

Campus Porto Velho Calama
Coordenação do Curso Engenharia Civil

Raimundo Carneiro da Conceição Neto

Avaliação da influência da alteração no uso e cobertura do solo no escoamento superficial e vazão de pico na bacia do igarapé Tancredo Neves, Porto Velho, Rondônia.

Porto Velho

2025

Raimundo Carneiro da Conceição Neto

Avaliação da influência da alteração no uso e cobertura do solo no escoamento superficial e vazão de pico na bacia do igarapé Tancredo Neves, Porto Velho, Rondônia.

Monografia entregue como Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO), *Campus* Porto Velho Calama, como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel, junto ao Curso Engenharia Civil sob a orientação do professor Dr. Reginaldo Martins da Silva de Souza.

Porto Velho

2025

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Gerador de Ficha Catalográfica do IFRO.

Conceição Neto, Raimundo Carneiro da.

Avaliação da influência da alteração no uso e cobertura do solo no escoamento superficial e vazão de pico na bacia do igarapé Tancredo Neves, Porto Velho, Rondônia / Raimundo Carneiro da Conceição Neto. - Porto Velho, 2025.

72 f.: il.

Orientador(a): Prof. Dr. Reginaldo Martins da Silva de Souza.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO, Porto Velho, 2025.

1. vazão de pico. 2. escoamento superficial. 3. HEC-HMS. 4. Urbanização. 5. Igarapé Tancredo Neves. I. Souza, Reginaldo Martins da Silva de (orient.). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO. III. Título.

Bibliotecário(a) Responsável: Miria Santana Veiga, CRB-11/898

Avaliação da influência da alteração no uso e cobertura do solo no escoamento superficial e vazão de pico na bacia do igarapé Tancredo Neves, Porto Velho, Rondônia.

Monografia entregue como Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO), *Campus* Porto Velho Calama, como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel, junto ao Curso Engenharia Civil sob a orientação do professor Dr. Reginaldo Martins da Silva de Souza.

Porto Velho

2025

Aprovado em: 09/12/2025 pela banca examinadora.

gov.br Documento assinado digitalmente
FREDI RODRIGUES RAMOS DA SILVA
Data: 18/12/2025 15:44:14 -0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Membro interno da Banca

Prof. Me. Fredi Rodrigues Ramos da Silva, EBTT. CEC, IFRO

Evanleide Rodrigues da Silva

Membro externo da Banca

Ma. Evanleide Rodrigues

gov.br Documento assinado digitalmente
REGINALDO MARTINS DA SILVA DE SOUZA
Data: 18/12/2025 16:38:34 -0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Orientador

Prof. Dr. Reginaldo Martins da Silva de Souza, EBTT. CEC, IFRO

Dedico este trabalho à minha mãe, meu maior exemplo de amor, força e dedicação. Tudo o que sou e tudo o que sonho ser tem um pouco do seu cuidado, da sua luta e do seu carinho.

Obrigado por nunca soltar a minha mão, mesmo quando eu ainda não sabia para onde ir. Este trabalho é também seu.

Agradecimentos

De repente, aquilo que eu imaginei ser a parte mais simples de escrever tornou-se a mais desafiadora. As palavras, que antes pareciam tão óbvias, me escaparam quando tentei transformar em texto a gratidão que carrego. Percebi, então, que agradecer é mais sentir do que dizer.

Obrigado mãe por sempre me incentivar a estudar, mesmo não tendo tido essa oportunidade em sua própria vida, e que fez de tudo para que eu pudesse vivenciar essa experiência. A essa mulher, agradeço por todos os momentos em que estive ao meu lado e por todas as preocupações que teve durante estes sete anos de dedicação.

Obrigado por nunca me deixar faltar o essencial e por ser a base que me permitiu chegar até aqui. Seu filho finalmente tornou-se engenheiro, como sempre sonhou.

Sinto-me profundamente orgulhoso e realizado por poder compartilhar esta conquista com você. É uma honra tê-la ao meu lado para me ver realizar este sonho, que também é seu.

Agradeço também a toda a minha família pelo apoio incondicional ao longo de toda essa jornada. Cada um de vocês teve um papel fundamental para que eu chegasse até este dia.

Aos meus amigos, quero expressar minha imensa gratidão pelo apoio e incentivo em cada semestre, em cada prova e em cada sorriso compartilhado dentro da sala de aula.

Aos meus professores, deixo um sincero obrigado por cada ensinamento que me transmitiram.

Um agradecimento especial aos professores Celso José e Daniela Giovanini, pelas oportunidades que me proporcionaram durante a graduação e por acreditarem em meu potencial.

E, por último, mas não menos importante, quero agradecer ao meu orientador, Reginaldo Martins, e à sua esposa, Graziela Tejas, por todos os conselhos, oportunidades e orientações durante o PIBIC e este último trabalho. Obrigado por me mostrarem o "caminho das pedras" e por me ensinarem que fazer pesquisa não precisa ser um martírio, mas sim uma jornada de descobertas.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo analisar a evolução da vazão de pico e do comportamento hidrológico da Bacia Hidrográfica do Igarapé Tancredo Neves, localizada em Porto Velho–RO, comparando os anos de 1985 e 2023, a fim de compreender como as mudanças no uso e cobertura do solo influenciaram o escoamento superficial e a resposta da bacia aos eventos de precipitação. A pesquisa foi desenvolvida por meio de uma metodologia estruturada em três etapas principais. Na primeira etapa, elaborou-se a equação Intensidade-Duração-Frequência (IDF) utilizando dados da estação pluviométrica 82825D/A925D, com posterior organização das séries de máximas anuais, detecção e remoção de outliers por meio do método interquartil (IQR) e ajuste estatístico dos dados pela distribuição de Gumbel, permitindo obter parâmetros adequados para representar eventos extremos de chuva e gerar os hietogramas de projeto empregados nas simulações. Na segunda etapa, foram produzidos os mapas de uso e cobertura do solo e de escoamento superficial com o auxílio de técnicas de geoprocessamento, aplicação do Modelo Digital de Terreno (MDT) e uso do método SCS Curve Number (CN), que possibilitou estimar a capacidade de infiltração e as perdas iniciais para cada cenário analisado. As alterações no uso do solo mostraram significativo avanço da urbanização e redução das áreas vegetadas ao longo das últimas décadas, o que resultou no aumento do CN médio de 70 em 1985 para 75 em 2023, indicando menor infiltração e maior tendência ao escoamento direto. Na terceira etapa, realizou-se a modelagem hidrológica no software HEC-HMS, adotando o método SCS para a transformação chuva-vazão e utilizando as sub-bacias delimitadas automaticamente a partir do MDT, juntamente com os hietogramas gerados pela equação IDF ajustada. As simulações mostraram que a vazão de pico aumentou de 186,8 m³/s em 1985 para 232,5 m³/s em 2023, representando um acréscimo de 24,5%. Houve ainda um aumento de 23,7% no volume total escoado e uma antecipação aproximada de 10 minutos no tempo de ocorrência da vazão máxima, evidenciando uma resposta mais rápida da bacia aos eventos críticos de chuva. Os resultados demonstram que a bacia se tornou mais vulnerável hidrológicamente, com maior propensão a alagamentos, cheias e sobrecarga da drenagem urbana, resultado direto do aumento das áreas impermeabilizadas e da intensificação do escoamento superficial. Assim, o estudo reforça a importância de políticas de planejamento urbano, adoção de práticas sustentáveis de drenagem e monitoramento contínuo para reduzir riscos hidrológicos em áreas urbanizadas, sobretudo em regiões que passam por processos de expansão e ocupação acelerada como Porto Velho.

Palavras-chave: vazão de pico. escoamento superficial. HEC-HMS. Urbanização. Igarapé Tancredo Neves.

ABSTRACT

This study aimed to analyze the evolution of peak discharge and the hydrological behavior of the Igarapé Tancredo Neves Watershed, located in Porto Velho, Rondônia, comparing the years 1985 and 2023 in order to understand how changes in land use and land cover influenced surface runoff and the basin's response to rainfall events. The methodological approach was structured into three main phases. In the first phase, the Intensity-Duration-Frequency (IDF) equation was developed using rainfall data from station 82825D/A925D, followed by the organization of annual maximum series, detection and removal of outliers using the interquartile range (IQR) method, and statistical adjustment of the data using the Gumbel distribution. This process allowed the derivation of reliable parameters for representing extreme rainfall events and generating the design hyetographs used in the hydrological simulations. In the second phase, land use and land cover maps and surface runoff maps were produced using geoprocessing techniques, a Digital Terrain Model (DTM), and the SCS Curve Number (CN) method, which enabled the estimation of infiltration capacity and initial losses for each scenario. The analysis revealed a substantial expansion of urbanized areas and a reduction in vegetated zones over the past decades, resulting in an increase in the average CN from 70 in 1985 to 75 in 2023, indicating lower infiltration rates and a higher tendency for direct runoff. In the third phase, hydrological modeling was performed in the HEC-HMS software, adopting the SCS method for rainfall-runoff transformation and using sub-basins automatically delineated from the DTM, together with the hyetographs generated from the adjusted IDF equation. The simulations indicated that peak discharge rose from 186.8 m³/s in 1985 to 232.5 m³/s in 2023, representing an increase of 24.5%. There was also a 23.7% increase in the total runoff volume and an approximate 10-minute advance in the time of peak discharge, evidencing a faster hydrological response of the basin during critical rainfall events. These results demonstrate that the watershed has become more hydrologically vulnerable, with greater susceptibility to flooding, overflow events, and overloading of urban drainage systems, mainly due to the expansion of impervious surfaces and the intensification of surface runoff. Therefore, the study reinforces the importance of urban planning policies, sustainable drainage practices, and continuous hydrological monitoring to mitigate risks in urbanized areas, especially in regions undergoing rapid expansion and occupation such as Porto Velho.

Keywords: peak discharge. surface runoff. HEC-HMS. Urbanization. Igarapé Tancredo Neves.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Efeito da transformação de uma bacia rural em urbana.....	17
Figura 2 – Eventos de alagamentos na Zona Leste de Porto Velho.	18
Figura 3 – Processo simplificado do ciclo hidrológico	20
Figura 4 – Representação de uma bacia hidrográfica.....	20
Figura 5 - Tipos de chuva.....	21
Figura 6 - Pluviômetro Ville de Paris (A) e Pluviômetro de Hemann (B).	23
Figura 7 – Mapa de localização da Bacia Hidrográfica Igarapé Tancredo Neves.	28
Figura 8 – Mapa de localização da Bacia Hidrográfica Igarapé Tancredo Neves.	29
Figura 9 – Ilustração do hidrograma unitário e o Lag Time.....	39
Figura 10 – Dados referentes à máxima precipitação diária anual da série histórica.....	49
Figura 11 – Linearização da intensidade i (em mm/h), duração t (h) e parâmetro $(d) = 13$	51
Figura 12 – Valores de $\log Tr$ e $\log C$ para a obtenção dos parâmetros m e $\log k$	52
Figura 13 – Relação entre intensidades máximas de precipitações observadas e estimadas, com linha de tendência e o valor de R^2	53
Figura 14 – Uso e cobertura do solo da Bacia Hidrográfica Igarapé Tancredo Neves no ano de 1985.	54
Figura 15 – Uso e cobertura do solo da Bacia Hidrográfica Igarapé Tancredo Neves no ano de 2023.	55
Figura 16 – Escoamento superficial na Bacia Hidrográfica do Igarapé Tancredo Neves no ano de 1985.	57
Figura 17 – Escoamento superficial na Bacia Hidrográfica do Igarapé Tancredo Neves no ano de 2023.	58
Figura 18 – Disposição das Sub-bacias e trechos de rios no ambiente Hec-Hms.....	61
Figura 19 – Vazão de pico para o ano de 1985	62
Figura 20 – Vazão de pico para o ano de 2023	62
Figura 21 – Resumo dos resultados para o ano de 2023	63
Figura 22 – Resumo dos resultados para o ano de 2023	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Intervalos de NDVI e suas respectivas classes.	35
Tabela 2 – Intervalos de NDVI e suas respectivas classes.	36
Tabela 3 – Precipitações pluviométricas máximas obtidas na estação meteorológica 82825D/A925D.	48
Tabela 4 - Dados de precipitações máximas (em mm) obtidos pela distribuição estatística de Gumbel de um dia para cada tempo de retorno.	49
Tabela 5 - Intensidades das chuvas, em mm/h, a partir da desagregação dos dados de precipitações obtidos na distribuição de Gumbel.	50
Tabela 6 - Valores obtidos para os parâmetros de log C, n e d necessários à definição da curva IDF.	51
Tabela 7 - Valores obtidos para os parâmetros de log C, n e d necessários à definição da curva IDF.	52
Tabela 8 - Parâmetros para a Equação IDF.	52
Tabela 9 – Valores da quantificação das classes de solos em km ² e porcentagem.	56
Tabela 10 – Valores da quantificação dos tipos de escoamento em km ² e porcentagem.	59
Tabela 11 – Dados do Rio 01.	60
Tabela 12 – Dados do Rio 02.	60
Tabela 13 – Dados do Rio 03.	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CN	Curve Number
I	Intensidade
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
Ia	Perdas iniciais, estimado em 0,2S
t	Tempo de duração da chuva
Tr	Tempo de retorno
Xi	Precipitação máxima diária
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
SCS	Soil Conservation Service

