75
SB3	79
SB4	77

Tabela 6 – Valores de CN  
por sub-bacia

(conclusão)

<b>Sub-bacia</b>	<b>CN</b>
<i>5 Sub-bacias</i>	
SB1	74
SB2	74
SB3	75
SB4	79
SB5	77
<i>6 Sub-bacias</i>	
SB1	74
SB2	74
SB3	74
SB4	75
SB5	79
SB6	77
<i>7 Sub-bacias</i>	
SB1	74
SB2	74
SB3	74
SB4	75
SB5	77
SB6	80
SB7	77

Fonte: Autora (2025).

Os valores de profundidade de armazenamento em depressões foram definidos com base nos intervalos indicados no manual do SWMM para diferentes tipos de superfície, conforme apresentado na Tabela 7, diferenciando-se entre áreas impermeáveis ( $S_{\text{imperv}}$ ) e os distintos tipos de cobertura vegetal presentes nas áreas permeáveis ( $S_{\text{perv}}$ ).

Tabela 7 – Valores de armazenamento em depressões

<b>Superfície</b>	<b>Armazenamento em depressões (mm)</b>
Permeável	5,08
Impermeável	2,54

Fonte: Autora (2025)

Os coeficientes de rugosidade de Manning para as parcelas permeável e impermeável ( $n_{\text{perv}}$  e  $n_{\text{imperv}}$ ) das sub-bacias foram atribuídos de acordo com o mesmo manual, em função do tipo de cobertura do solo. Para cada classe de uso e ocupação, foi associado um valor

específico de rugosidade, e o coeficiente representativo de cada sub-bacia foi determinado por meio da média ponderada, considerando a proporção da área correspondente a cada superfície, conforme metodologia adotada para o cálculo do CN. Os valores resultantes constam na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores de coeficiente de rugosidade por sub-bacia

<b>Sub-bacia</b>	<b>n_perv</b>	<b>n_imperv</b>
<i>1 Sub-Bacia</i>		
SB1	0,5	0,014
<i>2 Sub-bacias</i>		
SB1	0,5	0,012
SB2	0,5	0,014
<i>3 Sub-bacias</i>		
SB1	0,5	0,011
SB2	0,5	0,015
SB3	0,5	0,014
<i>4 Sub-bacias</i>		
SB1	0,5	0,011
SB2	0,5	0,015
SB3	0,5	0,015
SB4	0,4	0,013
<i>5 Sub-bacias</i>		
SB1	0,5	0,011
SB2	0,5	0,013
SB3	0,5	0,015
SB4	0,5	0,015
SB5	0,4	0,013
<i>6 Sub-bacias</i>		
SB1	0,5	0,010
SB2	0,5	0,012
SB3	0,5	0,013
SB4	0,5	0,015
SB5	0,5	0,015
SB6	0,4	0,013
<i>7 Sub-bacias</i>		
SB1	0,5	0,010
SB2	0,4	0,012
SB3	0,5	0,013
SB4	0,5	0,015
SB5	0,4	0,015
SB6	0,5	0,015
SB7	0,4	0,013

Fonte: Autora (2025).

### 3.1.5 Obtenção de dados de precipitação e vazão

Devido à ausência de dados observacionais de precipitação na área de estudo, em razão da inexistência de estações pluviométricas na bacia até o momento da realização deste trabalho, as informações necessárias foram obtidas por meio de métodos teóricos amplamente reconhecidos na literatura.

Para a determinação da chuva de projeto, adotou-se a equação Intensidade-Duração-Frequência - IDF (Equação 1), com parâmetros específicos para a região de Poços de Caldas, extraídos do software Plúvio 2.1, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos (GPRH), da UFV. Foram considerados dois tempos de retorno (TR) da chuva: 25 e 50 anos.

$$i = \frac{k \cdot Tr^a}{(t + b)^c} \quad (1)$$

Em que:

$i$  é a intensidade de precipitação (mm/h);

$k$ ,  $a$ ,  $b$  e  $c$  são parâmetros ajustados para cada região;

$Tr$  corresponde ao tempo de retorno em anos;

$t$  é o tempo de duração da chuva (min.).

A fim de determinar o valor de  $t$  foram utilizadas as equações de tempo de concentração listadas abaixo, observando aos critérios definidos pela literatura. As equações de Desbordes (Equação 2) e Corps of Engineers (Equação 3) são aplicadas para bacias com áreas de até 51 e 1200 km<sup>2</sup>, respectivamente. Embora as equações de Ven te Chow (Equação 4) e Kirpich (Equação 5) sejam recomendadas para uma faixa de áreas muito inferiores, Silveira (2005) obteve em seus estudos um bom desempenho destas para bacias rurais de grande porte, com áreas de até 11000 km<sup>2</sup>, aproximadamente.

$$tc = 0,0869A^{0,3039} \cdot S^{-0,3832} \cdot Aimp^{-0,4523} \quad (2)$$

$$tc = 0,191L^{0,76} \cdot S^{-0,19} \quad (3)$$

$$tc = 0,160L^{0,64} \cdot S^{-0,32} \quad (4)$$

$$tc = 0,0663L^{0,77} \cdot S^{-0,385} \quad (5)$$

Em que:

$tc$  é o tempo de concentração (minutos);

$A$  é a área de drenagem (km<sup>2</sup>);

$A_{imp}$  é a fração da área impermeável (%);

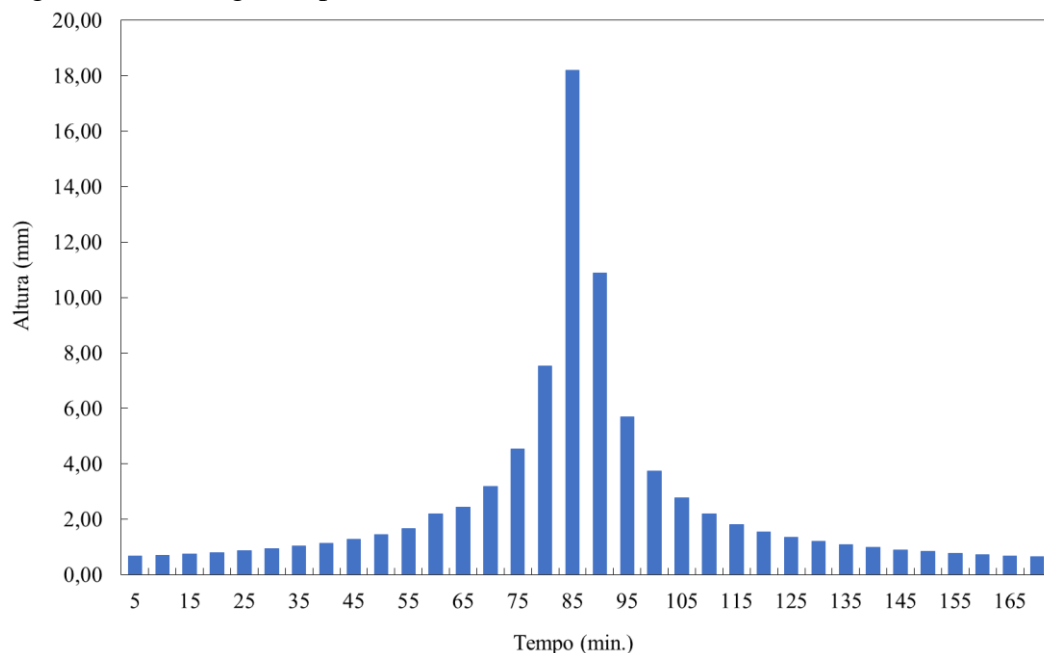
$L$  corresponde ao comprimento do rio principal ou talvegue (km);

$S$  é a declividade (m/m).

A partir dos resultados obtidos pelas equações, foi adotado um tempo de concentração médio. Em seguida, procedeu-se à aplicação do Método dos Blocos Alternados para a distribuição temporal da precipitação, dividindo-se os totais pluviométricos calculados por meio da Equação 1 em blocos de 5 minutos. Essa abordagem permitiu a construção dos hietogramas correspondentes aos TRs adotados (Figuras 13 e 14), os quais foram utilizados como dados de entrada no SWMM para realizar as simulações para o exutório da bacia e o balanço hídrico.

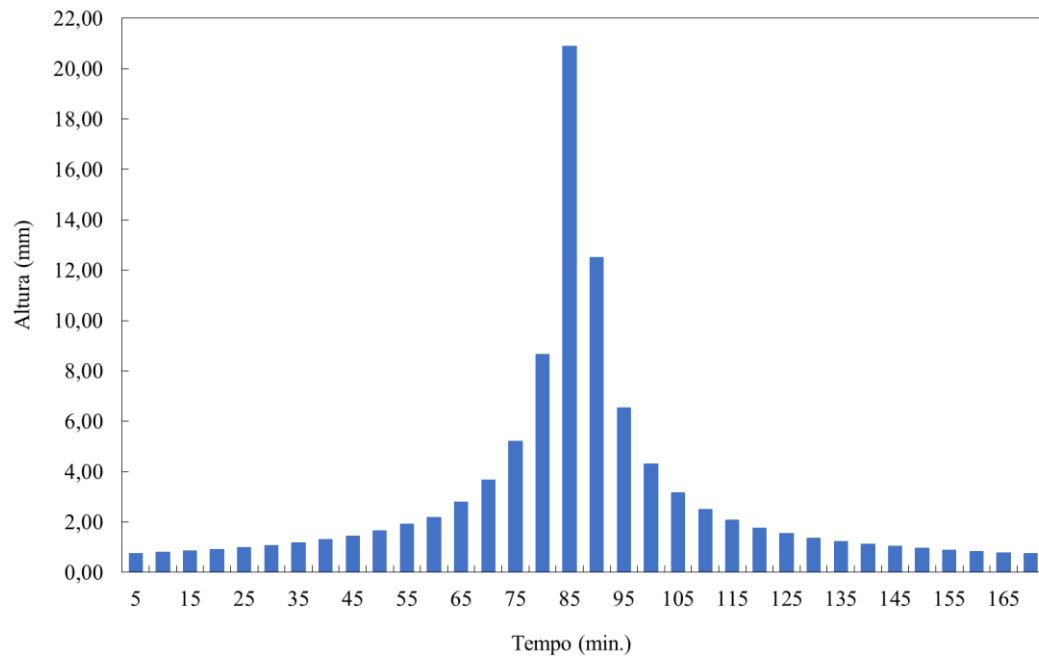
Para as simulações nos nós intermediários, empregaram-se como entrada de precipitação hietogramas correspondentes à área de contribuição a montante de cada nó, considerando o tempo de retorno de 25 anos e seguindo o mesmo procedimento descrito anteriormente.

Figura 13 – Hietograma para TR de 25 anos



Fonte: Autora (2025).

Figura 14 – Hietograma para TR de 50 anos

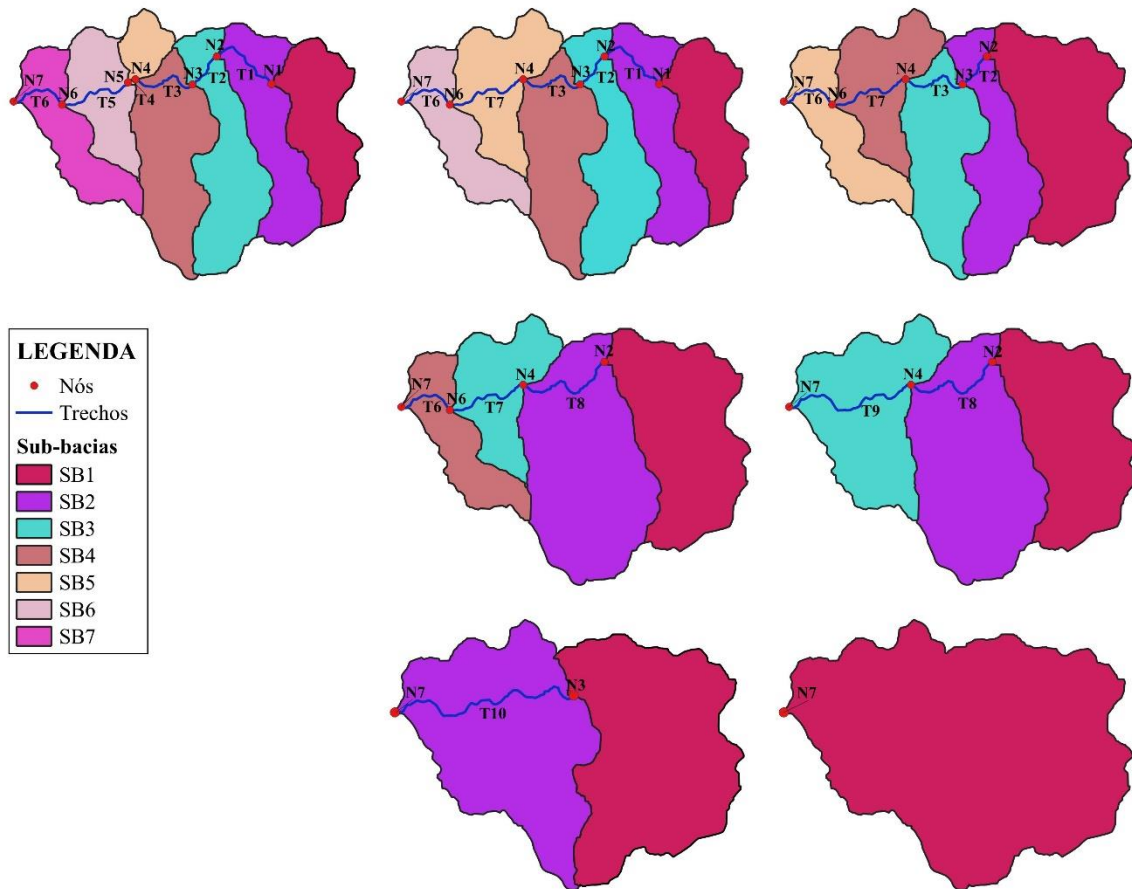


Fonte: Autora (2025).