LISTA DE SÍMBOLOS

mm	milímetros
mm/h	milímetros por hora
h	hora
m ³ /s	metros ao cubo por segundo
km	quilômetros
(%)	porcentagem
m	metro
km ²	quilômetros ao quadrado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos.....	16
1.1.1 Objetivo geral	16
1.1.2 Objetivo específico	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 A Urbanização e eventos de cheias.....	17
2.2 Ciclo Hidrológico	18
2.3 Bacia Hidrográfica.....	20
2.4 Precipitação.....	21
2.4.1 Medição das precipitações	22
2.4.2 Métodos utilizados para medir precipitações.....	23
2.5 Análise de Chuva a partir de estatística	24
2.5.1 Distribuição de Gumbel	24
2.6 Modelagem Hidrológica	24
2.7 Modelos Hidrológicos.....	25
2.8 HEC-HMS	26
3 METODOLOGIA.....	28
3.1 Área de estudo	28
3.2 Equação de chuva	29
3.3 Determinação do Uso e Ocupação do Solo	32
3.4 Definição dos valores de Curve Cumber (CN).....	35
3.5 Determinação da Capacidade de Infiltração Máxima e Escoamento Superficial	36
3.6 Modelo Digital De Terreno (MDT).....	36
3.7 Determinação da duração crítica da chuva de projeto	37
3.8 Método de transformação: Chuva-Vazão	38

3.9 Modelagem no HEC-HMS	39
3.9.1 Criando um Projeto e importação do MDT.....	40
3.9.2 Delimitação das Sub-Bacias no software HEC-HMS.....	41
3.9.3 Configuração das Sub-Bacias	42
3.9.4 Distribuição temporal da chuva	42
3.9.5 Parâmetros Hidrológicos da Bacia	43
3.9.6 Edição das Sub-Bacias e Configuração dos Rios.....	44
3.9.7 Inserção de Dados de Chuva e Configuração do Modelo Meteorológico	45
3.9.8 Configuração das Especificações de Controle	46
3.9.9 Simulação.....	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1 Equação IDF	48
4.1.1 Desagregação das Chuvas	50
4.1.2 Obtenção dos Parâmetros da Equação IDF	50
4.2 Uso E Cobertura do Solo	54
4.3 escoamento Superficial	57
4.4 Vazão de Pico	59
5 CONCLUSÃO.....	65
REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

As cidades são espaços dinâmicos em constante transformação, nos quais os limites entre o econômico, o social e o político se reconfiguram continuamente (Guimarães; Soares Filho, 2007; Corrêa, 2007). Nessa perspectiva, funcionam como depositárias e produtoras de bens e serviços, resultado da interação entre horizontalidades e verticalidades (Santos, 2013). O processo de urbanização, motor da expansão urbana, representa a transformação da paisagem natural em artificial, seguindo a lógica de circulação e acumulação do capital e trazendo consigo impactos sociais, ambientais e espaciais (Santos, 2008; Harvey, 2006). Entre esses impactos, destacam-se as alterações na dinâmica hidrológica, com aumento do escoamento superficial e redução da infiltração, agravados pela retirada da cobertura vegetal e pela ocupação desordenada, que favorecem a ocorrência de desastres socioambientais, bem a proliferação de doenças infecciosas e parasitárias (Silva, 2011).

A fim de minimizar tais efeitos, Botelho e Silva (2007) apontam a bacia hidrográfica como a unidade espacial mais adequada ao planejamento ambiental, por permitir uma abordagem sistêmica e integrada. Esse entendimento foi incorporado às políticas públicas com a criação da Lei Federal nº 9.433/97, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, superando a visão restrita à qualidade da água e incorporando os demais elementos do ciclo hidrológico (Brasil, 1997). De forma complementar, a Lei Estadual nº 255/2002 reforçou, em Rondônia, a necessidade de planejamento socioeconômico-ambiental considerando as limitações e potencialidades locais (Rondônia, 2002).

Neste contexto este estudo tem como objetivo analisar a vazão de pico do canal principal da bacia hidrográfica Igarapé Tancredo, em Porto Velho, contribuindo para a compreensão da evolução das cheias nessa região. A pesquisa busca também alertar a sociedade e o poder público sobre a necessidade de reavaliar o modelo de expansão urbana da capital, especialmente dentro dos limites da bacia estudada. Trata-se de uma área estratégica, localizada em uma zona de forte crescimento urbano, cuja ocupação foi impulsionada pelos ciclos econômicos da Amazônia (Santos, 2001) e, a partir da década de 1980, expandiu-se horizontalmente, seguindo-se a verticalização da malha urbana nos anos 2000 (Nascimento; Santos; Silva, 2012).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a variação da vazão de pico e a influência das alterações no uso e cobertura do solo sobre o escoamento superficial no canal principal da bacia hidrográfica do Igarapé Tancredo, no município de Porto Velho, Rondônia.

1.1.2 Objetivo específico

Os objetivos específicos são:

- Criar uma Equação de Intensidade-Duração-Frequência para Porto Velho-RO;
- Confeccionar mapas de uso e cobertura do solo e escoamento superficial da bacia hidrográfica Igarapé Tancredo;
- Simular as vazões máximas para o período de retorno e 100 anos no software HEC-HMS;

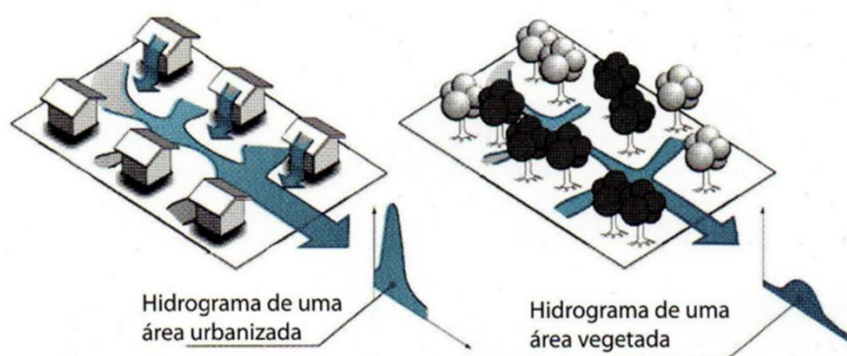
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Urbanização e eventos de cheias

O processo de desenvolvimento brasileiro entre as décadas de 1950 e 1980 foi marcado por um modelo econômico baseado na urbanização acelerada e em grandes investimentos estatais e privados. Nesse contexto, a expansão econômica do país que ao mesmo tempo o colocou entre as maiores economias mundiais e esteve diretamente associada à ocupação produtiva do território, muitas vezes conduzida sem o devido planejamento socioambiental (Machado, 2000). Trata-se de projetos econômicos de grande escala que foram implementados em quase todo o território brasileiro, com apoio governamental expressivo. Esses programas incentivaram a criação de polos de desenvolvimento, porém, em muitos casos, as iniciativas apresentavam características externas ao contexto local, gerando conflitos e desafios para as formas tradicionais de desenvolvimento regional (Machado, 2000).

A expansão urbana na maioria das cidades brasileiras ocorreu, então, para o atendimento da articulação de demandas econômicas externas e em processos acelerados que tem causado efeitos negativos para os moradores e seu convívio com o ambiente citadino, refletindo-se na piora da qualidade de vida. Entre esses efeitos estão o crescimento da ocorrência de inundações, a degradação da qualidade da água e o aumento do volume de resíduos sólidos presentes nas águas pluviais. Esses efeitos estão associados à impermeabilização do solo, à canalização das águas pluviais, à obstrução de rios e canais por lixo e sedimentos, além da presença de sistemas de drenagem mal planejados, o que intensifica os problemas de alagamento nas cidades (Tucci, 2007).

Figura 1 – Efeito da transformação de uma bacia rural em urbana



Fonte: Collischonn e Dornelles, 2013, p. 315

Porto Velho, como uma cidade média em fluxo de capitais, atraída por ações governamentais, mais especificamente a partir da implantação das obras do PAC, tem

apresentado um histórico recorrente de problemas socioambientais. As inundações e alagamentos nutrem estreita relação com o acelerado e desordenado processo de urbanização e são consequências das deficiências no sistema de drenagem pluvial (Righetto et al., 2017). Sendo tal cenário particularmente crítico na zona Leste do município, onde os moradores são frequentemente afetados por estes eventos, enfrentando prejuízos materiais, transtornos à mobilidade e riscos à saúde pública. A Figura 2 mostra os eventos recentes de alagamentos ocorridos na região leste de Porto Velho na data do dia 10 de fevereiro de 2025¹, o que evidencia a persistência do problema socioambiental analisado nesta pesquisa.

Figura 2 – Eventos de alagamentos na Zona Leste de Porto Velho.



Fonte: Rondônia ao vivo (2025).

Logo, fica evidente a necessidade de estudos sobre os efeitos das alterações do uso e cobertura do solo no escoamento superficial na bacia hidrográfica urbana do Igarapé Tancredo Neves, Porto Velho, Rondônia. Mas, que agora se configurem como preditivos e, assim, possam auxiliar a sociedade civil organizada, bem como o poder público a racionalizar a ocupação na bacia a partir do estabelecimento das zonas suscetíveis à ocorrência de inundações.

2.2 Ciclo Hidrológico

A infiltração é o processo pelo qual a água da chuva penetra no solo, sendo um componente essencial do ciclo hidrológico. Quando a intensidade da precipitação excede a

¹<https://rondoniaovivo.com/noticia/comunidade/2025/02/10/transtorno-temporais-alagam-varias-regioes-de-porto-velho.html>

capacidade de infiltração do solo, ocorre o escoamento superficial. Inicialmente, a água se acumula em depressões naturais do terreno e, após preenchê-las, escoam em direção aos canais de drenagem, concentrando-se nos vales e formando os cursos d'água que, por fim, deságuam em corpos hídricos maiores, como rios, lagos, mares e oceanos (Pinto et al., 2017). Assim, o ciclo hidrológico pode ser conceituado como um processo natural, contínuo e fechado, responsável pela movimentação da água entre a superfície terrestre e a atmosfera. A água circula por diferentes compartimentos do planeta, mudando apenas seu estado físico ou local de armazenamento. Esse movimento é impulsionado principalmente pela energia solar, pela força da gravidade e pela rotação da Terra, que atuam diretamente sobre os processos de evaporação, precipitação e escoamento.

O ciclo hidrológico é amplamente estudado em sua fase terrestre, onde se concentram os principais processos relacionados à gestão dos recursos hídricos, como o escoamento, a infiltração e a formação dos cursos d'água. Nessa perspectiva, a bacia hidrográfica é considerada a unidade fundamental de análise, por se tratar de uma área de captação natural que direciona os fluxos de água para um único ponto de saída, o exultório. Essa organização espacial é essencial para compreender e quantificar o comportamento da água no território, sendo uma base importante para o planejamento e a gestão sustentável dos recursos hídricos (Silveira et al., 2001).

Em ambientes naturais, o ciclo hidrológico tende a se manter em equilíbrio, com a infiltração, o escoamento e a evaporação ocorrendo de forma integrada. No entanto, a urbanização das bacias hidrográficas compromete esse equilíbrio ao introduzir intervenções como a impermeabilização do solo, a canalização de cursos d'água e a supressão da cobertura vegetal. Essas alterações reduzem significativamente a capacidade de infiltração da água no solo e intensificam o escoamento superficial, o que favorece a ocorrência de processos erosivos e inundações, impactando negativamente o funcionamento do ciclo hidrológico (Fritzen e Binda, 2011).