### 3.1.6 Configuração da rede de drenagem

Os nós, que representam os pontos de exutório de cada sub-bacia, bem como os trechos do curso principal entre dois nós consecutivos (Figura 15), foram definidos com base no nível mais detalhado de discretização adotado nesse estudo, correspondente à sete sub-bacias.

Figura 15 – Configuração dos nós e trechos para os diferentes níveis de discretização da bacia hidrográfica



Fonte: Autora (2025).

A coleta de dados para caracterização desses elementos, fundamentais para a modelagem no SWMM, envolveu uma visita a campo realizada na área de estudo. Durante essa etapa, buscou-se obter as características altimétricas dos nós e geométricas dos trechos, incluindo a forma do leito, tipo de revestimento e profundidade dos corpos d'água

A obtenção das altitudes foi efetuada com o auxílio de receptor GPS. Devido a restrições de acesso, em determinados nós, não foi possível a realização das medições exatamente nos pontos predefinidos. Como alternativa, optou-se por realizar os levantamentos em locais imediatamente adjacentes, com características semelhantes, que pudessem representar adequadamente os nós originais. As cotas altimétricas, bem como as coordenadas geográficas obtidas para cada nó constam na Tabela 9.

Tabela 9 – Cotas altimétricas e coordenadas dos nós

Nó	Cota (m)	Latitude (y)	Longitude (x)
N1	1268,75	21° 50' 10,42'' S	46° 31' 55,44'' O
N2	1268,75	21° 49' 46,68'' S	46° 32' 44,64'' O
N3	1254,98	21° 50' 10,12'' S	46° 33' 6,89'' O
N4	1250,96	21° 50' 5,29'' S	46° 33' 58,31'' O
N5	1250,80	21° 50' 7,81'' S	46° 34' 5,00'' O
N6	1247,07	21° 50' 26,04'' S	46° 35' 4,87'' O
N7	1245,08	21° 50' 22,94'' S	46° 35' 48,68'' O

Fonte: Autora (2025).

Para representar as seções dos trechos definidos na Figura 15, foram selecionados pontos intermediários e acessíveis que possibilitaram a realização das medições em campo. As dimensões físicas dos canais foram determinadas com o auxílio de trena métrica e corda graduada, permitindo a identificação da profundidade do corpo hídrico e a caracterização geométrica das seções transversais. As Figuras 16 a 22 ilustram as seções onde foram realizadas as medições, acompanhadas de seus respectivos perfis transversais.

Figura 16 – Seção transversal T1



Fonte: Autora (2025).

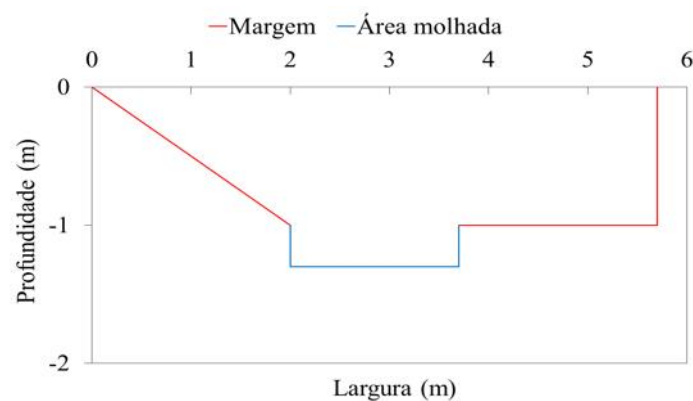


Figura 17 – Seção transversal T2 e T8



Fonte: Autora (2025).

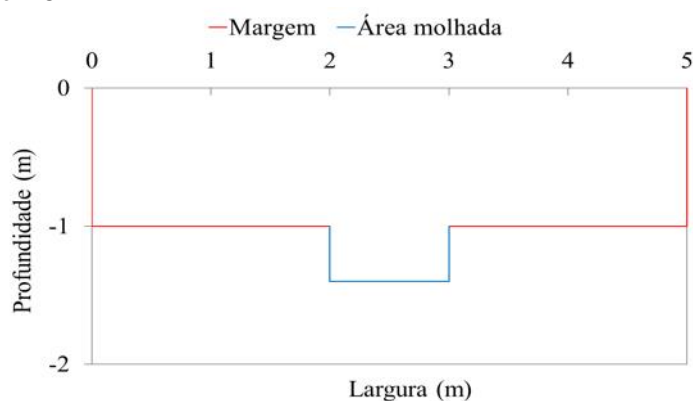


Figura 18 – Seção transversal T3



Fonte: Autora (2025).

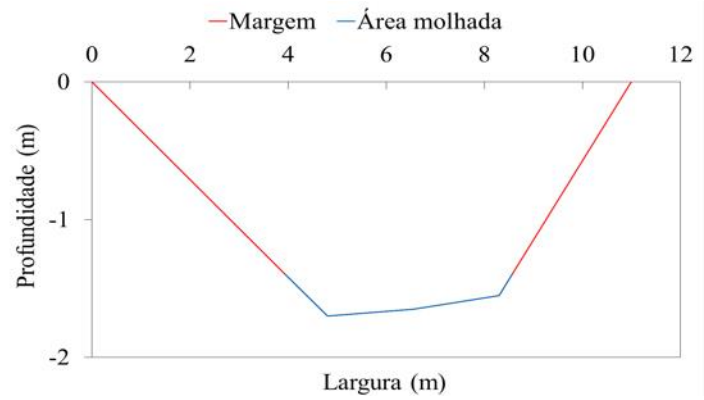


Figura 19 – Seção transversal T4



Fonte: Autora (2025).

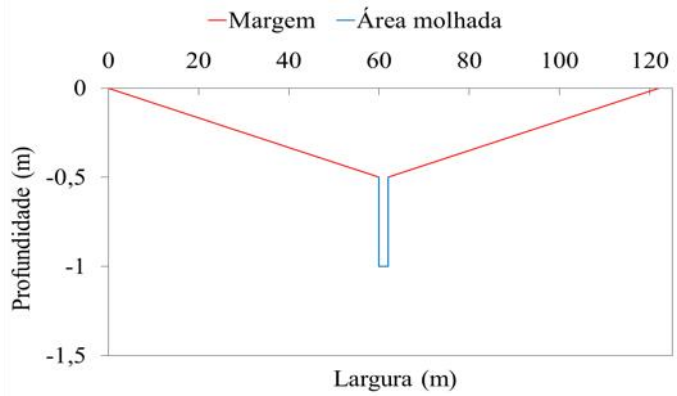


Figura 20 – Seção transversal T5, T7 e T10



Fonte: Autora (2025).

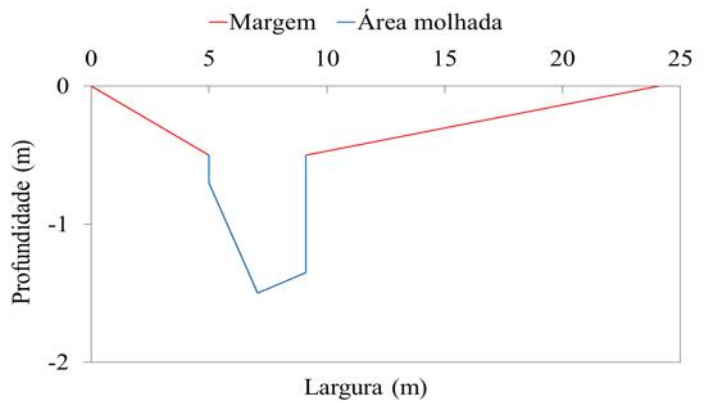


Figura 21 – Seção transversal T9



Fonte: Autora (2025).

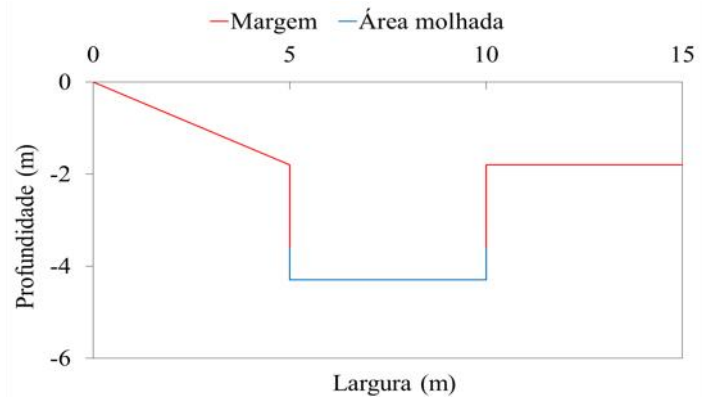
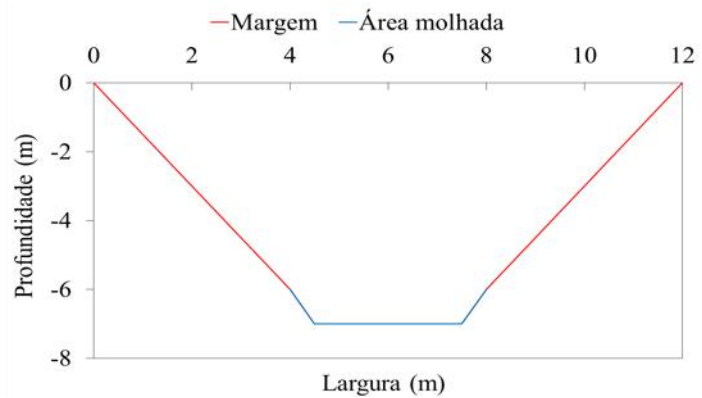


Figura 22 – Seção transversal T6



Fonte: Autora (2025).



A definição dos coeficientes de rugosidade dos trechos seguiu as recomendações do manual do SWMM, considerando seções com cobertura natural e geometria relativamente regular. Já os comprimentos de cada trecho foram obtidos a partir do arquivo de hidrografia manipulado no Qgis, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Características dos trechos em cada nível de discretização

(continua)

Trechos	Comprimento (km)	N_Manning
<i>2 Sub-bacias</i>		
T10	5,79	0,030
<i>3 Sub-bacias</i>		
T8	2,93	0,030
T9	3,91	0,030
<i>4 Sub-bacias</i>		
T8	2,93	0,030
T7	2,30	0,030
T6	1,61	0,030

Tabela 10 – Características dos trechos em cada nível de discretização  
(conclusão)

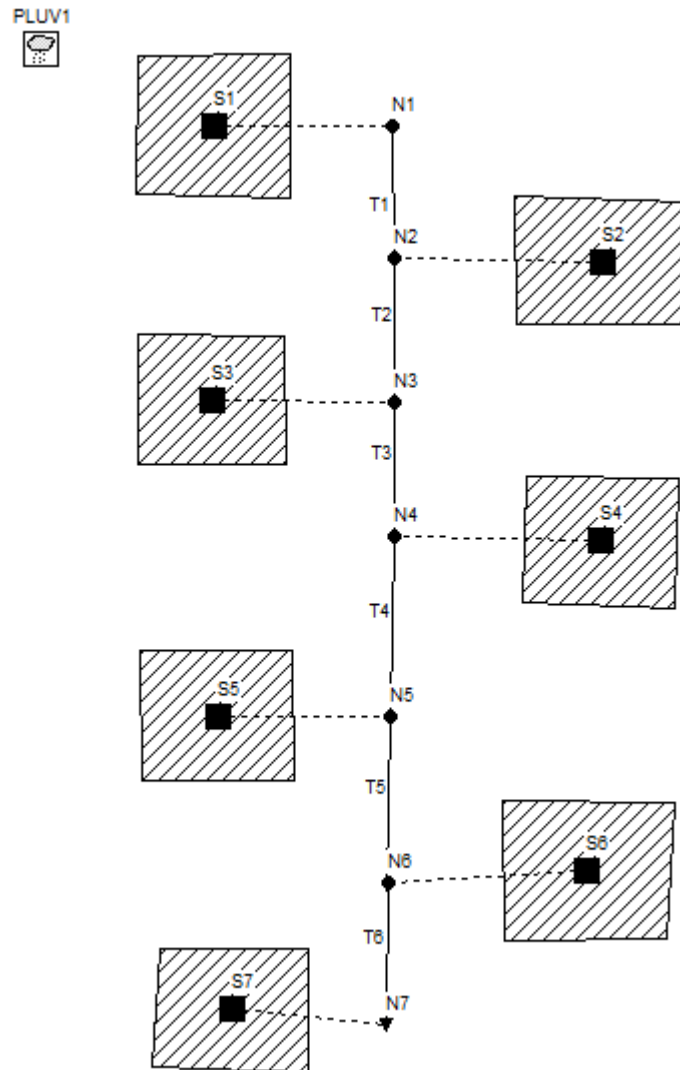
<b>Trechos</b>	<b>Comprimento (km)</b>	<b>N_Manning</b>
<i>5 Sub-bacias</i>		
T2	1,04	0,030
T3	1,89	0,030
T7	2,30	0,030
T6	1,61	0,030
<i>6 Sub-bacias</i>		
T1	2,02	0,030
T2	1,04	0,030
T3	1,89	0,030
T7	2,30	0,030
T6	1,61	0,030
<i>7 Sub-bacias</i>		
T1	2,02	0,030
T2	1,04	0,030
T3	1,89	0,030
T4	0,22	0,030
T5	2,08	0,030
T6	1,61	0,030

Fonte: Autora (2025).

### 3.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Nesta etapa, foram criados sete arquivos distintos no SWMM, cada um correspondente a um nível de discretização espacial da bacia hidrográfica. A representação gráfica do modelo foi construída com base na delimitação das sub-bacias, que foram representadas por polígonos, associados a nós de exutório, que, por sua vez, se conectam a trechos de canal que compõem a rede de drenagem principal. A Figura 22 ilustra a configuração espacial do modelo para o caso com sete sub-bacias, evidenciando a organização dos elementos e o ponto de entrada da precipitação (PLUV1), que foi inserida na forma do hietograma gerado para cada tempo de retorno.

Figura 23 – Representação esquemática no modelo com sete sub-bacias e rede de drenagem associada



Fonte: Autora (2025).

A cada sub-bacia foram atribuídos os parâmetros hidrológicos requeridos para o funcionamento do modelo, previamente obtidos nas etapas anteriores, incluindo: características geométricas, percentual de área impermeável, coeficientes de rugosidade e profundidade de armazenamento em depressões. Para a modelagem da infiltração, foi adotado o método do *Curve Number*, para o qual foi necessário informar o valor de CN.

Nos nós, foram inseridas as cotas altimétricas do terreno e a profundidade máxima. Já para os trechos (condutos), foram definidos os comprimentos, coeficientes de rugosidade de Manning e as geometrias das sessões transversais, inseridas manualmente conforme as especificações de cada nível de discretização adotado.

As simulações foram configuradas para uma duração de doze horas, com intervalos de cálculo de 5 minutos.

A Figura 24 apresenta um exemplo do conjunto de parâmetros atribuídos a uma sub-bacia, um nó e um trecho da rede de drenagem.

Figura 24 – Parâmetros de entrada inseridos no SWMM para sub-bacia, trecho e nó

Sub-bacia S1		Conduto T1		Nó N1	
Propriedades	Valor	Propriedades	Valor	Propriedades	Valor
Identificador	S1	Identificador	T1	Identificador	N1
Coordenada X	10000.334	Nó de entrada	N1	X-Coordinate	8365.465
Coordenada Y	5548.986	Nó de saída	N2	Y-Coordinate	7021.293
Descrição		Descrição		Descrição	
Etiqueta		Etiqueta		Etiqueta	
Pluviômetro	PLUV1	Forma	IRREGULAR	Afluência	NO
Exutório	N1	Profundidade Max.	1.30	Tratamento	NO
Área	617.6	Comprimento	2023	Cota do radier	1265.75
Largura	1330	n-Manning	0.03	Profundidade Max.	1.3
% Declividade	18.05	Offset de entrada	*	Profundidade Inicial	0
% Impermeável	6.5	Offset de saída	*	Profundidade de Sobreca	0
n-Impermeável	0.01	Fluxo inicial	0	Área alagada	0
n-Permeável	0.5	Fluxo Máximo	0		
PA-Impermeável	2.54	Coef. Perda na Entrada	0		
PA-Permeável	5.08	Coef. Perda na Saída	0		
% A. imp s/ arm.	60	Coef. Perda Média	0		

Fonte: Autora (2025).

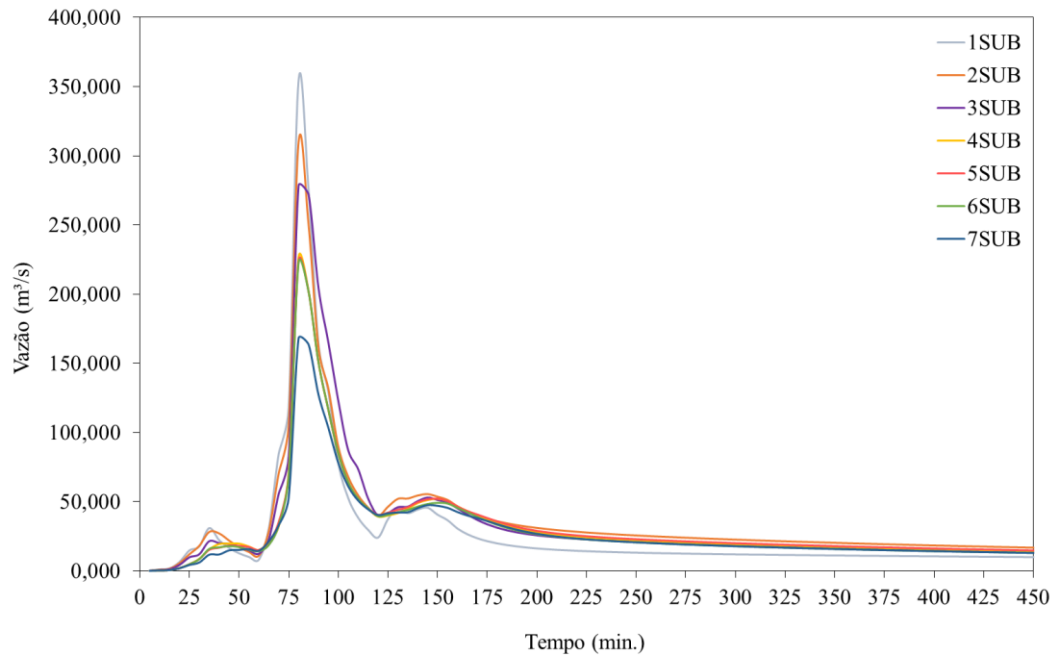
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 HIDROGRAMAS NO EXUTÓRIO

A primeira etapa de análise consistiu na avaliação das vazões na saída da bacia para os sete níveis de discretização espacial simulados no SWMM, considerando os dois diferentes tempos de retorno da chuva.

A Figura 25 apresenta os hidrogramas resultantes para o nó de exutório (N7) para TR de 25 anos, permitindo observar a resposta hidrológica da bacia em termos de forma do escoamento e variação das vazões.

Figura 25 – Hidrogramas em N7 para TR 25



Fonte: Autora (2025).

De maneira geral, nota-se que todas as configurações apresentaram o mesmo tempo de concentração, refletido no tempo ao pico idêntico entre os hidrogramas, ocorrendo aos 80 minutos. Em relação às magnitudes das vazões de pico, observa-se que estas diminuem progressivamente com o aumento do detalhamento espacial. O nível não discretizado (1SUB) apresentou a maior vazão de pico, de 354,26 m<sup>3</sup>/s, enquanto o nível mais refinado (7SUB) resultou na menor vazão máxima, de 167,99 m<sup>3</sup>/s, representando uma redução de 52,58% em relação à condição agregada.

Além do pico principal, é possível identificar variações na forma dos hidrogramas, em especial a ocorrência de picos secundários. Esse efeito evidencia a defasagem temporal entre as contribuições de diferentes áreas da bacia, a acumulação em depressões, suavizando a superposição de escoamentos.

A Tabela 11 resume os valores das vazões de pico para cada nível de discretização e suas variações percentuais. A primeira coluna de variação expressa a diferença em relação ao cenário não discretizado (1SUB), enquanto a segunda coluna representa as diferenças entre arranjos consecutivos de discretização.

Tabela 11 – Variações das vazões máximas em N7 para TR 25

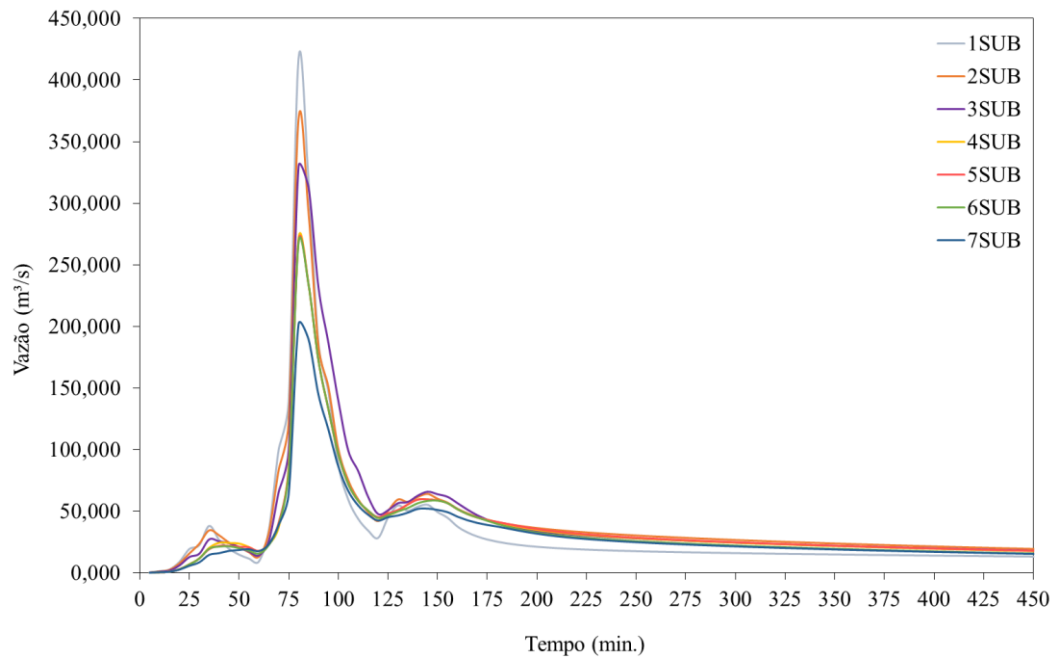
<b>Nível</b>	<b>Vazão (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Variação (%) ref. 1SUB</b>	<b>Variação (%) consecutiva</b>
1SUB	354,256	-	-
2SUB	309,726	-12,57	-12,57
3SUB	278,330	-21,43	-10,17
4SUB	226,296	-36,12	-18,70
5SUB	223,856	-36,81	-1,08
6SUB	222,580	-37,17	-0,57
7SUB	167,993	-52,58	-24,52

Fonte: Autora (2025).

Observa-se que entre os níveis 4SUB, 5SUB e 6SUB, as diferenças foram pouco expressivas (inferiores a 1,1%), indicando que a subdivisão adicional da bacia nesse intervalo não resultou em grandes alterações na resposta hidrológica. Já na transição de 6SUB para 7SUB, houve uma redução abrupta de cerca de 24,50%, sugerindo que a redistribuição das áreas de contribuição e o maior detalhamento da rede de drenagem intensificaram os efeitos de defasagem e atenuação dos escoamentos parciais.

O gráfico da Figura 26 mostra os hidrogramas obtidos para TR de 50 anos.

Figura 26 – Hidrogramas em N7 para TR 50



Fonte: Autora (2025).

O padrão observado é semelhante ao de TR 25, com a permanência do tempo de pico inalterado, enquanto a magnitude da vazão de pico diminui linearmente com o aumento da discretização. A vazão máxima entre níveis ocorre em 1SUB ( $417,38\text{m}^3/\text{s}$ ) e a mínima em 7SUB ( $201,82\text{m}^3/\text{s}$ ), correspondendo a uma redução de 51,64%.

A Tabela 12 também revela a mesma tendência observada para TR 25. A queda mais expressiva entre arranjos consecutivos ocorre entre os níveis 6SUB e 7SUB (-24,73%), enquanto as diferenças entre 4SUB e 6SUB permanecem inferiores a 1%.