Figura 3 – Processo simplificado do ciclo hidrológico



Fonte: Collischonn e Dornelles, 2013, p. 19

2.3 Bacia Hidrográfica

Uma bacia hidrográfica é compreendida como um conjunto de territórios drenados por um rio e seus afluentes, originando-se nas elevações topográficas conhecidas como divisores de água (Barrela, 2001). As precipitações fluem superficialmente em direção às regiões mais baixas do relevo, configurando cursos d'água e, em alguns casos, penetram o solo para formar nascentes e aquíferos subterrâneos. À medida que essas águas se amalgamam, ocorre o aumento de volume, estabelecendo os rios primordiais. Esses rios subsequentemente se fundem com outros afluentes, continuando a aumentar em escala até desaguiarem nos oceanos, conforme pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Representação de uma bacia hidrográfica



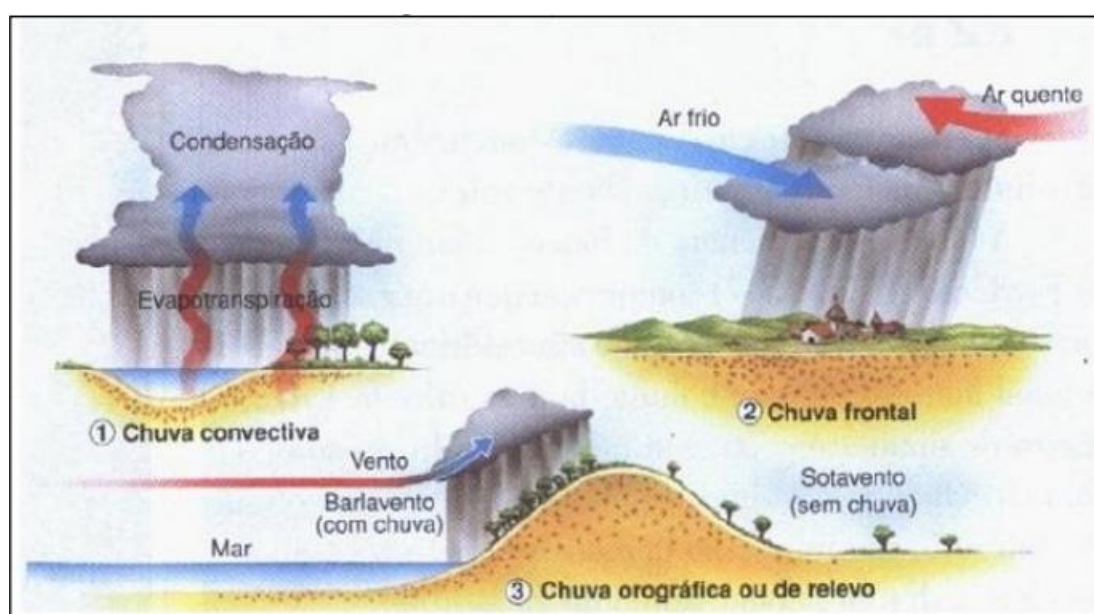
Fonte: (Freitas et al., 2015)

Observa-se, dessa maneira, que o conceito de uma bacia hidrográfica é forjado através de uma abordagem sistêmica de natureza aberta. Onde, a entrada de energia por meio dos fatores climáticos interage com o escoamento, envolvendo variáveis interdependentes que oscilam em torno de um padrão preexistente. Conseqüentemente, mesmo quando perturbado por intervenções humanas, um equilíbrio dinâmico tende a ser alcançado. Assim, qualquer alteração recorrente na entrada ou saída de energia, ou mesmo na estrutura do sistema, desencadeia uma resposta compensatória que visa minimizar os efeitos da mudança e restaurar o estado de equilíbrio dinâmico (Lima; Zakia, 2000).

2.4 Precipitação

De acordo com Sabino (2018), a precipitação pode ser entendida como a água originada do vapor presente na atmosfera que se deposita na superfície do planeta, manifestando-se como chuva, granizo, neblina, neve, orvalho ou geadas. Esse fenômeno surge a partir da elevação de massas de ar, o que provoca o resfriamento do vapor de água no ar, levando à sua condensação e à formação de minúsculas gotículas em suspensão, que se apresentam como névoa ou nuvens. Essas gotículas, ao se unirem a núcleos de condensação, como partículas de gelo ou poeira, aumentam de tamanho até não mais se sustentarem no ar e caírem, resultando na precipitação (HOLTZ, 1976; BRAGA, 2018).

Figura 5 - Tipos de chuva.



Fonte: Forsdyke (1978)

A presença de variados tipos de precipitação, como os ilustrados na Figura 5, aliada à distribuição diversificada dos recursos hídricos, justifica a irregularidade na distribuição e na força das chuvas, tanto em termos temporais quanto espaciais. Mesmo com essa flutuação, consegue-se estabelecer, para um mesmo local, o padrão das precipitações ao longo dos períodos (BRAGA, 2018).

De acordo com Holtz (1976), as chuvas convectivas possuem relevância significativa em empreendimentos de engenharia de menor porte, como sistemas de microdrenagem, graças ao alcance limitado de bacias hidrográficas menores. Já as chuvas orográficas e frontais são especialmente úteis para iniciativas de grande escala, incluindo o planejamento de barragens e reservatórios, gerenciamento de inundações, controle de erosão por água e atividades de navegação.

2.4.1 Medição das precipitações

Conforme Tucci e Bertoni (1993), as precipitações podem ser descritas por meio de quatro parâmetros quantificáveis, que incluem:

a. Altura pluviométrica: Considera-se que a água precipitada se acumula sobre uma superfície plana e impermeável, sem perdas por evaporação ou escoamento para fora da área. A altura média da camada de água formada nessa superfície é conhecida como altura pluviométrica. Ela é simbolizada por (P) ou (r) e medida em milímetros (mm). As medições ocorrem em estações pluviométricas.

b. Duração: Refere-se ao intervalo de tempo em que a chuva se manifesta, expresso em horas (h) ou minutos (min) e indicado pela letra (t).

c. Intensidade: Calcula-se como a razão entre a altura pluviométrica e a duração, representada por (i), de modo que $i = P/t$. Comumente, é indicada em mm/h ou mm/min.

d. Tempo de retorno ou tempo de recorrência: Também referido como frequência de ocorrência ou probabilidade de frequência, representa o intervalo médio anual no qual há probabilidade de que uma precipitação de certa intensidade seja atingida ou superada. É denotado pela sigla (Tr), que equivale ao inverso da probabilidade do evento.

No contexto de análises hidrológicas, é fundamental estimar, a partir de séries históricas de dados e com o emprego de métodos probabilísticos, as precipitações máximas possíveis em uma determinada região, considerando uma frequência específica (VILLELA & MATTOS, 1975).

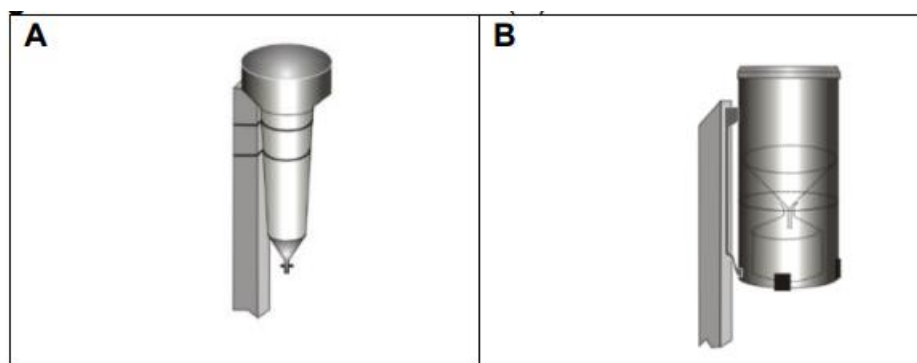
2.4.2 Métodos utilizados para medir precipitações

As medições de precipitação são efetuadas de modo pontual em estações pluviométricas ou pluviográficas, ou de maneira espacial, com o auxílio de radares meteorológicos e satélites. Essas estações, responsáveis por registrar a altura da chuva sob a premissa de uma distribuição teoricamente uniforme e imune à evaporação, podem ser convencionais, com instrumentos de medição fixados a 1,5 m acima do nível do solo e leituras realizadas manualmente, ou automáticas (GOMES, 2011; STEFFEN, 2018).

Os pluviômetros constituem os equipamentos de medição mais empregados, especialmente em contextos municipais, em virtude da simplicidade de instalação e manejo. Trata-se de dispositivos receptores de precipitação diária, compostos por um corpo cilíndrico dotado de um funil chamado coletor. A área de captura oscila entre 200 cm² e 400 cm², variando conforme o modelo, e geralmente a borda apresenta formato circular para atenuar a influência do vento (TUCCI, 2001; OLIVEIRA, 2017).

A Figura 6 mostra os tipos de pluviômetros mais utilizados em estações pluviométricas.

Figura 6 - Pluviômetro Ville de Paris (A) e Pluviômetro de Hemann (B).



Fonte: Varejão-Silva (2006)

De acordo com Gomes (2011), o modelo Ville de Paris, ilustrado na Figura 4a, representa o tipo mais frequente no Brasil. Esses pluviômetros não armazenam dados automaticamente, demandando leituras diárias por um operador, em geral a cada 24 horas. As medições costumam abranger o acumulado de precipitação das 7h do dia anterior até as 7h do dia da aferição, com o envio mensal das anotações à agência encarregada da estação (HOLTZ, 1976; BRAGA, 2018).

A leitura pode ser realizada com proveta graduada, régua ou balança precisa, sempre considerando a área de coleta do funil. As provetas pluviométricas possuem escalas que indicam

diretamente o total em milímetros, mas cada uma é compatível apenas com pluviômetros de área de captação idêntica à usada na sua calibração (VAREJÃO-SILVA, 2006).

2.5 Análise de Chuva a partir de estatística

A maioria dos eventos hidrológicos ocorre de maneira incerta, sendo descrita por leis de probabilidade influenciados principalmente por fatores aleatórios que não seguem uma regularidade definida, como as estações do ano e a variação da incidência dos raios solares sobre a superfície terrestre em função dos eixos polares (Naghetini e Pinto, 2007).

A aplicação dessas leis probabilísticas torna-se viável porque, embora os componentes dos fenômenos hidrológicos apresentem comportamento aleatório, eles manifestam certo grau de regularidade, que se torna mais evidente à medida que se dispõe de um maior conjunto de dados históricos para análise. Ainda que seja possível a previsão de determinados eventos, tal análise não possui caráter universal, uma vez que apresenta particularidades próprias de cada localidade (Feitosa Júnior, 2018).

2.5.1 Distribuição de Gumbel

De acordo com Alves et al. (2013), a distribuição de Gumbel é a mais empregada no ajuste de dados associados a eventos extremos máximos, uma vez que apresenta bom desempenho na modelagem de séries de precipitações máximas, além de permitir a estimativa de seus parâmetros por meio de cálculos relativamente simples. Atualmente, essa distribuição é amplamente utilizada em análises de frequência voltadas à previsão de enchentes e de precipitações máximas anuais, possibilitando a antecipação do comportamento das chuvas.

Ainda segundo Alves et al. (2013), o método baseia-se em dois parâmetros: o de escala e o de posição. O parâmetro de escala está relacionado à dispersão dos dados, enquanto o parâmetro de posição indica o deslocamento da distribuição ao longo do eixo horizontal.

2.6 Modelagem Hidrológica

A Modelagem hidrológica constitui-se como uma ferramenta para representar o comportamento de sistemas hídricos, permitindo analisar o impacto de alterações no uso do solo, obras hidráulicas ou mudanças climáticas sobre o regime hidrológico (Tucci, 2005). Inicialmente, o desenvolvimento de modelos hidrológicos estava direcionado, de forma

individualizada, ao estudo dos diversos componentes que constituem o ciclo hidrológico. Contudo, a evolução técnico-científica-informacional, especialmente a partir da década de 1970, que desencadeou uma revolução impulsionada pelo avanço dos computadores, sobretudo, fomentada principalmente pela difusão dos computadores pessoais, viabilizou o desenvolvimento de pesquisas que passaram a privilegiar à análise integrada dos componentes do ciclo hidrológico (Singh; Frevert, 2002).