Tabela 12 – Variações das vazões máximas em N7 para TR 50

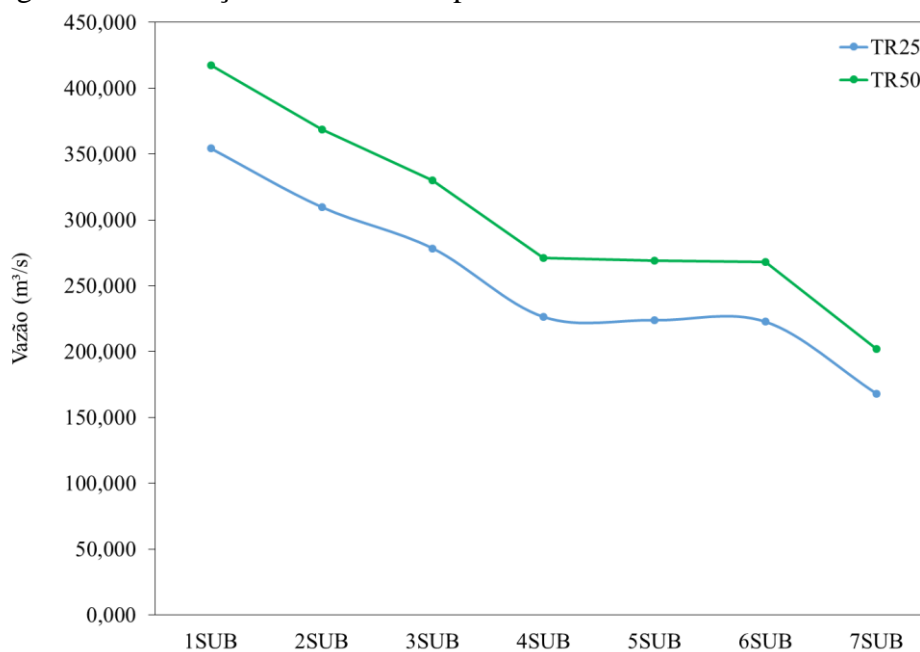
Nível	Vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Variação (%) ref. 1SUB	Variação (%) consecutiva
1SUB	417,379	-	-
2SUB	368,453	-11,72	-11,72
3SUB	329,873	-20,97	-10,47
4SUB	271,140	-35,04	-17,80
5SUB	269,211	-35,50	-0,71
6SUB	268,120	-35,76	-0,41
7SUB	201,825	-51,64	-24,73

Fonte: Autora (2025).

Em ambos os TRs, o formato do hidrograma segue o mesmo padrão, com tempo de pico invariável entre os níveis, o que indica que a discretização não alterou significativamente o tempo de resposta da bacia, apenas os valores absolutos de vazão.

Observa-se uma redução progressiva das vazões de pico conforme aumenta o nível de discretização, tanto para TR 25 quanto para TR 50. Esse comportamento é ilustrado na Figura 27, onde ambas as curvas apresentam tendência decrescente à medida que a bacia é subdividida em mais unidades. A curva referente ao TR 50 mantém-se acima da de TR 25 em todos os níveis, como esperado, uma vez que precipitações mais intensas resultam em maiores vazões. Apesar da diferença de magnitude, as curvas exibem forma semelhante, o que evidencia que o efeito da discretização é consistente independentemente da intensidade da chuva.

Figura 27 – Variação das vazões de pico em TR 25 e TR 50



Fonte: Autora (2025).

Esse comportamento está associado ao fato de que subdivisões mais detalhadas, em geral, tendem a distribuir de forma mais precisa as áreas de contribuição e as características do terreno, resultando em uma propagação mais gradual do escoamento superficial até o ponto de saída.

Nesse contexto, Silveira Neto (2021) observou que a redução das vazões máximas do hidrograma com o refinamento das discretizações espaciais, assim como a ocorrência de picos locais, estão relacionadas ao fato de que, em função da disposição espacial das sub-bacias, suas vazões não alcançam o ponto de saída simultaneamente.

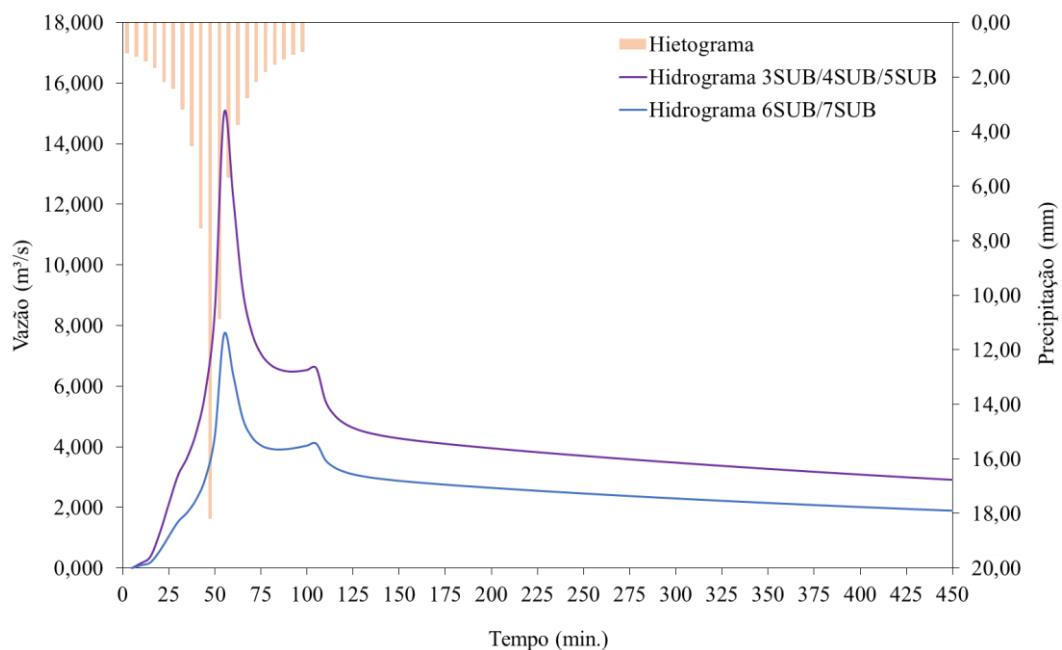
De forma semelhante, Silva e Silva (2017) verificaram que a vazão de pico tende a ser atenuada quando a área de estudo é representada com a rede de drenagem, efeito que pode ser atribuído ao uso do modelo de propagação por onda cinemática, o mesmo adotado neste estudo.

## 4.2 HIDROGRAMAS EM NÓS INTERMEDIÁRIOS

As Figuras a seguir apresentam os resultados das simulações das vazões máximas para a chuva com TR de 25 anos, destacando os nós que aparecem com maior frequência nos diferentes níveis de discretização.

Em N2 (Figura 28), observa-se que não houve alteração da vazão de pico entre os níveis 3SUB, 4SUB e 5SUB (todas iguais a  $15 \text{ m}^3/\text{s}$ ) nem entre os níveis 6SUB e 7SUB (ambos com  $7,71 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Esse comportamento ocorre porque não houve modificação na discretização até esse nó nesses intervalos, resultando em áreas de contribuição idênticas, conforme os arranjos apresentados anteriormente na Figura 15. O impacto do refinamento aparece quando se passa de 5SUB para 6SUB, com redução de aproximadamente 50% na vazão de pico. O tempo ao pico se manteve estável, ocorrendo aos 55 minutos em ambos os cenários.

Figura 28 – Variação das vazões em N2

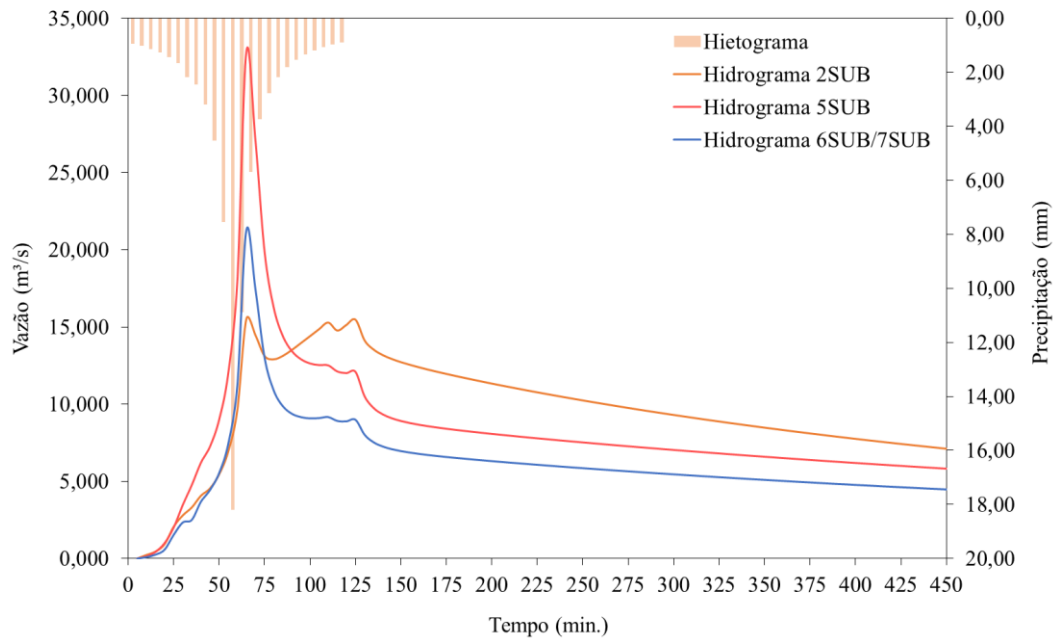


Fonte: Autora (2025).

No nó N3 (Figura 29), a vazão de pico mais que dobra na transição de 2SUB para 5SUB, o que indica que o aumento do detalhamento entre esses níveis resultou em uma maior concentração do escoamento. Contudo, ao avançar para os níveis 6SUB e 7SUB, observa-se uma queda de 34,26% em relação a 5SUB, embora a vazão de pico ainda permaneça acima do valor obtido no nível com menor discretização (+37,07%). Assim como ocorre em N2, o tempo

ao pico não sofreu alteração entre os diferentes níveis de discretização, permanecendo em 65 minutos.

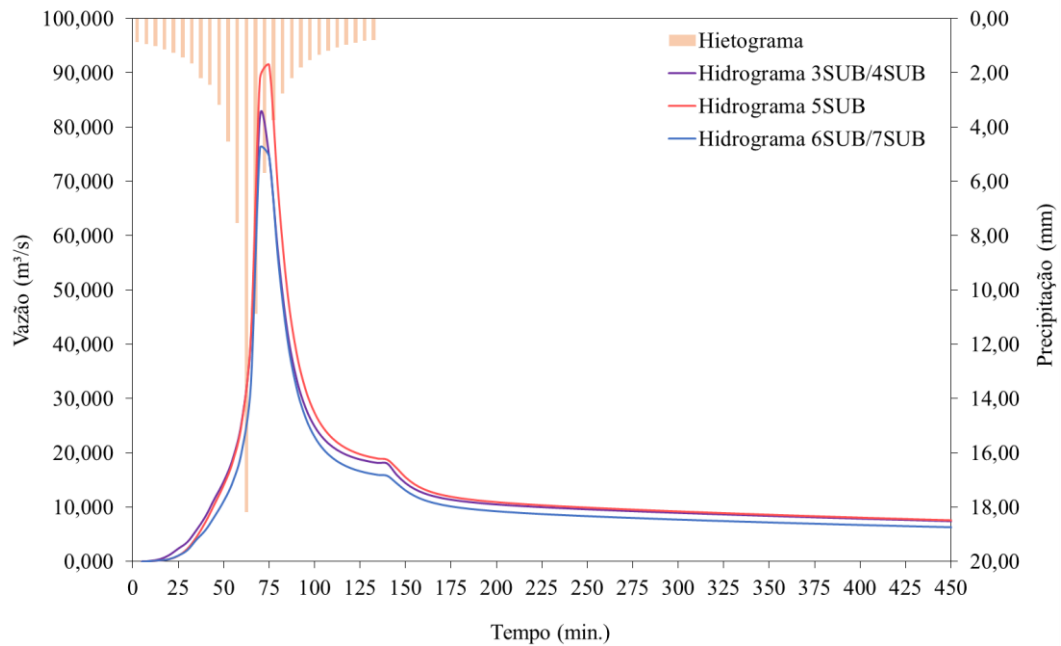
Figura 29 – Variação das vazões em N3



Fonte: Autora (2025).

Em N4 (Figura 30), a vazão de pico aumentou de 82,01 m<sup>3</sup>/s nas configurações 3SUB e 4SUB para 91,45 m<sup>3</sup>/s em 5SUB (+11,51%), reduzindo posteriormente para 76,12 m<sup>3</sup>/s nas configurações 6SUB e 7SUB. O tempo ao pico foi de 70 minutos em 3SUB e 4SUB, aumentando para 75 minutos em 5SUB e voltando a cair para 70 minutos em 6SUB e 7SUB.

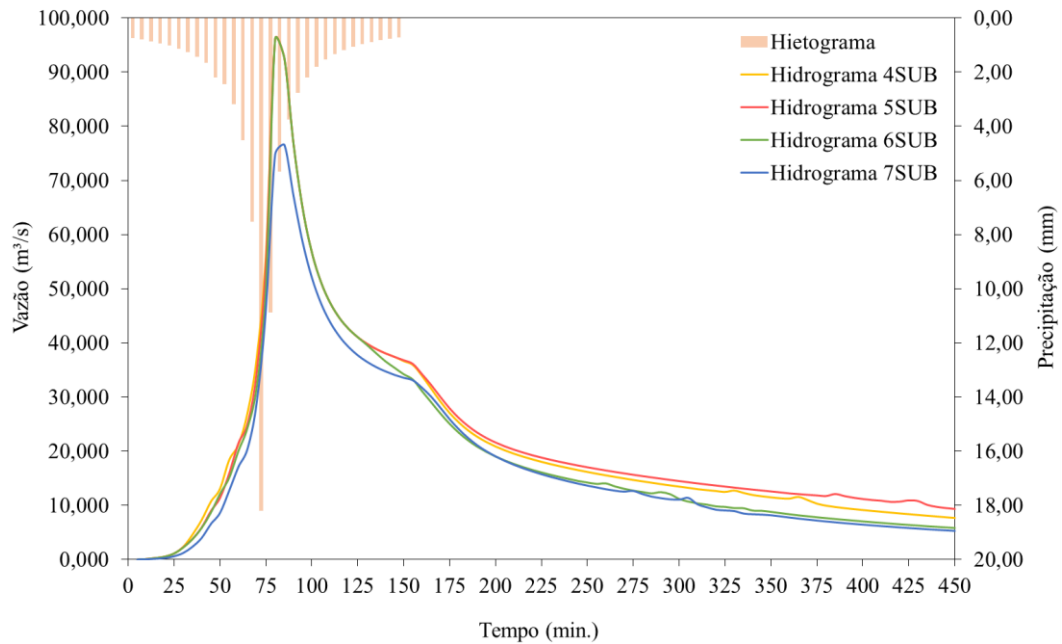
Figura 30 – Variação das vazões em N4



Fonte: Autora (2025).

O nó N6 (Figura 31) apresenta um comportamento singular. Apesar de haver mudanças na discretização a montante ao passar de 4SUB para 5SUB e desse para 6SUB, a vazão de pico se manteve inalterada (96,04 m<sup>3</sup>/s). Somente em 7SUB nota-se uma redução expressiva, com a vazão caindo para 76,59 m<sup>3</sup>/s (-20,25%) – valor muito próximo ao encontrado para o nó N4 em 6SUB e 7SUB. Além disso, em 7SUB, o tempo de pico sofreu atraso de 5 minutos em relação aos demais cenários.

Figura 31 – Variação das vazões em N6



Fonte: Autora (2025).

Os resultados indicam que o aumento do nível de discretização exerceu influência significativa sobre a vazão de pico e, em menor grau, sobre o tempo ao pico. Em geral, o refinamento inicial da subdivisão da bacia (até 5SUB) resultou em maior concentração do escoamento, refletindo-se em aumento da vazão máxima em quase todos os nós. Esse comportamento é mais evidente em N3 e N4, onde o acréscimo foi superior a 100% e 11%, respectivamente.

Por outro lado, o refinamento adicional (6SUB e 7SUB) provocou a redução da vazão de pico em todos os pontos, que pode estar associada à redistribuição das áreas a montante do nó e ao aumento do tempo de propagação do escoamento a partir da inclusão da rede de drenagem.

Quanto ao tempo de pico, as variações foram discretas, com incrementos pontuais (como em N4, de 70 para 75 minutos em 5SUB, e em N6, de 80 para 85 minutos em 7 SUB), mostrando que em determinadas configurações, os tempos em que ocorrem as vazões máximas foram sensíveis ao modo como a sub-bacia foi dividida.

As análises das vazões de pico para um mesmo nó, considerando diferentes níveis de discretização da bacia, mostraram, principalmente nos níveis de discretização mais detalhados, uma tendência de redução da vazão máxima. Esse comportamento também foi identificado por Garcia e Paiva (2016), que relacionaram essa redução ao aumento do armazenamento presente nos canais de simulação.

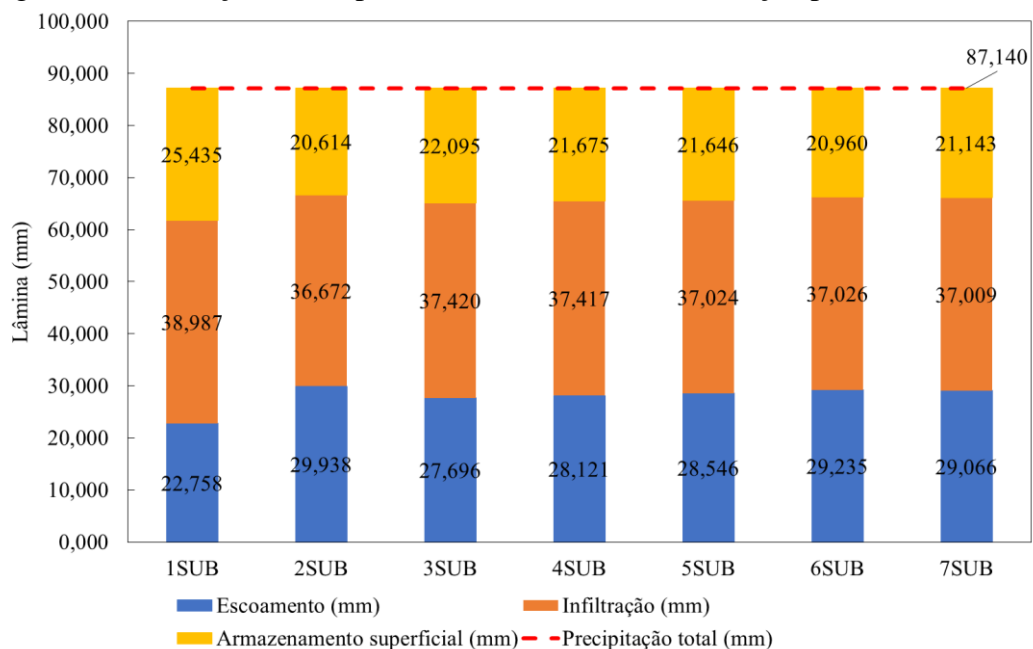
Entretanto, em alguns casos, o maior detalhamento da bacia não alterou as vazões de pico, como ocorrido em N6 entre os níveis 4SUB e 6SUB, já em outros, esse aprimoramento provocou oscilações de aumento e depois redução, como é o caso de N3 e N4, sugerindo que a tendência de redução não é linear. Esse comportamento pode ser atribuído à heterogeneidade das sub-bacias e à interação entre seus parâmetros hidrológicos – como declividade, comprimento, rugosidade dos trechos e posição relativa da rede de drenagem.

Nesse sentido, conforme destacado por Neto *et al.* (2023), o formato físico da bacia hidrográfica influencia a sensibilidade do modelo à discretização espacial e, conseqüentemente, os valores de vazão de pico.

### 4.3 BALANÇO HÍDRICO

A Figura 32 apresenta o balanço hídrico para TR 25 de todos os níveis de discretização, considerando a precipitação total (87,14 mm) e sua distribuição entre escoamento, infiltração e armazenamento superficial.

Figura 32 – Balanço hídrico para os sete níveis de discretização para TR 25

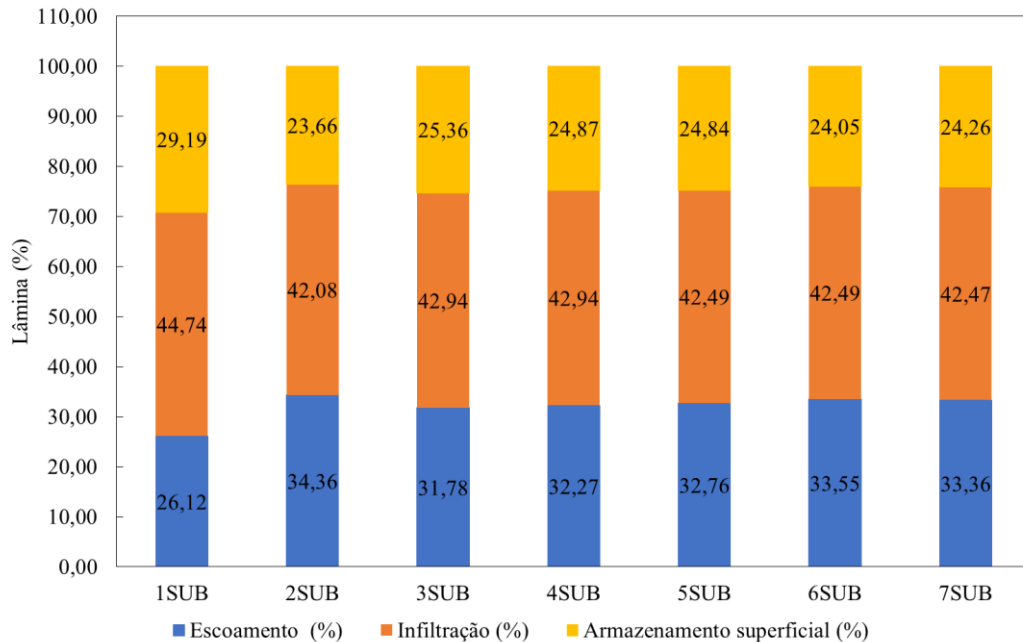


Fonte: Autora (2025).

De forma geral, verifica-se que a infiltração representa a maior parcela do balanço hídrico em todos os cenários, respondendo por aproximadamente 42-45% da precipitação total,

conforme mostra a Figura 33. O segundo maior componente é o escoamento (26-35%), seguido pelo armazenamento superficial (23-30%).

Figura 33 – Percentuais de cada componente em relação à precipitação total para TR 25



Fonte: Autora (2025).

No cenário não discretizado, a lâmina escoada foi de 22,76 mm, que corresponde à menor fração dentre todos os níveis. A infiltração, por outro lado, apresentou o maior valor absoluto entre os cenários, atingindo, aproximadamente, 39 mm, equivalente a 44,74% da precipitação total. O armazenamento superficial também foi mais elevado, registrando 25,43 mm.

Com a subdivisão em 2SUB, observou-se um aumento expressivo do total escoado, que passou para 29,94 mm (incremento de +7,18 mm em relação ao 1SUB). Em contrapartida, a infiltração e o armazenamento superficial caíram para 36,67 mm e 20,61 mm, respectivamente – as maiores reduções observadas.

No nível 3SUB, a lâmina de água escoada diminuiu para 27,70 mm, aproximando-se da média geral (27,91 mm). A infiltração voltou a crescer, atingindo 37,42 mm, e o armazenamento superficial aumentou para 22,09 mm, sugerindo uma redistribuição da precipitação entre as componentes do balanço.

No 4SUB, o escoamento apresentou um pequeno crescimento (+1,51%), enquanto a infiltração manteve-se praticamente estável (37,42 mm), mantendo variação praticamente nula. Já o armazenamento superficial apresentou uma leve queda (variação de -1,90%).

Com o refinamento para 5SUB, o total escoado subiu sutilmente para 28,54 mm (+1,49%). A parcela de água infiltrada reduziu para 37,02 mm (queda de -1,05%), e o armazenamento superficial permaneceu quase constante (-0,14%).

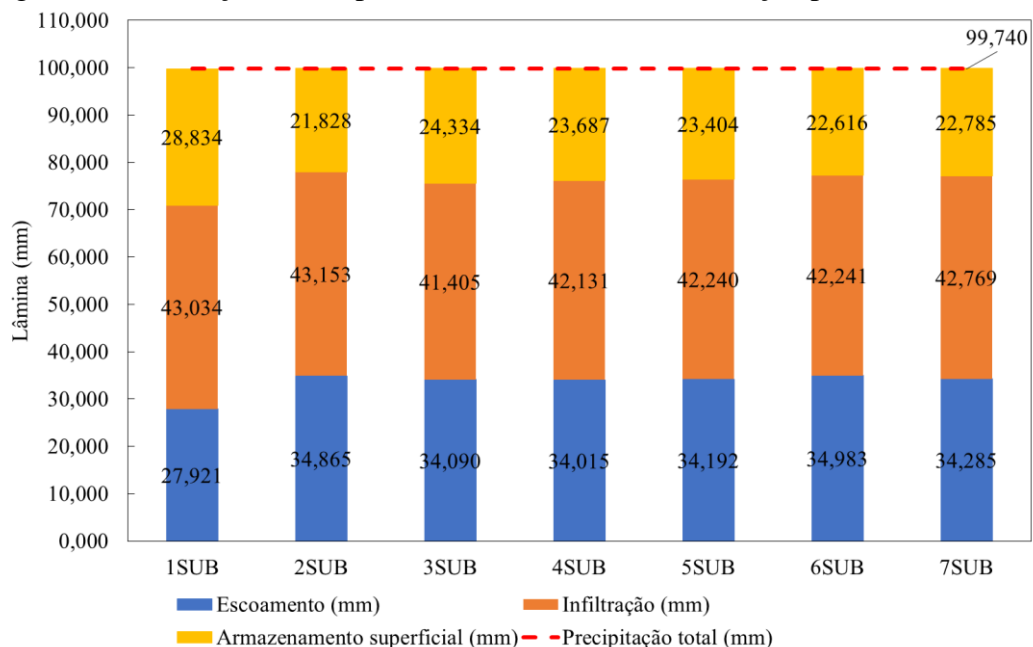
Em 6SUB, a parcela escoada atingiu o valor mais alto entre os níveis, 29,23 mm. Em relação a infiltração, a estabilidade foi novamente mantida, enquanto o armazenamento superficial caiu para 20,96 mm (redução de 3,17%).

Por fim, em 7SUB, o escoamento apresentou uma leve redução (-0,58%), sendo o segundo maior valor obtido dentre os sete níveis. A infiltração teve uma variação praticamente imperceptível (-0,04%) e o armazenamento superficial voltou a subir, chegando a 21,14 mm (acréscimo de 0,86% frente à 6SUB).