Um dos enfoques principais da modelagem hidrológica, conforme afirmam Tucci e Bertoni (2003), tem sido a elaboração de zonas de inundação. O estabelecimento dessas zonas configura-se como uma das principais medidas não-estruturais de controle e prevenção de enchentes. Um exemplo, pode ser observado no estudo de Trentin, Robaina e Silveira (2013). Os pesquisadores elaboraram um zoneamento das áreas suscetíveis a inundações, combinando a probabilidade de ocorrência do evento com a vulnerabilidade da população local, resultando na classificação das áreas urbanas em quatro níveis de risco, que variaram de baixo a muito alto.

Outra abordagem, no entanto, ainda voltada para o zoneamento de locais sujeitos a inundação está associada à correlação entre o tempo de retorno de eventos extremos e a vazão do canal estudado. Nesse sentido, delimita-se uma faixa dentro do período de enchente de 100 anos, representando o evento mais intenso registrado. Dentro dessa faixa, as áreas são categorizadas com base no risco e na capacidade hidráulica resultante das cotas de cheia a montante e a jusante (Tucci, 2005).

2.7 Modelos Hidrológicos

Um modelo hidrológico tem por objetivo organizar de forma estruturada equações, a fim de apresentar, simular e explicar como funciona o comportamento de uma bacia hidrográfica. Os modelos hidrológicos podem ser classificados de acordo com Tucci (2005), a partir do tipo e da natureza das variáveis utilizadas, bem como são tratadas ao longo do tempo e espacialmente.

Os modelos hidrológicos podem ser classificados com base em diversos critérios, como o caráter das variáveis envolvidas (determinísticas ou estocásticas), o tipo de relação que estabelecem entre essas variáveis (conceituais ou empíricas), a forma de tratar os dados (contínua ou discreta), a consideração do espaço (modelos distribuídos ou concentrados) e a forma como o tempo é incorporado (estacionários ou dinâmicos) (Moreira, 2005).

Os modelos determinísticos, conforme definido por Clarke (1973), são aqueles em que todas as variáveis envolvidas são consideradas livres de qualquer variação aleatória, assumindo que os fenômenos seguem leis fixas e completamente previsíveis. Nesse tipo de modelagem, não se admite a presença de incertezas associadas aos dados ou ao comportamento do sistema hidrológico, de modo que, fornecido o mesmo conjunto de entradas, o modelo sempre produzirá o mesmo resultado. Tal abordagem ignora a aleatoriedade dos processos naturais, tratando-os como relações causais exatas, muitas vezes baseadas em equações físicas.

Por outro lado, os modelos estocásticos reconhecem que variáveis hidrológicas como precipitação e vazão estão sujeitas a flutuações naturais e incertezas inerentes aos processos ambientais. Clarke (1973) afirma que, nesses modelos, uma ou mais variáveis são tratadas como aleatórias, possuindo distribuições de probabilidade, e os resíduos do modelo também são interpretados como componentes estocásticos.

Assim, os modelos estocásticos incorporam explicitamente o caráter incerto dos dados e são especialmente úteis na previsão e análise de sistemas onde a variabilidade não pode ser desprezada. Eles permitem representar o comportamento médio do sistema, bem como sua variabilidade, oferecendo uma abordagem mais realista para muitos problemas hidrológicos. Essa estrutura é essencial quando se busca quantificar riscos ou incertezas em eventos extremos e planejamento hídrico.

2.8 HEC-HMS

O software HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) é um software desenvolvido pela U.S. Army Corps of Engineers para simular os processos hidrológicos em bacias hidrográficas com padrão de drenagem dendrítico. Ele permite a análise de eventos isolados por meio de métodos tradicionais, como infiltração, hidrogramas unitários e roteamento hidrológico. Além disso, o HEC-HMS possui recursos para simulações contínuas, incorporando processos como evapotranspiração, derretimento de neve e o balanço de umidade no solo. O programa também oferece ferramentas para simulações distribuídas por grade, com o uso do modelo ModClark, além de módulos complementares para previsão de vazões, otimização de modelos, transporte de sedimentos e qualidade da água. Sua interface gráfica e ambiente de trabalho integrado facilitam o desenvolvimento e a análise de diferentes cenários hidrológicos. (USACE, 2013).

Entre as múltiplas funcionalidades do HEC-HMS, destaca-se sua capacidade de simular a transformação de precipitação em vazão em bacias hidrográficas de diferentes características, abrangendo tanto ambientes urbanos quanto rurais. A partir da inserção de dados pluviométricos

observados ou projetados, o software permite reproduzir o comportamento hidrológico da bacia, gerando resultados essenciais como vazões de pico, volumes escoados e tempos de retorno de eventos críticos. Conforme documentado pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE-HEC, 2013), essa ferramenta possibilita a análise integrada do ciclo hidrológico, fornecendo subsídios técnicos para projetos de drenagem, gestão de recursos hídricos e estudos de impacto ambiental.

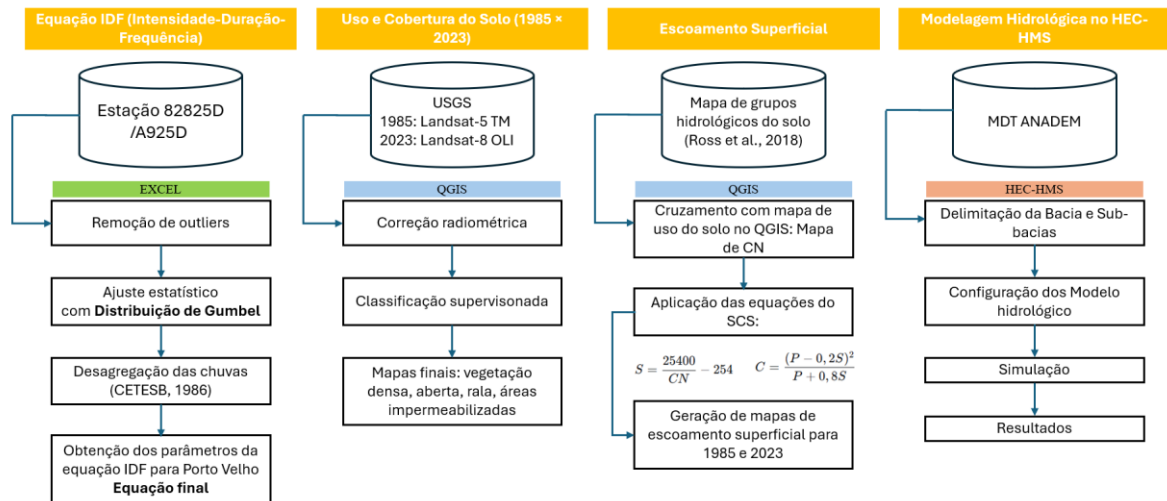
3 METODOLOGIA

Nesta seção, são apresentados os procedimentos metodológicos que orientaram a realização do estudo. A apresentação segue uma ordem lógica e sequencial, abrangendo desde a seleção e aquisição dos dados até as técnicas e ferramentas empregadas para o processamento e a análise das informações.

O trabalho é dividido em três etapas: Formulação da Equação Intensidade-Duração-Frequência, Análise do Uso e Cobertura do solo e Escoamento Superficial e por fim, a vazão de pico no canal principal da Bacia Hidrográfica Igarapé Tancredo Neves.

Figura 7 – Mapa de localização da Bacia Hidrográfica Igarapé Tancredo Neves.

MOTODOLOGIA

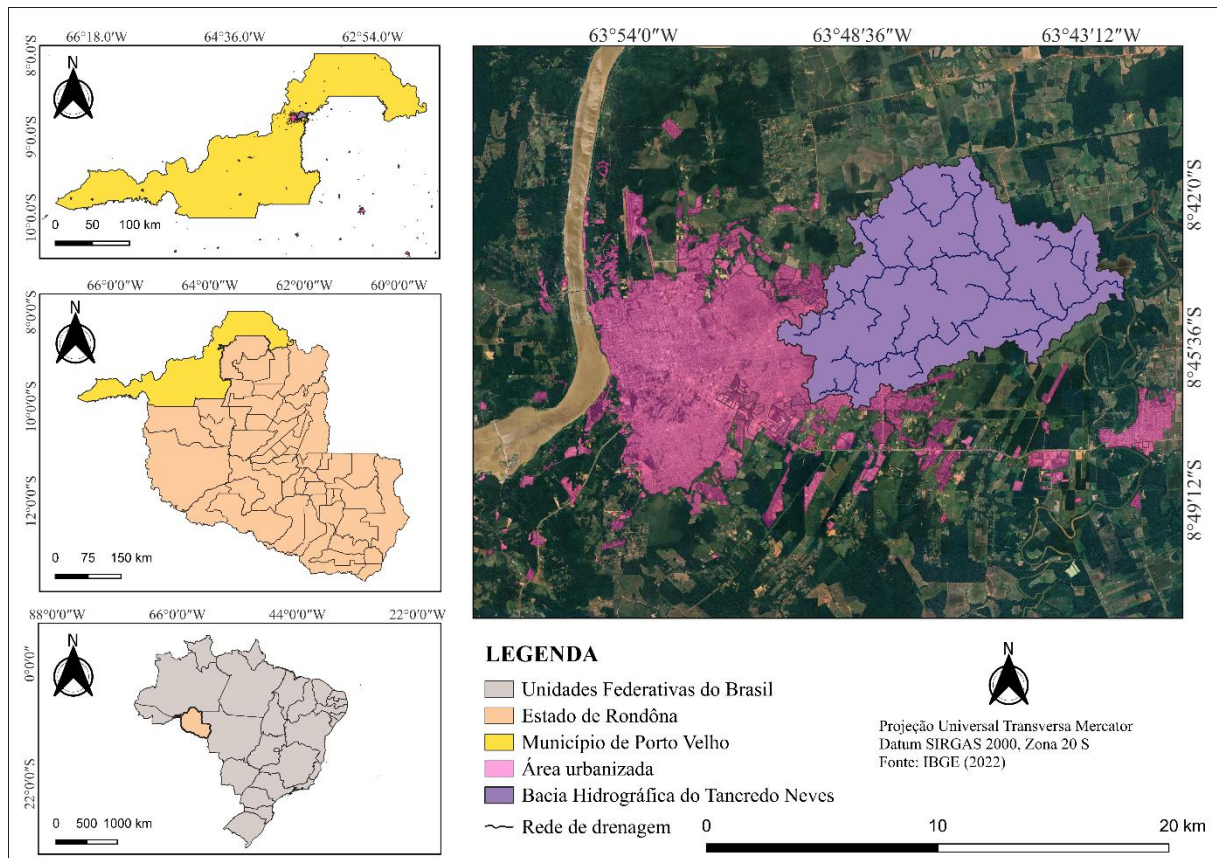


Fonte: Autor (2025).

3.1 Área de estudo

A área de estudo desta pesquisa está situada no município de Porto Velho, capital do estado de Rondônia, que possui uma população estimada em 460.413 habitantes (IBGE, 2022). Inserida na porção leste do município, encontra-se a Bacia Hidrográfica do Igarapé Tancredo Neves, objeto deste estudo. A bacia possui uma área aproximada de 62,48 km², com perímetro de 80,36 km e comprimento axial de 15,60 km. Está georreferenciada no sistema SIRGAS 2000/UTM zona 20S (EPSG:31980), abrangendo as coordenadas entre as latitudes -8°40'00" e -9°00'00" e longitudes -63°59'00" e -63°37'00" (Figura 8).

Figura 8 – Mapa de localização da Bacia Hidrográfica Igarapé Tancredo Neves.



Fonte: Autor (2025).

3.2 Equação de chuva

A metodologia empregada nesta seção foi baseada e adaptada da proposta de Pinto (2013), sendo estruturada em etapas que compreenderam: a organização dos dados pluviométricos, a identificação de valores atípicos (outliers), o ajuste estatístico dos dados por meio da distribuição de Gumbel, a desagregação das chuvas e, por fim, a determinação e avaliação dos parâmetros da equação IDF.

A série histórica de precipitação utilizada foi obtida na estação meteorológica 82825D/A925D, localizada na sede da Embrapa, em Porto Velho (latitude $8^{\circ} 47' 34''$ S e longitude $63^{\circ} 50' 46''$ W). Essa estação operou de forma convencional entre 1961 e 2007 e, a partir de então, de maneira automática até 2021, ano final considerado para análise. Após a verificação de outliers, os registros referentes aos anos de 1979, 1984 e 2000 foram desconsiderados, resultando em uma série de 58 anos efetivos para o estudo.