A partir de 3SUB, observa-se que a infiltração tende a se estabilizar, apresentando variações mínimas, em torno de 37 mm, que seguem uma trajetória de redução quase linear até 7SUB, enquanto as demais componentes apresentam oscilações um pouco mais perceptíveis até esse ponto.

Na Figura 34, é apresentado o gráfico correspondente ao balanço hídrico resultante das simulações para TR 50, considerando a precipitação total de 99,74 mm.

Figura 34 – Balanço hídrico para os sete níveis de discretização para TR 50

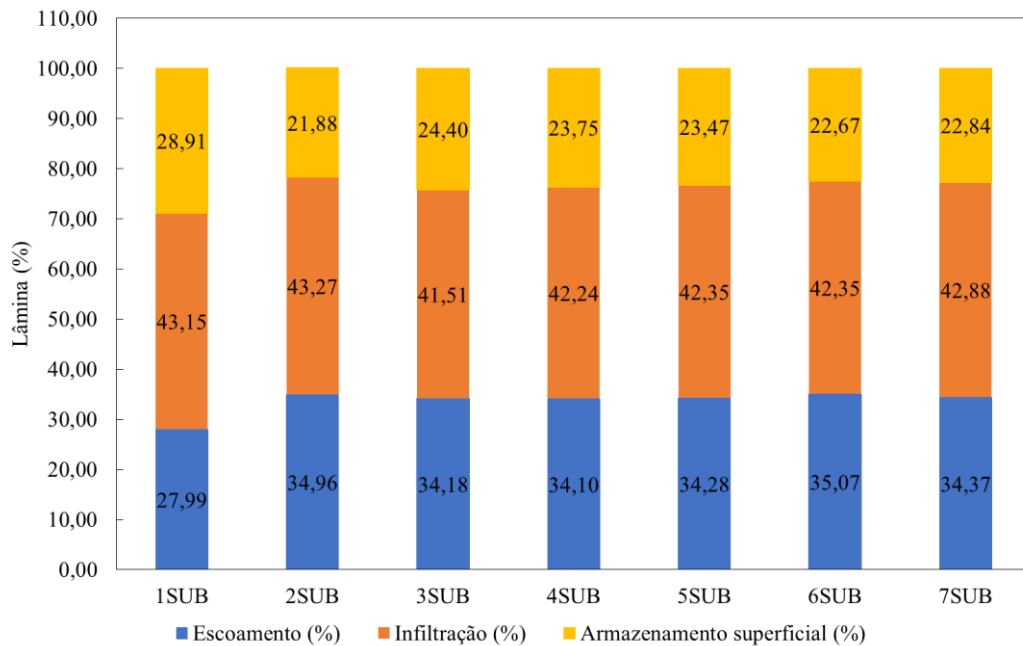


Fonte: Autora (2025).

Analogamente à TR 25, a infiltração continua sendo a principal componente do balanço hídrico em termos quantitativos, representando cerca de 41 a 44% da precipitação total em todos

os cenários de discretização, conforme ilustrado na Figura 35. O escoamento superficial aparece como a segunda maior componente, variando entre 27 e 36%, seguido pelo armazenamento superficial, que representa 21 a 29%.

Figura 35 – Percentuais de cada componente em relação à precipitação total para TR 50



Fonte: Autora (2025).

No nível 1SUB, o armazenamento superficial registrou o maior valor de toda a série, com 28,83 mm. O escoamento foi o menor dentre os cenários (27,92 mm), enquanto a infiltração atingiu 43,03 mm, o segundo maior valor da sequência.

Com a subdivisão para 2SUB, o escoamento apresentou crescimento expressivo, atingindo 34,86 mm (+24,84%). A infiltração alcançou seu maior valor entre os sete níveis, +0,12 mm em relação ao nível anterior, enquanto o armazenamento superficial sofreu a maior redução da série, caindo para 21,83 mm (-24,30%).

Na transição de 2SUB para 3SUB, a lâmina escoada reduziu-se -2,22%. Por outro lado, a infiltração alcançou o menor valor obtido entre os níveis, com uma redução um pouco mais expressiva (-4,05%). Em compensação, o armazenamento obteve aumento de +11,48%.

Em 4SUB, o escoamento manteve leve redução (-0,22%). A infiltração cresceu +1,75% ao passo que o armazenamento superficial decresceu -2,66%.

No cenário 5SUB, o escoamento e a infiltração apresentaram aumentos discretos, de apenas +0,52 e +0,26%, respectivamente. A variação mais significativa foi observada no armazenamento, que sofreu uma redução de -1,19%.

Em 6SUB, observou-se o maior valor de escoamento superficial de toda a série, com um acréscimo de +2,31% em relação ao nível anterior. Em relação à parcela correspondente a infiltração, pode-se dizer que não houve alteração no que se refere ao valor obtido no cenário antecedente. O armazenamento superficial, por sua vez, apresentou crescimento mais expressivo, com aumento de +3,37%.

O nível 7SUB encerrou com redução na lâmina escoada (-2,00%), enquanto a infiltração e o armazenamento superficial registraram aumentos de +1,24 e +0,75, nesta ordem.

A análise conjunta dos dois tempos de retorno (TR 25 e TR 50) evidencia uma coerência no comportamento geral entre os dois cenários de chuva. A discretização da bacia entre os níveis 2SUB e 7SUB (Tabela 13) exerceu influência discreta sobre as lâminas de escoamento, infiltração e armazenamento superficial, apresentando desvio padrão inferior a 1 mm em todas as componentes.

Tabela 13 – Desvio padrão entre os níveis 2SUB e 7SUB

<b>TR</b>	<b>Escoamento (mm)</b>	<b>Infiltração (mm)</b>	<b>Arm. Superficial (mm)</b>
25 anos	0,812	0,285	0,545
50 anos	0,414	0,597	0,884

Fonte: Autora (2025).

Contudo, a configuração 1SUB (Tabela 14) afastou-se desse padrão, com desvios superiores a 2 mm, o que permite notar, nesta configuração, uma tendência à subestimação do escoamento e ao aumento do armazenamento superficial e, em menor grau, da infiltração.

Tabela 14 – Desvio padrão entre os níveis 1SUB e 7SUB

<b>TR</b>	<b>Escoamento (mm)</b>	<b>Infiltração (mm)</b>	<b>Arm. Superficial (mm)</b>
25 anos	2,389	0,761	1,620
50 anos	2,480	0,607	2,310

Fonte: Autora (2025).

Ao comparar os extremos (1SUB e 7SUB), há uma tendência geral de redução da infiltração e do armazenamento superficial, concomitante a um aumento do escoamento superficial. Esse comportamento indica que a maior representação espacial das heterogeneidades da bacia, como diferenças locais de declividade, área e tempo de concentração, tende a favorecer o escoamento em detrimento das demais componentes do balanço hídrico.

Em termos de conservação de massa, o balanço hídrico manteve-se consistente em todos os cenários e TRs, com erros de continuidade não ultrapassando -0,1%.

## 5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste estudo teve como objetivo principal avaliar a influência de diferentes níveis de discretização espacial na dinâmica hidrológica da sub-bacia hidrográfica do Córrego Vargens de Caldas – Poços de Caldas/MG. Para isso, foram realizadas simulações para sete níveis distintos de refinamento utilizando o software de modelagem hidrológica SWMM.

Os dados de entrada do modelo foram obtidos a partir de múltiplas fontes: análise de imagens de satélites, manipulação de arquivos para geração de mapas e extração de informações por meio de ferramentas de geoprocessamento, cálculos de variáveis pluviométricas baseados na literatura, tendo em vista a indisponibilidade de dados monitorados, além de visitas a campo para caracterização detalhada da área e redes de drenagem.

Nos hidrogramas do nó de exutório da bacia, para ambos os tempos de retorno aplicados, observou-se um decréscimo geral na magnitude das vazões máximas à medida que os níveis de discretização foram escalonados. Em nós intermediários, entretanto, essa tendência não se manteve de maneira uniforme. Em N3 e N4, por exemplo, observou-se que a maior vazão ocorreu em um nível mais detalhado que o anterior, enquanto no N6 sucessivos níveis de discretização não alteraram os valores das vazões de pico. Dessa forma, embora discretizações mais finas geralmente resultem em reduções das vazões máximas no exutório, o efeito local desse refinamento depende fortemente das condições físicas e da conectividade hidrológica de cada sub-bacia, não sendo, portanto, linear nem uniforme em toda a bacia.

O tempo de pico manteve-se constante em todos os cenários de discretização e tempos de retorno nas simulações no exutório da bacia, uma vez que não houve alteração no tempo de concentração. Isso sugere que, neste caso, o refinamento espacial exerceu maior influência na magnitude das vazões e a forma de propagação do escoamento, mas não no momento da ocorrência do pico de vazão. No entanto, as simulações dos nós intermediários revelaram, em nós mais a jusante, atrasos de até 5 minutos em certos níveis consecutivos de discretização, evidenciando pequenas variações locais no processo de concentração do escoamento.

A análise do balanço hídrico evidencia que, a partir do nível 2SUB, as variações entre as componentes de escoamento, infiltração e armazenamento superficial tornam-se pouco significativas, indicando estabilização dos resultados. Em contrapartida, a configuração 1SUB apresentou discrepâncias mais acentuadas em relação às demais, sobretudo na parcela correspondente ao escoamento superficial, que se mostrou subestimada. Tal comportamento foi observado de forma consensual para ambos os períodos de retorno analisados, sugerindo que,

a partir de determinado nível de discretização espacial, o modelo atinge um nível de convergência, no qual incrementos adicionais de subdivisões produzem variações marginais nos componentes do balanço.

Pode-se ainda inferir que a Lei da Continuidade foi preservada em todos os cenários, com perdas máximas de -0,1%, confirmando a consistência hidrológica das simulações.

De modo geral, o estudo se mostrou satisfatório, atingindo os objetivos propostos e fornecendo subsídios para futuras análises hidrológicas da bacia. Para tanto, recomenda-se a realização de monitoramento hidrológico da região, permitindo comparar os resultados do modelo com dados reais e validar os padrões observados. Além disso, sugere-se a ampliação das análises, incorporando novos níveis de discretização espacial e diferentes tempos de retorno, de forma a subsidiar o planejamento de medidas eficazes de controle de cheias na bacia.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Lizane; SERRA, Juan Carlos Valdés. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista FAE**, Curitiba, v.20, n. 1, p. 129-137, jan./jun. 2017.
- AMARAL *et al.* Official and unofficial data supporting disaster risk management in medium-sized cities. **Natural Hazards Research**, [s.l.], v. 3, n. 1, p. 89-96, mar. 2023.
- ARAÚJO, Anne Santos. **Análise e proposição de medidas sustentáveis em drenagem urbana na região do Lago Norte - DF por meio de modelagem hidrológica-hidráulica**. 2018. 68 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade de Brasília, Brasília, 2018.
- BALBINOT, Rafaelo *et al.* O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. **Revista Ambiência**, Guarapuava, v. 4, n. 1, p. 131-149, jan./abr. 2008.
- BAUNGARTEN, Ana Paula; FELIX, Daniele; MÜLLER, Mauricio. Determinação da precipitação efetiva na bacia do rio Chopim através do método da curva número do SCS. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 15., 2003, Curitiba. **Anais [...]**. [s.l.]: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2007.
- BLAINSKI, Éverton; ACOSTA, Eileen; NOGUEIRA, Patrícia Carvalho do Prado. Calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica do litoral norte catarinense. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 12, n. 2, p. 226-237, mar./abr. 2017.
- BRAGA, Benedito *et al.* **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.
- BRITO, Andressa Karla Holanda. **O impacto do período chuvoso de 2017 na bacia hidrográfica do Rio Paraíba do meio**. 2018. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário CESMAC, Maceió, AL, 2018.
- BUARQUE, Diogo Costa; PAZ, Adriano Rolim; COLISCHONN, Walter. Extração automática de parâmetros físicos de bacias hidrográficas a partir do MNT para utilização em modelos hidrológicos. *In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO SUL-SUDESTE*, 2., 2008, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. [s.l.]: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2008.
- BUENO, Lara F.; GALBIATTI, João A.; BORGES, Maurício J. Monitoramento de variáveis de qualidade da água do Horto Ouro Verde – Conchal-SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n. 3, p. 742-748, set./dez. 2005.
- BUENO, Eduardo de Oliveira *et al.* Desempenho do modelo SWAT para diferentes critérios de geração de unidades de resposta hidrológica. **Revista Scientia Agraria**, Curitiba, v.18, n. 2, p. 114-125, abr./jun. 2017.
- CALDEIRA, Tamara Leitzke *et al.* Modelagem hidrológica determinística chuva-vazão em bacias hidrográficas: uma abordagem introdutória. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, Pelotas, v.5, n. 1, p. 22-32, jul. 2018.

CANHOLI, Aluísio Pardo. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2.ed. São Paulo: Oficina de textos, 2015.

CARVALHO, Luiz Gustavo de Souza. **Modelos hidrológicos para pequenas bacias: um estudo teórico-experimental**. 2020. 167 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2020.