A identificação de outliers foi conduzida conforme o método descrito por Pinheiro (2013). Inicialmente, os valores anuais de precipitação máxima diária foram ordenados de forma crescente, sendo então determinadas a mediana geral, o menor e o maior valor da série,

além dos quartis inferior (Q_1) e superior (Q_3). O intervalo interquartil (IQR) foi calculado conforme a Equação 1, enquanto os limites de detecção de outliers (L_0) foram obtidos pela Equação 2. Foram considerados outliers os valores inferiores a ($Q_1 - L_0$) ou superiores a ($Q_3 + L_0$).

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (01)$$

Em que:

IQR – Intervalo interquartil;

Q_3 – Quartil superior;

Q_1 – Quartil inferior.

$$L_0 = IQR \times 1,5 \quad (02)$$

Em que:

L_0 – Intervalo interquartil;

IQR – intervalo interquartil.

A análise baseada na distribuição de Gumbel (X_i) foi realizada utilizando a Equação 5, considerando o tempo de retorno (Tr) e os coeficientes de escala (α) e posição (β), obtidos conforme as Equações 4 e 3, respectivamente. Nesse contexto, (\bar{x}) representa a média e (S) o desvio padrão das precipitações máximas diárias anuais.

$$\alpha = 1,2825/S \quad (03)$$

Em que:

α – Coeficiente de escala;

S – Desvio padrão.

$$\beta = \bar{x} - 0,45 \times S \quad (04)$$

Em que:

β – Coeficiente de posição;

\bar{x} – Média;

S – Desvio padrão.

$$X_i = \beta - \frac{1}{\alpha} \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{Tr} \right) \right] \quad (05)$$

Em que:

X_i – Precipitação máxima diária anual;

β – Coeficiente de posição;

α – Coeficiente de escala;

Tr – Tempo de retorno/recorrência.

Após a aplicação da distribuição de Gumbel para cada tempo de retorno analisado, foi realizada a desagregação das chuvas utilizando os coeficientes propostos pela CETESB (1986). A partir desse procedimento, determinaram-se as precipitações máximas (em mm) e as intensidades de chuva (em mm/h) para durações de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60, 360, 480, 600, 720 e 1440 minutos, considerando os períodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50 e 100 anos.

Com as intensidades de chuva definidas para cada duração (t) e tempo de retorno (Tr), foi possível determinar os parâmetros (K), (d), (m) e (n) da Equação 6. Também se aplicaram propriedades de equações potenciais e logarítmicas, substituindo o termo $(K \cdot Tr)^m$ pela variável (C), conforme apresentado na Equação 7.

$$i = \frac{K \cdot (tr)^m}{(t+d)^n} \quad (06)$$

Em que:

- i – Intensidade da Precipitação mm/h;
- K – Parâmetro da IDF;
- m – Parâmetro da IDF;
- t – Tempo de duração da precipitação;
- d – Parâmetro da IDF;
- n – Parâmetro da IDF;

$$i = \frac{C}{(t+d)^n} \quad (07)$$

Em que:

- i – Intensidade da Precipitação mm/h;
- C – Varável;
- t – Tempo de duração da precipitação;
- d – Parâmetro da IDF;
- n – Parâmetro da IDF;

Assim, os valores de n e $\log C$ (referentes à Equação 8) correspondem, respectivamente, aos coeficientes a e b da equação linear $y = a x + b$, que representa a regressão entre a intensidade (i) e a duração (t), considerando a introdução de uma constante (d) para a série histórica de precipitação em cada tempo de retorno (Tr).

Com o valor de $\log C$ determinado, procedeu-se à obtenção dos parâmetros m e $\log k$, conforme a Equação 9, mediante a aplicação de uma nova regressão linear que possibilitou definir os coeficientes a e b correspondentes à linearização entre $\log Tr$ e $\log C$. A partir desses

valores, foi possível estabelecer os parâmetros finais da equação IDF para a cidade de Porto Velho.

$$\log i = \log C - n \cdot \log (t + d) \quad (08)$$

Em que:

i – Intensidade da Precipitação mm/h;
 C – Varável;
 t – Tempo de duração da precipitação;
 d – Parâmetro da IDF;
 n – Parâmetro da IDF;

$$\log C = \log K - m \cdot \log Tr \quad (09)$$

Em que:

C – Varável;
 K – Parâmetro da IDF;
 m – Parâmetro da IDF;
 Tr – Tempo de retorno/recorrência.

Para avaliar os coeficientes (K), (d), (m) e (n) estimados pela metodologia adotada na formulação da equação IDF, aplicou-se o índice de concordância de Willmott (1981), apresentado na Equação 10. Nesse índice, e_i e o_i representam, respectivamente, os valores estimados e observados, enquanto \bar{o} corresponde à média dos valores observados. Além disso, utilizou-se o coeficiente de determinação (R^2), calculado pela razão entre a soma dos quadrados da regressão (SQReg) e a soma total dos quadrados (SQT). Ambos os indicadores variam de 0 a 1, sendo que valores mais próximos de 1 indicam melhor desempenho do ajuste da equação.

$$d = 100 \left[\frac{\sum (e_i - o_i)^2}{\sum (e_i - \bar{o})^2 + \sum (o_i - \bar{o})^2} \right] \quad (10)$$

Em que:

d = índice de concordância, em porcentagem;
 o_i, e_i = valores extremos observados e estimados, respectivamente;
 \bar{o} = média dos valores extremos observados.

3.3 Determinação do Uso e Ocupação do Solo

A determinação do uso e ocupação do solo, bem como a estimativa do escoamento superficial, foi realizada por meio da técnica de sensoriamento remoto, utilizando o processamento de imagens de satélite no formato raster (dados matriciais). Para este estudo,

empregaram-se imagens provenientes dos satélites LANDSAT-5 (sensor TM), correspondentes ao ano de 1985, e LANDSAT-8 (sensor OLI), referentes ao ano de 2023, ambas obtidas na Collection 2 Level-1, disponibilizada pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2025).

Os dados cartográficos vetoriais empregados nesta pesquisa foram obtidos em formato *shapefile* e disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022) e por Silva (2023). Para o cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), utilizaram-se dados matriciais provenientes dos sensores Thematic Mapper (TM) e Operational Land Imager (OLI), ambos pertencentes à série LANDSAT, correspondentes ao ano de 1985 e 2023, respectivamente. As imagens, pertencentes à Collection 2, Level-1, referem-se ao mês de julho e à órbita/ponto 232/66, e foram obtidas junto ao United States Geological Survey (USGS).

O pré-processamento das imagens LANDSAT foi realizado no software QGIS® 3.36. Inicialmente, efetuou-se o georreferenciamento dos dados matriciais para o sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM), zona 20 Sul, com o sistema geodésico de referência SIRGAS 2000. Na sequência, procederam-se às correções radiométricas de radiância e reflectância, utilizando os parâmetros disponibilizados nos arquivos de metadados (*MTL.txt*), seguindo as orientações metodológicas apresentadas por Evangelista et al. (2025).

As etapas envolveram a reprojeção, recorte da área de estudo, correção radiométrica e cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), com o objetivo de analisar a variação da cobertura vegetal ao longo dos anos.

Inicialmente, as bandas espectrais foram reprojctadas para o datum SIRGAS 2000, utilizando o sistema geodésico WGS 84 e a projeção UTM, zona 20S (EPSG: 32720). Para o LANDSAT-5 (TM), foram utilizadas as bandas 3 (vermelho) e 4 (infravermelho próximo), enquanto no LANDSAT-8 (OLI), utilizaram-se as bandas 4 (vermelho) e 5 (infravermelho próximo).

Na sequência, os valores de Número Digital (ND) foram convertidos em radiância espectral no topo da atmosfera ($L\lambda$), empregando o Raster Calculator do QGIS. Essa conversão foi realizada conforme as Equações 11 e 12, específicas para os sensores LANDSAT-5 (TM) e LANDSAT-8 (OLI), respectivamente.

$$L = [(L_{max} - L_{min}) / (DN_{max})] * DN + L_{min} \quad (11)$$

Em que:

L λ – radiância espectral no topo da atmosfera (TOA) (W/m²*srad* μ m);

Lmáx e Lmin – constantes de calibração para cada banda;

DNmáx – valor máximo do número digital (DNmáx=255);

DN – número digital de cada pixel.

$$L = ML * Q_{cal} + AL \quad (12)$$

Em que:

L λ – radiância espectral no topo da atmosfera (TOA) (W/m²*srad* μ m);

ML – fator multiplicativo reescalado da radiância para a banda específica (RADIANCE_MULT_BAND_x), onde x é número da banda;

Qcal – Valor quantizado calibrado por pixel em DN = Bandas da imagem;

AL – fator aditivo reescalado da radiância para a banda específica (RADIANCE_ADD_BAND_x), onde x é número da banda.

Depois de calcular a radiância, as imagens do Landsat 5 (bandas 3 e 4) passaram por correção atmosférica para obter a reflectância ($\rho\lambda$), usando a Equação 13.

$$\rho\lambda = (\pi * L * d^2) / (ESUN * \cos \Theta) \quad (13)$$

Em que:

$\rho\lambda$ – reflectância planetária no topo da atmosfera sem correção do ângulo solar;

π - 3.1415926

L λ – radiância espectral no topo da atmosfera (TOA) (W/m²*srad* μ m);

d² – distância terra-sol disponível no arquivo metadados de cada banda;

ESUN λ – Irradiância solar estratosférica média de cada banda. Na banda 3 (1536) e banda 4 (1031) ;

Cos Θ s – calculado através do azimute dos raios solares para cada imagem, disponível no metadados com SUN_AZIMUTH.

Para correção das imagens do satélite Landsat 8, sensor OLI (Operational Land Imager), bandas (4 e 5) utilizou-se a reflectância, conforme equação 14.

$$\rho\lambda = (M * Q_{cal} - A) / [\text{sen} (\text{sun_elevation} * \pi / 180)] \quad (14)$$

Em que:

$\rho\lambda$ – reflectância planetária no topo da atmosfera sem correção do ângulo solar;

Mp – fator multiplicativo reescalado de reflectância para a banda específica (REFLECTANCE_MULT_BAND_x), onde x é número da banda.

Qcal – Valor quantizado calibrado por pixel em DN = Bandas da imagem;

Ap – fator multiplicativo reescalado de reflectância para a banda específica (REFLECTANCE_ADD_BAND_x), onde x é número da banda;

Sun_elevation - $\pi/180$ - 0.01745

Após realização da aplicação das equações acima, separou os arquivos raster e usou a ferramenta do Raster Calculator para Equação 15 e 16 do NDVI do Landsat 5 e 8, respectivamente.

$$\text{NDVI} = (\text{Banda 4} - \text{Banda 3}) / (\text{Banda 4} + \text{Banda 3}) \quad (15)$$

Em que:

NDVI - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (adimensional);

Banda 3 - banda do vermelho (Red);

Banda 4 - banda do infravermelho próximo (Near Infrared – NIR).

$$\text{NDVI} = (\text{Banda 5} - \text{Banda 4}) / (\text{Banda 5} + \text{Banda 4}) \quad (16)$$

Em que:

NDVI - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (adimensional);

Banda 4 - banda do vermelho (Red);

Banda 5 - banda do infravermelho próximo (Near Infrared – NIR).

Por fim, para a definição das classes de uso e ocupação do solo utilizou-se avaliação Supervisionada com o auxílio do google Earth para classificar as formas de uso na região da bacia hidrográfica.

Foi feita a reclassificação por tabela do raster utilizando os seguintes intervalos do NDVI.

Tabela 1 – Intervalos de NDVI e suas respectivas classes.

Intervalo de NDVI	Classe temática
$-1,00 < \text{NDVI} \leq 0,00$	Água
$0,00 < \text{NDVI} \leq 0,10$	Alta impermeabilização
$0,10 < \text{NDVI} \leq 0,20$	Média impermeabilização
$0,20 < \text{NDVI} \leq 0,35$	Baixa impermeabilização
$0,35 < \text{NDVI} \leq 0,46$	Vegetação rala
$0,46 < \text{NDVI} \leq 0,54$	Vegetação aberta
$0,54 < \text{NDVI} \leq 0,63$	Vegetação de transição
$0,63 < \text{NDVI} \leq 1,00$	Vegetação densa

Fonte: Autor (2025).

3.4 Definição dos valores de Curve Cumber (CN)

Para a obtenção dos valores de Curve Number (CN), foi utilizado o mapa de grupos hidrológicos de solos elaborado por Ross et al. (2018). Inicialmente, o arquivo raster correspondente foi reprojetoado e recortado de acordo com os limites da área de estudo. Em seguida, procedeu-se ao cruzamento espacial entre esse mapa e o mapa de uso e cobertura do solo da bacia hidrográfica.

A etapa de integração dos dados foi executada no software QGIS®, por meio da ferramenta Raster Calculator, onde se realizou a multiplicação entre os dois mapas raster, de modo a relacionar as classes de solo aos respectivos tipos de cobertura. Essa operação resultou no mapa final de Curve Number (CN), que reflete a variabilidade espacial do potencial de escoamento superficial na área de estudo.

3.5 Determinação da Capacidade de Infiltração Máxima e Escoamento Superficial

A partir do mapa de Curve Number, foi possível encontrar os dados de capacidade máxima de infiltração e escoamento superficial da bacia estudada. Para a obtenção do mapa de capacidade máxima de infiltração foi aplicada a equação 17. Por fim, foi aplicada a equação 18 ao mapa de capacidade máxima de infiltração para obter os valores de escoamento superficial.

$$S=(25400 / CN)-254 \quad (17)$$

Em que:

CN = Curve number

S = coeficiente de armazenamento superficial, por infiltração, que está relacionado com os parâmetros que caracterizam a superfície (CN), dado em (mm)

$$C=(P-0,2.S)^2 / (P+0,8.S) \quad (18)$$

Em que:

P = precipitação acumulada, ou seja, a precipitação total de um evento de chuva máxima considerada (mm);

C = coeficiente de escoamento superficial, dado em (mm);

S = coeficiente de armazenamento superficial, por infiltração, que está relacionado com os parâmetros que caracterizam a superfície (CN), dado em (mm)

Para a definição dos tipos de escoamento utilizou-se novamente a classificação por tabela, tomando como base os intervalos dispostos na Tabela x.

Tabela 2 – Intervalos de NDVI e suas respectivas classes.

Intervalo	Escoamento
0 < valor ≤ 23	Muito Baixo
23 < valor ≤ 46	Baixo
46 < valor ≤ 69	Médio
69 < valor ≤ 92	Moderado
92 < valor ≤ 114	Elevado

Fonte: Autor (2025).

3.6 Modelo Digital De Terreno (MDT)

Para a modelagem hidrológica utilizou-se o modelo digital de terreno (MDT) ANADEM para servir como dado de entrada no software. O modelo digital de terreno (MDT)

representa a superfície topográfica do terreno, livre da influência de vegetação e construções, por meio de células georreferenciadas. Para aplicações em modelagens hidrológicas, é essencial um MDE de alta resolução espacial para garantir maior precisão nas simulações.

O ANADEM é um MDT desenvolvido para a América do Sul com resolução de 30 metros, derivado do modelo digital de elevação (MDE) Copernicus GLO-30, com remoção do viés causado pela vegetação (Laipelt, 2024). Trata-se de MDT desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS) em parceria com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) o modelo está disponível gratuitamente em formato GeoTIFF, organizado em tiles conforme o Military Grid Reference System (MGRS), além de poder ser acessado diretamente no Google Earth Engine (GEE).

3.7 Determinação da duração crítica da chuva de projeto

Para a obtenção da chuva de projeto utilizou-se da Equação de Intensidade, Duração e Frequência (IDF) proposta por Conceição Neto et al. (2024) e Equação 19.

$$i = \frac{1173,0054 \cdot (tr)^{0,1287}}{(t+13)^{0,7679}} \quad (19)$$

Em que:

i – Intensidade da Precipitação em mm/h;

Tr – Tempo de retorno/recorrência.

t – Tempo de duração da precipitação em min;

A precipitação obtida a partir da equação IDF foi distribuída ao longo do tempo de duração da chuva de projeto. Para essa finalidade, destacam-se dois métodos comumente utilizados. Um deles é o método do bloco alternado (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013), em que o pico de precipitação é posicionado no primeiro terço ou na metade do tempo total da chuva. O outro é o método de Huff (HUFF, 1967), que determina a posição do pico com base em uma análise estatística da distribuição temporal da chuva, considerando sua duração.

O estudo de Abreu, Sobrinha e Brandão (2017) destaca que a escolha do método de distribuição temporal das chuvas pode influenciar significativamente os resultados hidrológicos, gerando incertezas na transformação da chuva em vazão. Nesse sentido, o método de Huff apresenta vantagens por permitir uma desagregação temporal menos arbitrária e mais ajustada às características locais, tornando-se uma alternativa eficaz na padronização de chuvas de projeto conforme os objetivos e particularidades regionais. A duração de chuva de projeto

utilizada na distribuição temporal foi calculada por meio de gráficos de acordo com Innocente et al. (2018), de modo a obter a duração crítica da chuva.

3.8 Método de transformação: Chuva-Vazão

O método adotado para a transformação da chuva em vazão foi o Hidrograma Unitário triangular proposto pelo Soil Conservation Service (SCS). Esse método é utilizado para a propagação do escoamento na superfície da bacia. Essa entrada de dado é necessária para se gerar o Hidrograma a partir do hietograma da chuva. O modelo utiliza como principais variáveis de entrada o tempo de concentração da bacia e o tempo de retardo, lag time, permitindo a obtenção do hidrograma de escoamento direto gerado por uma chuva efetiva unitária. Para o cálculo do tempo de concentração, utilizou-se da equação de Kirpich (1940), originalmente desenvolvida para bacias hidrográficas rurais nos Estados Unidos.

$$Tc = 57 \left(\frac{L^3}{\Delta h} \right)^{0,385} \quad (20)$$

Em que:

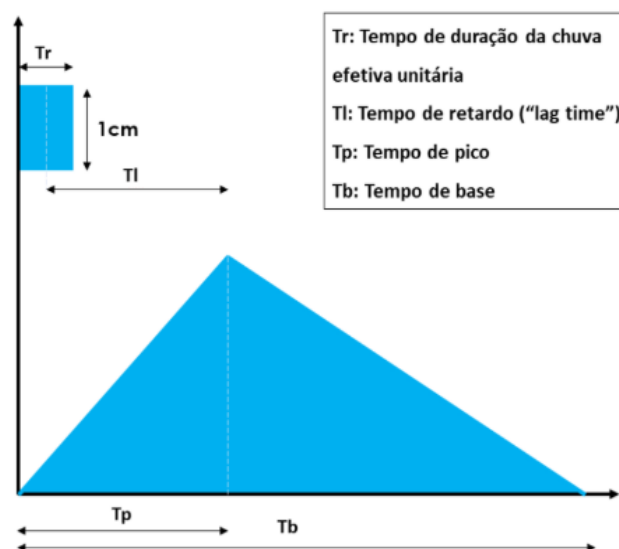
Tc - tempo de concentração;

L - Comprimento total do curso d'água principal da bacia;

Δh - diferença de nível entre o início e o final do curso d'água principal.

O tempo de retardo, *lag time*, representa o intervalo entre o centro da chuva e o instante em que ocorre a vazão de pico. Ele pode ser estimado graficamente como a distância entre o centro de massa da precipitação e o centro de gravidade do hidrograma de escoamento. Esse tempo corresponde, em média, a 60% do tempo de concentração da bacia, sendo fundamental para estimativas no traçado do hidrograma unitário, como pode ser observado na Figura 6.

Figura 9 – Ilustração do hidrograma unitário e o Lag Time



Fonte: Costa Junior (2022)

O método selecionado para a simulação do escoamento no canal foi o Muskingum-Cunge. Essa abordagem se destaca por exigir poucos dados de entrada e por ser especialmente adequada para canais com baixa declividade e presença de planícies de inundação (Mansano, 2024).

3.9 Modelagem no HEC-HMS

A modelagem hidrológica no software HEC-HMS demanda, como etapa preliminar, a compilação de dados físicos e hidrológicos referentes à bacia de estudo. Nesta fase, definiram-se as metodologias empregadas para a estimativa de parâmetros fundamentais, tais como a área das sub-bacias, a declividade do talvegue, o tempo de concentração, lag time e o curve number médio da bacia.

Para subsidiar a modelagem, conduziu-se um levantamento abrangente de atributos fisiográficos e hidrográficos da região analisada. Tais dados são imprescindíveis, uma vez que constituem a base de entrada para a simulação no ambiente HEC-HMS. Os dados fisiográficos, conforme referenciado por Tucci (2005), correspondem a parâmetros passíveis de extração a partir de produtos cartográficos, imagens de satélite e sensoriamento remoto. Nesta categoria incluem-se a delimitação de sub-bacias, a caracterização do uso e cobertura do solo, o tempo de concentração, o lag time, a altitude, a declividade, os comprimentos de canais e os índices

de cobertura superficial. Por sua vez, os dados hidrográficos englobam informações monitoradas, como séries históricas de vazão, precipitação e evaporação.

O processo de modelagem hidrológica no HEC-HMS inicia-se com a inserção de dados característicos da bacia hidrográfica e informações meteorológicas. Na configuração do modelo, definem-se os sistemas de unidades, bem como os módulos opcionais de sedimentos e qualidade da água. Em nível de sub-bacia, selecionam-se os métodos que regerão os componentes do ciclo hidrológico, incluindo: processos de perdas por infiltração, transformação de precipitação em escoamento superficial, contribuição de fluxo subterrâneo e propagação de cheias. Para cada método escolhido, devem ser determinados parâmetros específicos como área de drenagem, tempo de concentração, coeficientes de infiltração, taxas de evapotranspiração, e perdas por interceptação vegetal e depressões do terreno.

A estrutura computacional do HEC-HMS organiza-se em quatro estágios sequenciais de cálculo:

(A) Fase de Perdas (Loss): Calcula a parcela da precipitação que não contribui para o escoamento direto, resultando na precipitação efetiva através do método de infiltração selecionado;

(B) Fase de Transformação (Transform): Converte a precipitação efetiva em hidrograma de escoamento superficial direto, utilizando técnicas como o hidrograma unitário;

(C) Fase de Fluxo de Base (Baseflow): Incorpora a contribuição do escoamento subterrâneo ao hidrograma direto, simulando a resposta hidrológica completa da bacia;

(D) Fase de Propagação (Routing): Simula a translação e atenuação do hidrograma ao longo dos canais fluviais e através de estruturas hidráulicas, considerando as interações entre vazões afluentes e efluentes.

Conforme documentado pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (USACE-HEC, 2012), essa abordagem em etapas permite representar fisicamente os processos hidrológicos fundamentais.

3.9.1 Criando um Projeto e importação do MDT

A etapa inicial da modelagem hidrológica consistiu na preparação do ambiente de trabalho dentro do HEC-HMS. Primeiramente, foi criado um projeto no software, seguindo boas práticas de organização, como a utilização de nomes simples, sem caracteres especiais e armazenados em diretórios próximos à raiz, de modo a evitar falhas de leitura. Em seguida, reuniram-se os arquivos necessários para a construção do modelo, incluindo o raster

correspondente ao Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia e os shapefiles de apoio previamente tratados em ambiente SIG. No *Terrain Data Manager*, criou-se um conjunto de dados de terreno, no qual o arquivo MDE foi importado, permitindo que o terreno fosse integrado à estrutura do projeto e listado entre os componentes disponíveis.

Após o carregamento do terreno, elaborou-se o *Basin Model*, responsável por estruturar computacionalmente a bacia hidrográfica no HEC-HMS. Esse componente foi, então, vinculado ao conjunto de dados de terreno por meio da aba *terrain data*. A visualização gráfica da área de estudo tornou-se disponível após o salvamento do projeto, momento em que o MDE foi exibido na interface do software. Somente após essa configuração inicial foi possível avançar para a discretização da bacia.

3.9.2 Delimitação das Sub-Bacias no software HEC-HMS

A delimitação das sub-bacias de contribuição foi executada integralmente no ambiente do software HEC-HMS. Previamente, o Modelo Digital de Terreno (MDT) do ANADEM foi processado no Quantum GIS (QGIS), versão 3.38, onde foi recortado em um polígono retangular com dimensões ligeiramente superiores à área de estudo, assegurando uma margem de segurança adequada para as etapas subsequentes de processamento hidrológico.