CAVALCANTI, Allana Abreu. **Utilização do software SMWW na modelagem hidrológica da sub-bacia do ribeirão Vai e Volta - Poços de Caldas/MG**. 2020. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2020.

CHRISTOFIDIS, Demetrios; ASSUMPÇÃO, Rafaela dos Santos Facchetti Vinhaes; KLIGERMAN, Cynamon. A evolução histórica da drenagem urbana: da drenagem tradicional à sintonia com a natureza. **Saúde Debate**, Rio de Janeiro, v.43, n. 3, p. 94-108, dez. 2019.

CHRISTOFOLETTE, Antonio. **Modelagem de sistemas ambientais**. 1.ed. São Paulo: Blucher, 1999.

CLARKE, Robin Thomas; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli; COLLISCHONN, Walter. Variabilidade temporal no regime hidrológico da bacia do rio Paraguai. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.l], v. 8, n. 1, p. 201-211, jan./mar. 2003.

COELHO NETTO, Ana Luiza; AVELAR, André de Souza. Uso da terra e a dinâmica hidrológica. In: SANTOS, Rozely Ferreira dos (org.). **Vulnerabilidade Ambiental: Desastres naturais ou fenômenos induzidos?**. Brasília: MMA, 2007. p. 60-73.

COLLISCHONN, Walter. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. 194 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

COLLISCHONN, Walter; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Simulação hidrológica de grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.6, n. 1, p. 95-118, jan./mar. 2001.

COLLISCHONN, Walter; TASSI, Rutinéia. **Introduzindo Hidrologia**. 7 ed. Santa Catarina: IPH-UFRS, 2010.

COLLODEL, Milena Gardai. **Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão**. 2009. 219 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

COSTA, Maria Elisa Leite; TSUJI, Thays Mitsuko; KOIDE, Sérgio. Modelagem hidrológica e hidráulica utilizando o SWMM – *Storm Water Management Model* na bacia urbana do Riacho Fundo I – Distrito Federal. **Research Society and Development**, [s.l], v.10, n. 1, p. 1-15, jan. 2021.

CRUZ, Marcus Aurélio Soares; SOUZA, Christopher Freire; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Controle da drenagem urbana no Brasil: avanços e mecanismos para sua sustentabilidade. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2007, São Paulo. **Anais [...]**. [s.l]: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2007.

DORANTI-TIRITAN, Carolina *et al.* Evolução do relevo da região do planalto de Poços de Caldas (SP/MG) baseado em dados de termocronologia de baixa temperatura e modelagem termocinética 3D. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v.15, n. 2, p. 291-310, abr./jun. 2014.

EID, Nabil J.; CAMPANA, Nestor A; COSTA, Jeferson da. Aplicação de distintas discretizações espaciais no modelo hidrológico concentrado precipitação-vazão HEC-HMS. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15., 2003, Curitiba. **Anais [...]**. [s.l.]: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 6.ed. Brasília: EMBRAPA, 2025.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Storm Water Management Model (SWMM)**. [s.l.]: EPA, 2023. Disponível em: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>. Acesso em: 24 fev. 2024.

FARIA, Nilma de Oliveira; BARBASSA, Ademir Paceli; SILVEIRA, Alexandre. Monitoramento, modelagem e simulação de cenários para a bacia do Córrego Barbado – Cuiabá/MT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.19, n. 1, p. 165-176, jan./mar. 2014.

FILHO, Gilberto Milhomem Marinho *et al.* Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v.6, n. 2, p. 35-47, 2012.

FRANCISCO, Nathália Mariane. **Da objetividade do risco à subjetividade da sua percepção: dimensões do risco socioambiental no Jardim Kennedy em Poços de Caldas – MG**. 2024. 323 f. Exame de qualificação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024.

FREITAS, João Paulo Oliveira de. Distribuição de água de chuva em Mata Atlântica. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v.9, n. 2, p. 100-108, ago. 2013.

GARCIA, Joaquin Ignacio Bonnacarrère; PAIVA, Eloiza Maria Cauduro Dias de. Monitoramento Hidrológico e Modelagem da Drenagem Urbana da Bacia do Arroio Cancela - RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.11, n. 4, p. 99-108, out./dez. 2006.

GONTIJO, Nebai Tavares. **Avaliação das relações de frequência entre precipitações e enchentes raras por meio de séries sintéticas e simulação hidrológica**. 2007. 156 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

GUIMARÃES, Rita Cabral. Ciclo Hidrológico. *In*: SHAHIDIAN, Sakib; GUIMARÃES, Rita cabral; RODRIGUES, Carlos Miranda (eds.). **Hidrologia Agrícola**. Évora: ICAAM: Universidade de Évora, 2012. cap. 1, p. 1-4.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades e Estados**: Poços de Caldas, Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/pocos-de-caldas/panorama>. Acesso em: 20 fev. 2025.

- KÖPPEN, W. **Climatologia: Con un estudio de los climas de la tierra**. 1 ed. México: Fondo de Cultura Econômica, 1948.
- LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E HIDRÁULICA EM SANEAMENTO (LENHS). **Manual do Usuário EPA SWMM 5.0 (Tradução)**. João Pessoa: UFPB, 2012.
- LIMA, Guilherme de *et al.* Análise de incertezas de observações hidrológicas e sua influência na modelagem de pequenas bacias urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.12, n. 1, p. 107-116, jan./mar. 2007.
- LIMA, João Pedroso de. Introdução. *In*: MARTINS, Cristina Maria Tavares *et al.* **Hidrologia urbana: Conceitos básicos**. Lisboa: Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos: Universidade de Coimbra, 2010. cap. 1, p. 1-3.
- LINSLEY, Ray K.; FRANZINI, Joseph B. **Engenharia de Recursos Hídricos: Tradução e adaptação de Luiz Américo Pastorino**. São Paulo: McGraw-Hill, 1978.
- LOU, Rodrigo Furtado. **Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do rio Piabanha/RJ**. 2010. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- MACHADO, R.E.; VETTORAZZI, C.A. Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n. 4, p. 735-741, ago. 2003.
- MELLO, Carlos Rogério de; SILVA, Antônio Marciano da. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Lavras: UFLA, 2013.
- MELLO, Eloy Lemos de. **Modelo de suporte à avaliação do impacto do uso e manejo do solo no balanço hídrico e nas perdas de solo**. 2009. 65 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.
- MORAES, Fernanda Tonizza; JIMÉNEZ-RUEDA, Jairo Roberto. Fisiografia da região do planalto de Poços de Caldas, MG/SP. **Revista Brasileira de Geociências**, v.38, n. 1, p. 196-208, mar. 2008.
- MOREIRA, Itamar Adilson. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros**. 2005. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidrológica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- NETO, Joaquim Francisco da Costa. **Distribuição espacial e temporal do escoamento superficial em bacias hidrográficas**. 2005. 141 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2005.
- PAIVA, Eloiza Maria Cauduro Dias de. Rede de monitoramento hidrológico. *In*: PAIVA, João Batista Dias de; PAIVA, Eloiza Maria Cauduro Dias de (orgs.). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001. cap. 17, p. 493-506.
- PAZ, Adriano Rolim da *et al.* Discretização de modelos hidrológicos de grande escala: grade regular x mini-bacias. *In*: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 19., 2011, Maceió. **Anais [...]**. [s.l.]: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2011.

PESSOA, André Vidal Portela; OBRACKZA, Marcelo; OHNUMA JÚNIOR, Alfredo Akira. Modelagem hidrológica e hidráulica e avaliação de cenários de amortecimento de cheias com a implantação de microreservatórios em lotes no bairro da Tijuca, RJ. *In: Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste e 15º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa, 17., 2022, Caruaru. Anais [...]. [s.l]: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2022.*

PIROLI, Edson Luís. Bacias hidrográficas: definições e representação. *In: Água e bacias hidrográficas: planejamento, gestão e manejo para enfrentamento das crises hídricas. São Paulo: Unesp Digital, 2022. p. 43-62. E-book. Disponível em: <https://books.scielo.org/id/wphz3/pdf/piroli-9786557142981-04.pdf>. Acesso em: 08 dez. 2025.*

PONTES, Paulo Rógenes Monteiro *et al.* Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.20, n. 4, p. 888-904, out./dez. 2015.

POÇOS DE CALDAS. Prefeitura Municipal. **Prefeitura desapropria dois terrenos em área de alagamento no Kennedy**. Poços de Caldas, MG, 16 set. 2022. Disponível em: <https://pocosdecaldas.mg.gov.br/noticias/prefeitura-desapropria-dois-terrenos-em-area-de-alagamento-no-kennedy/>. Acesso em: 31 jul. 2024.

RENNÓ, Camilo Daleles. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas**. 2004. 146 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

RENNÓ, Camilo Daleles; SOARES, João Vianeí. Conceitos básicos de modelagem hidrológica. *In: MEIRELLES, Margareth Simões Penello; CAMARA, Gilberto; ALMEIDA, Cláudia Maria de (eds.). Geomática: modelos e aplicações ambientais. Brasília: Embrapa, 2007. cap. 11, p. 529-556.*

ROCHA, Maria de Jesus Delmiro; PEREIRA, Silvano Porto; LIMA NETO, Iran Eduardo. Integração do SWMM e ferramentas SIG para modelagem hidrológico-hidráulica de bacia complexa. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l], v.26, n. 3, p. 451-459, maio/jun. 2021.

ROCHA, Nayda. **Planejamento urbano da bacia do Córrego Samambaia (Goiânia-GO) utilizando o SWMM – Storm Water Management Model**. 2013. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Meio Ambiente) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

RODRIGUES, Gisele Carvalho; SANTINI JUNIOR, Maurício Antonio. Avaliação do emprego de técnicas compensatórias na sub-bacia urbana Ribeirão do Santa Rita do município de Fernandópolis, São Paulo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l], v.26, n. 2, p. 231-237, mar./abr. 2021.

RODRIGUES, Lineu Neiva; PRUSKI, Fernando Falco. Fundamentos e benefícios do sistema de integração lavoura-pecuária-floresta para os recursos hídricos. *In: BUNGENSTAB, Davi José et al. (eds.). ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta. Brasília: Embrapa, 2019. cap. 13, p. 182-194.*

SAMPAIO JÚNIOR, James de Melo *et al.* Modelagem de Sistema de Drenagem com Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID). **Paranoá**, [s.l], v.16, n. 34, p. 1-21, jan./jun. 2023.

- SANTOS, Reginaldo Braz dos. **Previsão em bacias não monitoradas: reflexos da iniciativa da Associação Internacional de Ciências Hidrológicas (IAHS) na comunidade hidrológica.** 2024. 83 f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação em Recursos Hídricos) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2024.
- SARDINHA, Diego de Souza *et al.* Base de dados de desastres naturais no município de Poços de Caldas/MG: ferramenta para o planejamento e a gestão territorial. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, [s.l.], v. 8, n. 3, p. 318-331, set./dez. 2016.
- SARTORI, Aderson; NETO, Francisco Lombardi; GENOVEZ, Abel Maia. 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**, Porto Alegre, v.10, n. 4, p. 05-18, out./dez. 2005.
- SHINMA, Taís Arriero. **Calibração multiobjetivo do SWMM aplicada à transformação chuva-vazão.** 2011. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- SILVA, Camila de Mello. **Efeito da conectividade hidráulica de superfícies impermeáveis na geração de escoamento superficial em áreas urbanas.** 2018. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.
- SILVA, Camila de Mello; SILVA, Gustavo Barbosa Lima. Efeito da discretização espacial na modelagem hidrológica com o uso do SWMM. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis. **Anais [...]**. [s.l.]: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2017.
- SILVA, Leonardo Pereira e. **Modelagem e geoprocessamento na identificação de áreas com risco de inundação e erosão na bacia do rio Cuiá-João Pessoa.** 2007. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2007.
- SILVEIRA, André Luiz Lopes da. 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, jan./mar. 2005.
- SILVEIRA NETO, José Paulo da. **Determinação dos efeitos da escolha do modelo chuva-vazão e da discretização em sub-bacias nos resultados da vazão máxima de hidrogramas e volumes de armazenamento de bacias de detenção.** 2021. 229 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.
- SILVEIRA NETO, José Paulo da *et al.* Efeito da discretização espacial da sub-bacia nos resultados do modelo hidrológico chuva-vazão. **Revista DAE**, São Paulo, v.71, n. 241, p. 78-91, jul./set. 2023.
- SOUZA, Daniel Henrique de *et al.* Comparação da dinâmica evolutiva, em longo e curto prazo, entre o planalto de Poços de Caldas e o planalto de São Pedro de Caldas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [s.l.], v.15, n. 2, abr./jun. 2014.