No HEC-HMS, procedeu-se à construção do modelo hidrológico mediante a importação do MDT previamente tratado.

Primeiramente, foi executado o *Preprocess Sinks*, que preparou o MDE ao identificar a mobilização do fluxo entre células, seguido pelo pré-processamento de drenagem, que definiu as áreas de escoamento. Após esses procedimentos, o *software* gerou automaticamente as camadas *Flow Accumulation* e *Flow Direction*, permitindo visualizar tanto os talwegues quanto as direções de escoamento superficial. Em seguida, utilizou-se o *Identify Streams*, definindo uma área mínima de 5 km², valor que possibilitou a identificação adequada dos trechos de rio considerando as características da bacia.

Após a identificação do traçado hidrológico, acessou-se o *Breakpoint Manager* para criar o ponto de exultório, selecionado diretamente sobre o trecho de rio gerado pelo processamento. Com o *breakpoint* criado, o HEC-HMS realizou a subdivisão automática da bacia, resultando em 7 sub-bacias conectadas a 3 rios, que juntos formaram o canal principal da bacia. Foram definidos os prefixos para sub-bacias, rios e junções, além da conversão do exultório. O *software* criou automaticamente todos os objetos hidrológicos necessários sub-bacias, rios, junções e o exultório.

3.9.3 Configuração das Sub-Bacias

Após a delimitação das sub-bacias no HEC-HMS, iniciou-se a fase de edição e organização dos elementos gerados automaticamente pelo software. Nesse momento, cada sub-bacia, junção e trecho de rio foi renomeado conforme a ordem do escoamento, a fim de facilitar a interpretação do modelo. Assim, a sub-bacia situada na porção mais elevada da área foi redefinida como S1, seguida sucessivamente pelas demais, ajustadas de acordo com sua posição no sentido do fluxo. As junções também tiveram suas nomenclaturas reorganizadas (J1, J2 e J3), assim como os trechos de rio, que receberam designações padronizadas como R1, R2 e R3. Após essa etapa de organização estrutural, procedeu-se à edição individual das sub-bacias, iniciando pela S1, que, ao ser selecionada, apresentava sua área e os métodos hidrológicos a serem adotados. Foram então definidos o método de perdas, utilizando o método SCS *Curve Number* (CN), e o método de transformação chuva–vazão, baseado no hidrograma unitário do SCS. A componente de *baseflow* não foi considerada nesta etapa.

Em seguida, acessou-se a aba *Loss*, destinada à inserção dos parâmetros hidrológicos necessários ao cálculo das perdas, especificamente o armazenamento inicial e o valor do CN. Para obter esses dados, foi aberto um parêntese metodológico, recorrendo-se à planilha auxiliar contendo o passo a passo dos cálculos hidrológicos. A partir dessa planilha, foram determinados o comprimento do talvegue da sub-bacia, as cotas de crista e de base, o desnível correspondente e o tempo de retorno adotado ($TR = 100$ anos), bem como a duração da chuva. O tempo de concentração foi calculado pela equação de Kirpich, resultando em diferentes horários para cada sub-bacia. Em seguida, utilizando a equação de intensidade–duração–frequência (IDF) desenvolvida também neste trabalho, obteve-se a intensidade para cada sub-bacia. Multiplicando essa intensidade pela duração da chuva, chegou-se à precipitação total em mm, valor que seria posteriormente distribuído ao longo do tempo para gerar o hietograma a ser inserido no HEC-HMS durante as etapas seguintes da modelagem.

3.9.4 Distribuição temporal da chuva

Após determinar a precipitação total da chuva de projeto, o passo seguinte consistiu em definir como essa chuva seria distribuída ao longo do tempo, uma vez que, na prática, a precipitação não ocorre como um único volume instantâneo, mas segue uma dinâmica de intensidade variável. Para isso, empregou-se um método de distribuição temporal da chuva. Como existem diversos métodos hidrológicos disponíveis, a escolha recaiu sobre o método de

Huff, que organiza eventos de chuva em quatro quartis distintos. A duração das chuvas calculadas anteriormente foi de no máximo 10 horas, o que direcionou a seleção para o primeiro ou segundo quartil, pois se aplicava a precipitações com duração inferior a doze horas. Considerou-se ainda que o primeiro quartil tende a concentrar o pico no início da chuva, enquanto o segundo desloca esse pico para o centro do evento, logo ao avaliar qual deles seria mais crítico para o hidrograma, optou-se pelo primeiro quartil.

A partir da escolha do quartil, iniciou-se a construção do hietograma de projeto. Utilizando a tabela adimensional do método de Huff, foram calculados os passos de tempo multiplicando-se os valores adimensionais pelo total de duração da chuva. Em seguida, determinaram-se as precipitações acumuladas para cada passo multiplicando os coeficientes do quartil selecionado pela precipitação total de cada sub-bacia. A diferença entre precipitações acumuladas sucessivas gerou os valores de chuva em cada intervalo de tempo, formando assim a série temporal necessária para a elaboração do hidrograma de chuva. Por fim, as colunas correspondentes ao tempo e à intensidade foram reunidas para compor o gráfico do hidrograma, cuja forma representa a dinâmica temporal da chuva de projeto, posteriormente inserida no HEC-HMS como entrada para a modelagem hidrológica.

3.9.5 Parâmetros Hidrológicos da Bacia

Após definir o hietograma de chuva, avançou-se para a determinação dos parâmetros hidrológicos necessários antes de retornar ao HEC-HMS. O primeiro deles foi o *lag time*, entendido como o tempo de atraso entre o pico da distribuição temporal da chuva e o pico do hidrograma de vazão. Para obtê-lo, utilizou-se a relação na qual o tempo de atraso correspondeu a 60% do tempo de concentração previamente calculado. Em seguida, realizou-se a estimativa do *Curve Number* (CN). O valor do CN médio foi extraído com o auxílio da ferramenta Estatística Zonal dentro do Software Qgis. O CN depende do tipo de solo presente na bacia, da condição de umidade antecedente e do uso e ocupação do solo. Considerando essas variáveis e obteve-se um CN médio igual a 70 para o ano de 1985 e 75 para o ano de 2023 para a bacia analisada.

Com o valor do CN definido, calculou-se a infiltração potencial máxima (S) utilizando a equação padrão do SCS, que combina o CN com fatores constantes. Esse valor serviu de base para determinar a abstração inicial, correspondente a 20% de S, representando a parcela da chuva perdida antes do início efetivo do escoamento superficial. Essa etapa foi essencial para avaliar se a precipitação excedeu as perdas iniciais e, portanto, se geraria escoamento e

hidrograma de cheia. Com o conjunto de parâmetros *lag time*, CN, infiltração potencial máxima e abstração inicial devidamente calculado, concluiu-se essa parte conceitual antes de retornar ao software para alimentar o modelo hidrológico no HEC-HMS com os valores obtidos.

3.9.6 Edição das Sub-Bacias e Configuração dos Rios

Após o processo de delimitação hidrológica no HEC-HMS, no qual foi adotada uma área mínima de 5 km², foram automaticamente definidas 7 sub-bacias e 3 rios que formaram o canal principal da bacia. Com essa estrutura já estabelecida, iniciou-se a etapa de inserção dos parâmetros hidrológicos de cada sub-bacia, utilizando como referência as planilhas previamente calculadas. Embora cada unidade apresentasse valores distintos de área, declividade, talvegue, abstração inicial, CN e *lag time*, o procedimento de configuração no software foi o mesmo para todas.

Para cada uma das sub-bacias, selecionou-se o método de perdas *Curve Number* (CN), o método de transformação Hidrograma Unitário, e definiu-se a ausência de escoamento de base. Em seguida, foram inseridos manualmente os valores específicos de abstração inicial, *Curve Number* e *lag time*, sempre utilizando vírgula como separador decimal, conforme exigido pelo HEC-HMS. Esse procedimento foi repetido sucessivamente para todas as sete sub-bacias, assegurando que cada uma estivesse configurada com seus parâmetros hidrológicos corretos. Ao concluir essa etapa, o modelo passou a representar adequadamente tanto as sub-bacias quanto a rede de drenagem composta pelos três rios principais, permitindo avançar para a fase seguinte da modelagem.

Durante a modelagem hidrológica, compreendeu-se que os hidrogramas gerados nas sub-bacias eram somados nos pontos de junção para formar o hidrograma de entrada dos trechos de rio. Ao serem propagados ao longo do canal, esses hidrogramas podiam sofrer dois efeitos principais: translação da onda, gerando atraso na chegada da vazão a jusante, e atenuação da vazão de pico, caso o curso d'água apresentasse trechos com alagamentos ou seções compostas que reduzissem a celeridade do escoamento. Por esse motivo, o software tratava cada trecho de rio separadamente, permitindo que a propagação aplicasse esses efeitos e fornecesse um hidrograma já ajustado na saída.

Para realizar a propagação, selecionou-se o método Muskingum-Cunge, que exigia informações geométricas e hidráulicas do rio, normalmente obtidas por medições de campo, como batimetria, seções transversais e topografia. Como essas informações reais não estavam

disponíveis, estimaram-se valores médios a partir de dados acessíveis no QGIS e planilhas auxiliares.

Para a estimativa da vazão no trecho do Rio 01, Rio 02 e Rio 03, empregou-se a equação de Manning, amplamente utilizada para escoamentos em canais naturais e artificiais. A qual A representa a área da seção transversal do canal, n é o coeficiente de rugosidade de Manning, R corresponde ao raio hidráulico e S indica a declividade do trecho analisado. A partir dos parâmetros geométricos obtidos área molhada, perímetro molhado, largura média e desnível calculou-se o raio hidráulico e, em seguida, aplicou-se a equação para determinar a vazão. Dessa forma, foi possível obter uma estimativa coerente do escoamento no rio, considerando suas características físicas e a rugosidade predominante em seu leito.

$$Q = \frac{A}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad (21)$$

Em que:

Q - vazão do escoamento ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

A - área da seção transversal molhada (m^2);

n - coeficiente de rugosidade de Manning (adimensional);

R - raio hidráulico, definido como a razão entre a área molhada e o perímetro molhado (m);

S - declividade da linha de energia ou do fundo do canal (adimensional).

3.9.7 Inserção de Dados de Chuva e Configuração do Modelo Meteorológico

Após a configuração das sub-bacias e da rede de drenagem, procedeu-se à inserção dos dados de precipitação no HEC-HMS. Inicialmente, o *Basin Model* foi minimizado para facilitar a navegação, mantendo-se apenas as pastas referentes ao terreno e à bacia já estruturada. Em seguida, criou-se o primeiro conjunto de dados de chuva por meio do menu Components → Create Component → Time Series Data, mantendo-se o nome padrão *Gage 1* e definindo a categoria como precipitação. O software gerou automaticamente a pasta *Time Series Data*, na qual o *Gage 1* foi configurado para trabalho em milímetros. O passo de tempo utilizado para a Sub-bacia 1 foi de 6 minutos.

A janela de configuração de data foi mantida no padrão do software, observando-se a necessidade de registrar dia, mês e ano no formato exigido (DD-MMM-YYYY), sem abreviações inadequadas ou substituições numéricas fora do padrão. Após essa definição, os dados de chuva foram inseridos na tabela correspondente. Como o modelo não permite células vazias na série temporal, todos os espaços em branco foram substituídos por zero utilizando o

comando Fill → Replace Missing Values → 0. O mesmo procedimento foi repetido para as demais sub-bacias, criando-se *Gage 2*, *Gage 3*, *Gage 4*, *Gage 5*, *Gage 6* e *Gage 7*, cada um com seu respectivo passo de tempo obtido das planilhas: 2 minutos (Sub-bacia 2), 12 minutos (Sub-bacia 3), 10 minutos (Sub-bacia 4), 3 minutos (Sub-bacia 5), 6 minutos (Sub-bacia 6) e 1 minuto (Sub-bacia 7). Em todos os casos, os dados de chuva foram colados diretamente na tabela, e valores faltantes foram preenchidos com zero.

Ao final desse processo, foram gerados cinco conjuntos distintos de séries temporais de precipitação, cada um correspondente à sua sub-bacia específica. Essa etapa permitiu que, posteriormente, cada chuva fosse corretamente vinculada à sub-bacia correspondente dentro do modelo hidrológico, possibilitando a continuidade da simulação.