- TAVARES, Antonio Carlos; SILVA, Ane Caroline Freschi. Urbanização, chuvas de verão e inundações: uma análise episódica. **Climatologia e Estudos da Paisagem**, Rio Claro, v.3, n. 1, p. 4-18, jan./jun 2008.
- TINÓS, Thaís Minatel. **Mapeamento geológico-geotécnico a partir de metodologia de análise integrada: ensaio de aplicação no município de Poços de Caldas – MG**. 2011. 138 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2011.
- TONELLO, Kelly Cristina. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da cachoeira das Pombas, Guanhães, MG**. 2005. 69 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.
- TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: UFRGS: ABRH, 2001.
- TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Gerenciamento da drenagem urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 5-27, jan./mar. 2002.
- TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3.ed. Porto Alegre: UFRGS: ABRH, 2002.
- TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Drenagem Urbana. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 55, n. 4, p. 36-37, out./dez. 2003.
- TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Parâmetros do hidrograma unitário para bacias urbanas brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 2, p. 195-199, abr./jun. 2003.
- TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. **Modelos hidrológicos**. 2.ed. Porto Alegre: UFRGS: ABRH, 2005.
- TUNDISI, José Galizia. Ciclo Hidrológico e Gerenciamento Integrado. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v.55, n. 4, p. 31-33, out./dez. 2003.
- VALE, João Henrique do. “Não me lembro de situação parecida”, diz prefeito de Poços de Caldas após inundações. **Estado de Minas**, Belo Horizonte, 20 jan. 2016. Disponível em: [https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2016/01/20/interna\\_gerais,726838/nao-me-lembro-de-situacao-parecida-diz-prefeito-de-pocos-de-caldas.shtml](https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2016/01/20/interna_gerais,726838/nao-me-lembro-de-situacao-parecida-diz-prefeito-de-pocos-de-caldas.shtml). Acesso em: 18 jul. 2025.
- VENCESLAU, Fabio Reis; MIYAZAKI, Leda Correia Pedro. Processos, análises e gestão de bacias hidrográficas em ambientes urbanos: o caso do córrego São José-Ituiutaba/MG. **Revista Geografia em Atos**, Presidente Prudente, v.2, n. 1, p. 71-92, mar. 2019.
- WARREN, Morris Scherer. Integração de sensoriamento remoto e modelos hidrológicos para a estimativa da evapotranspiração: uma revisão bibliográfica. **GEOUSP: Espaço e Tempo**, São Paulo, v.17, n. 3, p. 143-159, 2013. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2013.75444>. Disponível em: <https://revistas.usp.br/geosp/article/view/75444>. Acesso em: 14 fev. 2025.
- WHEATER, Howard. Modeling hydrological process in arid and semi-arid areas: in introduction to the workshop. *In*: WHEATER, Howard; SOROOSHIAN, Soroosh;

SHARMA, K.D. (eds). **Hydrological modelling in arid na semi-arid areas**. Nova Iorque: Cambridge University Press, 2008, cap. 1, p. 1-20.

## APÊNDICES

**APÊNDICE A – DISTRIBUIÇÃO DAS ÁREAS POR TIPO DE USO E COBERTURA  
DO SOLO**

Tabela 15 – Valores absolutos e relativos para cada classe de uso e cobertura do solo

(continua)

Classes	7 SB													
	Áreas SB1		Áreas SB2		Áreas SB3		Áreas SB4		Áreas SB5		Áreas SB6		Áreas SB7	
	km <sup>2</sup>	(%)	km <sup>2</sup>	(%)	km <sup>2</sup>	(%)	km <sup>2</sup>	(%)	km <sup>2</sup>	(%)	km <sup>2</sup>	(%)	km <sup>2</sup>	(%)
Vegetação densa	2,72	44,09	2,51	35,38	3,98	50,16	3,17	38,39	0,32	17,99	1,22	25,75	1,43	26,52
Vegetação rasteira	1,67	27,03	1,94	27,29	1,98	24,90	2,18	26,40	0,60	33,84	0,89	18,84	1,50	27,84
Solo exposto	0,14	2,27	0,05	0,68	0,02	0,30	0,08	0,93	0,02	1,07	0,12	2,49	0,34	6,30
Corpo d'água	0,12	1,98	0,07	1,03	0,03	0,43	0,01	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	3,33
Área urbanizada	0,28	4,52	0,32	4,51	0,28	3,55	1,47	17,74	0,64	35,87	1,94	40,93	1,19	22,13
Área de cultivo	1,24	20,12	2,21	31,11	1,64	20,66	1,36	16,45	0,20	11,11	0,57	11,95	0,75	13,89
<b>Soma</b>	<b>6,17</b>	<b>100</b>	<b>7,09</b>	<b>100</b>	<b>7,94</b>	<b>100</b>	<b>8,26</b>	<b>100</b>	<b>1,77</b>	<b>100</b>	<b>4,75</b>	<b>100</b>	<b>5,38</b>	<b>100</b>
Classes	6 SB													
	Áreas SB1		Áreas SB2		Áreas SB3		Áreas SB4		Áreas SB5		Áreas SB6		..	
	km <sup>2</sup>	(%)	km <sup>2</sup>	(%)	km <sup>2</sup>	(%)	km <sup>2</sup>	(%)	km <sup>2</sup>	(%)	km <sup>2</sup>	(%)	..	..
Vegetação densa	2,72	44,09	2,51	35,38	3,98	50,16	3,17	38,39	1,54	23,64	1,43	26,52	..	..
Vegetação rasteira	1,67	27,03	1,94	27,29	1,98	24,90	2,18	26,40	1,49	22,92	1,50	27,84	..	..
Solo exposto	0,14	2,27	0,05	0,68	0,02	0,30	0,08	0,93	0,14	2,10	0,34	6,30	..	..
Corpo d'água	0,12	1,98	0,07	1,03	0,03	0,43	0,01	0,08	0,00	0,00	0,18	3,33	..	..
Área urbanizada	0,28	4,52	0,32	4,51	0,28	3,55	1,47	17,74	2,58	39,55	1,19	22,13	..	..
Área de cultivo	1,24	20,12	2,21	31,11	1,64	20,66	1,36	16,45	0,76	11,72	0,75	13,89	..	..
<b>Soma</b>	<b>6,17</b>	<b>100</b>	<b>7,09</b>	<b>100</b>	<b>7,94</b>	<b>100</b>	<b>8,26</b>	<b>100</b>	<b>6,52</b>	<b>100</b>	<b>5,38</b>	<b>100</b>	<b>..</b>	<b>..</b>
Classes	5 SB													
	Áreas SB1		Áreas SB2		Áreas SB3		Áreas SB4		Áreas SB5		..		..	
	km <sup>2</sup>	(%)	km <sup>2</sup>	(%)	km <sup>2</sup>	(%)	km <sup>2</sup>	(%)	km <sup>2</sup>	(%)	..	..	..	..
Vegetação densa	5,23	39,43	3,98	50,16	3,17	38,39	1,54	23,64	1,43	26,52	..	..	..	..
Vegetação rasteira	3,60	27,17	1,98	24,90	2,18	26,40	1,49	22,92	1,50	27,84	..	..	..	..
Solo exposto	0,19	1,42	0,02	0,30	0,08	0,93	0,14	2,10	0,34	6,30	..	..	..	..
Corpo d'água	0,20	1,47	0,03	0,43	0,01	0,08	0,00	0,00	0,18	3,33	..	..	..	..
Área urbanizada	0,60	4,52	0,28	3,55	1,47	17,74	2,58	39,55	1,19	22,13	..	..	..	..
Área de cultivo	3,45	25,99	1,64	20,66	1,36	16,45	0,76	11,72	0,75	13,89	..	..	..	..
<b>Soma</b>	<b>13,27</b>	<b>100</b>	<b>7,94</b>	<b>100</b>	<b>8,26</b>	<b>100</b>	<b>6,52</b>	<b>100</b>	<b>5,38</b>	<b>100</b>	<b>..</b>	<b>..</b>	<b>..</b>	<b>..</b>



Tabela 15 – Valores absolutos e relativos para cada classe de uso e cobertura do solo  
(conclusão)

Classes	1SB													
	Áreas SB1		..		..		..		..		..		..	
	km <sup>2</sup>	(%)	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
Vegetação rasteira	10,76	26,01	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
Solo exposto	0,76	1,84	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
Corpo d'água	0,42	1,02	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
Área urbanizada	6,11	14,77	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
Área de cultivo	7,96	19,24	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
<b>Soma</b>	41,37	100	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..

Fonte: Autora (2025).

## APÊNDICE B – CN POR CLASSE DE USO E TIPO DE SOLO NAS SUB-BACIAS

Tabela 16 – Valores de CN por tipo de solo e classes de uso e ocupação discriminados por sub-bacia

(continua)

7 SB														
Classes	Área/CN SB1 (C)		Área/CN SB2 (C)		Área/CN SB3 (D)		Área/CN SB4 (D)		Área/CN SB5 (D)		Área/CN SB6 (D)		Área/CN SB7 (D)	
	km <sup>2</sup>	CN	km <sup>2</sup>	CN	km <sup>2</sup>	CN	km <sup>2</sup>	CN	km <sup>2</sup>	CN	km <sup>2</sup>	CN	km <sup>2</sup>	CN
Vegetação densa	2,72	70	2,51	70	3,98	77	3,17	77	0,32	77	1,22	77	1,43	77
Vegetação rasteira	1,67	71	1,94	71	1,98	58	2,18	58	0,60	58	0,89	58	1,50	58
Solo exposto	0,14	87	0,05	87	0,02	89	0,08	89	0,02	89	0,12	89	0,34	89
Corpo d'água	0,12	100	0,07	100	0,03	100	0,01	100	0,00	100	0,00	100	0,18	100
Área urbanizada	0,28	90	0,32	90	0,28	92	1,47	92	0,64	92	1,94	92	1,19	92
Área de cultivo	1,24	78	2,21	78	1,64	81	1,36	81	0,20	81	0,57	81	0,75	81
<b>Soma/Média pond.</b>	<b>6,17</b>	<b>74</b>	<b>7,09</b>	<b>74</b>	<b>7,94</b>	<b>74</b>	<b>8,26</b>	<b>75</b>	<b>1,77</b>	<b>77</b>	<b>4,75</b>	<b>80</b>	<b>5,38</b>	<b>77</b>
6 SB														
Classes	Área/CN SB1 (C)		Área/CN SB2 (C)		Área/CN SB3 (D)		Área/CN SB4 (D)		Área/CN SB5 (D)		Área/CN SB6 (D)		..	
	km <sup>2</sup>	CN	km <sup>2</sup>	CN	km <sup>2</sup>	CN	km <sup>2</sup>	CN	km <sup>2</sup>	CN	km <sup>2</sup>	CN	..	..
Vegetação densa	2,72	70	2,51	70	3,98	77	3,17	77	1,54	77	1,43	77	..	..
Vegetação rasteira	1,67	71	1,94	71	1,98	58	2,18	58	1,49	58	1,50	58	..	..
Solo exposto	0,14	87	0,05	87	0,02	89	0,08	89	0,14	89	0,34	89	..	..
Corpo d'água	0,12	100	0,07	100	0,03	100	0,01	100	0,00	100	0,18	100	..	..
Área urbanizada	0,28	90	0,32	90	0,28	92	1,47	92	2,58	92	1,19	92	..	..
Área de cultivo	1,24	78	2,21	78	1,64	81	1,36	81	0,76	81	0,75	81	..	..
<b>Soma/Média pond.</b>	<b>6,17</b>	<b>74</b>	<b>7,09</b>	<b>74</b>	<b>7,94</b>	<b>74</b>	<b>8,26</b>	<b>75</b>	<b>6,52</b>	<b>79</b>	<b>5,38</b>	<b>77</b>	<b>..</b>	<b>..</b>
5 SB														
Classes	Área/CN SB1 (C)		Área/CN SB2 (C)		Área/CN SB3 (D)		Área/CN SB4 (D)		Área/CN SB5 (D)		..		..	
	km <sup>2</sup>	CN	km <sup>2</sup>	CN	km <sup>2</sup>	CN	km <sup>2</sup>	CN	km <sup>2</sup>	CN	..	..	..	..
Vegetação densa	5,23	70	3,98	70	3,17	77	1,54	77	1,43	77	..	..	..	..
Vegetação rasteira	3,60	71	1,98	71	2,18	58	1,49	58	1,50	58	..	..	..	..
Solo exposto	0,19	87	0,02	87	0,08	89	0,14	89	0,34	89	..	..	..	..
Corpo d'água	0,20	100	0,03	100	0,01	100	0,00	100	0,18	100	..	..	..	..
Área urbanizada	0,60	90	0,28	90	1,47	92	2,58	92	1,19	92	..	..	..	..
Área de cultivo	3,45	78	1,64	78	1,36	81	0,76	81	0,75	81	..	..	..	..
<b>Soma/Média pond.</b>	<b>13,27</b>	<b>74</b>	<b>7,94</b>	<b>74</b>	<b>8,26</b>	<b>75</b>	<b>6,52</b>	<b>79</b>	<b>5,38</b>	<b>77</b>	<b>..</b>	<b>..</b>	<b>..</b>	<b>..</b>



Tabela 16 – Valores de CN por tipo de solo e classes de uso e ocupação discriminados por sub-bacia

(conclusão)

Classes	Área/CN SB1 (D)		1 SB											
	km <sup>2</sup>	(%)	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
Vegetação rasteira	10,76	58	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
Solo exposto	0,76	89	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
Corpo d'água	0,42	100	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
Área urbanizada	6,11	92	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
Área de cultivo	7,96	81	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
<b>Soma</b>	41,37	75	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..

Fonte: Autora (2025).