Após a inserção das séries temporais de chuva para todas as sub-bacias, o diretório *Time Series Data* foi minimizado para facilitar a organização da interface. Em seguida, criou-se o componente meteorológico por meio do comando Components → Create Component → Meteorological Model, mantendo-se o nome padrão *Met 1*. O software gerou automaticamente a pasta *Meteorological Model*, dentro da qual foi acessado o ícone correspondente à edição do modelo atmosférico.

No painel de configuração, foi selecionada a aba Basins, vinculando o *Basin 1* ao Meteorological Model, uma vez que ele representava toda a área computacional da bacia previamente delimitada. Em seguida, na opção referente ao Hietograma Especificado, foram ativadas as precipitações correspondentes a cada sub-bacia onde cada série temporal foi associada à sua sub-bacia respectiva: *Gage 1* foi vinculado à Sub-bacia 1, *Gage 2* à Sub-bacia 2, *Gage 3* à Sub-bacia 3, *Gage 4* à Sub-bacia 4, *Gage 5* à Sub-bacia 5, *Gage 6* à Sub-bacia 6 e *Gage 7* à Sub-bacia 7. Esse procedimento garantiu que o HEC-HMS reconhecesse corretamente qual hietograma deveria atuar sobre cada unidade da bacia. Após concluir as associações, o arquivo foi salvo, finalizando essa etapa de configuração.

3.9.8 Configuração das Especificações de Controle

Após configurar o modelo meteorológico, foi criado o componente Control Specification por meio do comando Components → Create Component → Control Specification, mantendo-se o nome sugerido pelo software (*Control 1*). A criação desse componente gerou uma nova pasta e, ao acessá-la, abriu-se a interface onde foram definidas as informações temporais da simulação. Nessa etapa, determinou-se a janela de cálculo que o

HEC-HMS utilizaria, respeitando sempre o limite máximo imposto pelos dados de precipitação previamente inseridos.

Para definir o período de simulação, consultaram-se os dados do primeiro hietograma (*Gage 1*), que apresentavam precipitação entre 01/01/2000 às 00:00 e 02/01/2000 às 00:00, padrão também adotado pelos demais hietogramas. Assim, o *Control Specification* foi configurado com o mesmo intervalo temporal, permitindo que a modelagem cobrisse integralmente o período dos dados de entrada. O intervalo de cálculo foi definido em 10 minutos, adotando-se o menor passo temporal presente entre as séries de chuva. Após essas parametrizações, o componente foi salvo, concluindo a preparação temporal necessária para a etapa de simulação.

3.9.9 Simulação

Após a definição do *Control Specification*, procedeu-se à organização das pastas do projeto e, em seguida, à configuração da execução do modelo hidrológico. A simulação foi criada por meio do comando *Compute → Create Compute Simulation Run*, mantendo-se o nome sugerido pelo software (*Run 1*). Na janela de configuração, selecionaram-se: (i) o modelo de bacia previamente definido (*Basin 1*), (ii) o modelo meteorológico correspondente (*Meteorological Model 1*), e (iii) o *Control Specification 1*. Com esses elementos vinculados, o plano de simulação foi criado sem ajustes adicionais.

A execução ocorreu na pasta *Simulation Runs*, onde o item *Run 1* foi acionado com o comando *Compute*. O avanço da barra de processamento atingiu 100% sem a emissão de mensagens de erro, indicando que o modelo foi executado corretamente para todo o intervalo temporal previamente estabelecido. Após a conclusão, retornou-se ao menu *Components* para análise dos resultados gerados em cada elemento da bacia, permitindo a avaliação individualizada das respostas hidrológicas das sub-bacias, trechos de rio, junções e exultório.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

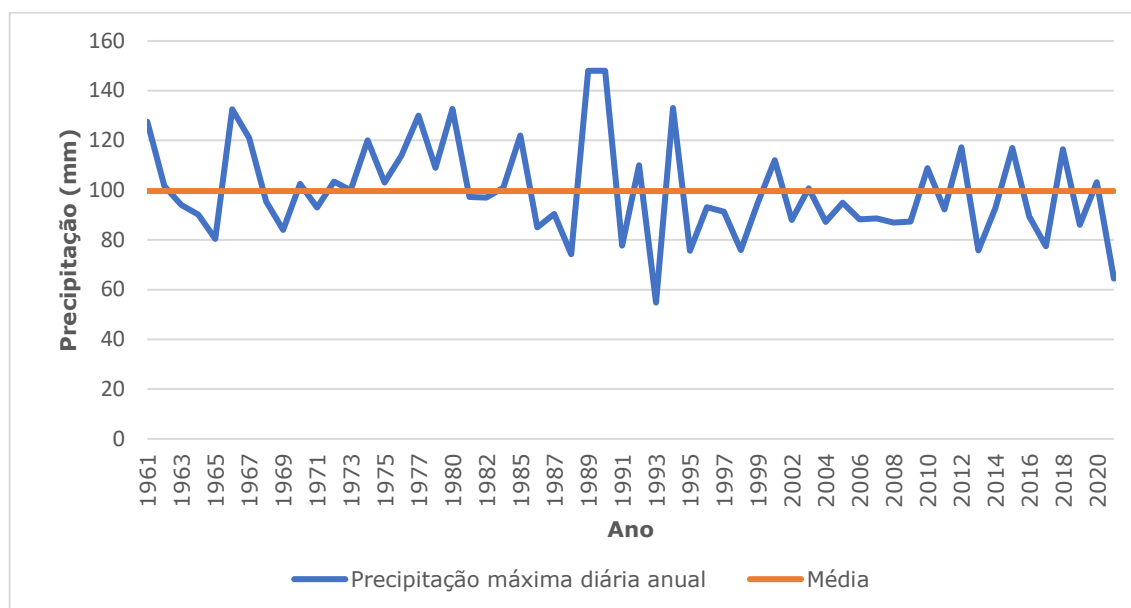
4.1 Equação IDF

A análise da série histórica de 58 anos de dados pluviométricos da estação meteorológica 82825D/A925D, realizada após a remoção dos outliers e a aplicação das equações descritas em Conceição Neto et al. (2024), resultou na identificação de que o ano hidrológico de 1980 apresentou a maior precipitação máxima diária, com 132,6 mm. Por outro lado, o menor valor máximo anual foi registrado em 1993, com 58,8 mm. A média das precipitações máximas diárias para o período estudado foi de 99,63 mm, e o desvio padrão calculado correspondeu a 19,51 mm (Tabela 3)

Tabela 3 – Precipitações pluviométricas máximas obtidas na estação meteorológica 82825D/A925D.

Anos	Precipitações máximas (mm)	Anos	Precipitações máximas (mm)	Anos	Precipitações máximas (mm)	Anos	Precipitações máximas (mm)
1961	127,5	1976	114	1993	54,8	2009	87,4
1962	101,6	1977	130	1994	133	2010	108,8
1963	94	1978	109	1995	75,6	2011	92,2
1964	90,2	1980	132,6	1996	93,2	2012	117,2
1965	80,4	1981	97,2	1997	91,4	2013	75,8
1966	132,5	1982	97	1998	75,9	2014	92,8
1967	121	1983	101	1999	95	2015	117
1968	95,5	1985	122	2001	112	2016	89,4
1969	84	1986	85	2002	88	2017	77,4
1970	102,6	1987	90,4	2003	100,7	2018	116,4
1971	93	1988	74,2	2004	87,2	2019	86
1972	103,4	1989	148	2005	95	2020	103,2
1973	100	1990	148	2006	88,2	2021	64,4
1974	120	1991	77,7	2007	88,7		
1975	103	1992	110	2008	87		

Fonte: Autor (2025).

Figura 10 – Dados referentes à máxima precipitação diária anual da série histórica

Fonte: Autor (2025).

De acordo com Naghettini e Pinto (2007), os chamados “saltos” observados em séries pluviométricas podem estar relacionados tanto a flutuações naturais do regime climático quanto a influências antrópicas. Os autores destacam ainda que, embora essas oscilações nas precipitações máximas diárias anuais pareçam ocorrer de forma aleatória, elas tendem a apresentar certa regularidade cíclica ao longo dos anos.

A análise da série histórica de precipitações máximas juntamente com a aplicação das Equações 3 e 4 permitiu a determinação dos coeficientes de escala (α) e de posição (β), essenciais para a aplicação da Equação 5 no intuito de estimar as precipitações máximas diárias associadas a diferentes tempos de retorno. Com base nos procedimentos metodológicos adotados, obteve-se o valor de α igual a 0,066 e de β igual a 90,85. Os resultados correspondentes aos valores de precipitação máxima diária (x_i) encontram-se apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados de precipitações máximas (em mm) obtidos pela distribuição estatística de Gumbel de um dia para cada tempo de retorno.

Tr (anos)	2	5	10	15	20	25	50	100
x_i	96,43	113,67	125,08	131,53	136,04	139,51	150,21	160,83

Fonte: Autor (2025).

4.1.1 Desagregação das Chuvas

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos a partir da desagregação das chuvas para diferentes tempos de retorno, utilizando a distribuição de Gumbel e os coeficientes estabelecidos por CETESB (1986). Verificou-se que as variáveis (Tr) e (ξ) demonstram uma relação diretamente proporcional, indicando que, à medida que o tempo de retorno aumenta, a precipitação máxima também tende a se elevar. Em contrapartida, as variáveis (t) e (i) exibem comportamento inversamente proporcional, ou seja, quanto maior a duração da chuva, menor é sua intensidade. Resultados semelhantes foram observados em estudos desenvolvidos por Moruzzi e Oliveira (2009), Pereira, Duarte e Sarmiento (2017) e Penner e Nascimento (2018).

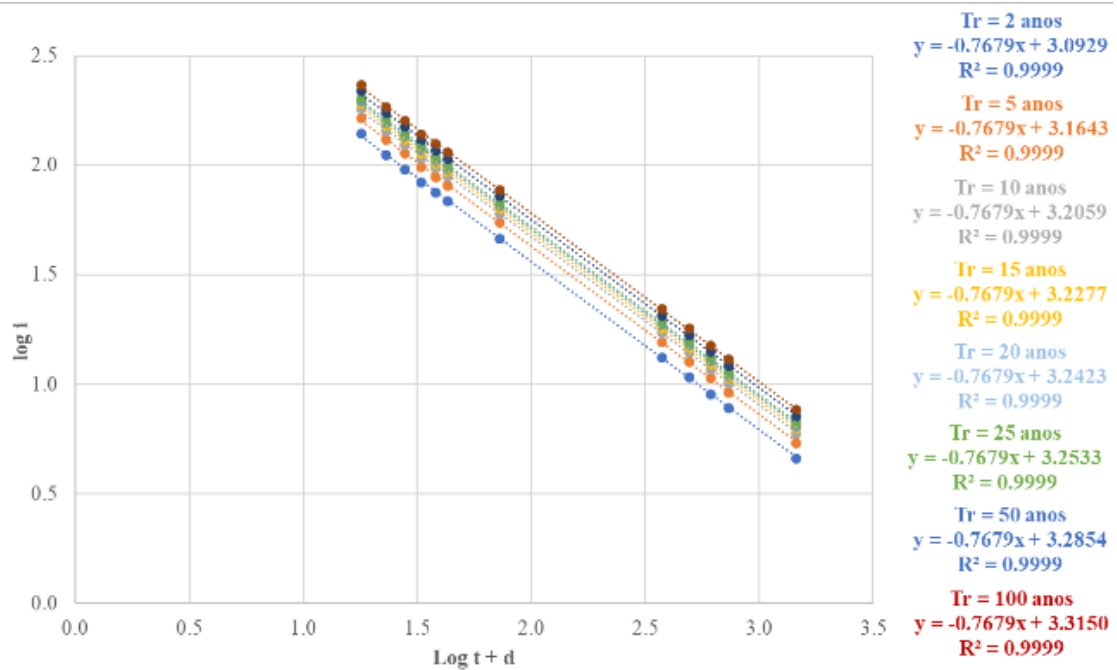
Tabela 5 - Intensidades das chuvas, em mm/h, a partir da desagregação dos dados de precipitações obtidos na distribuição de Gumbel.

Tempos de duração (h)	Tempos de retorno (em anos)							
	2	5	10	15	20	25	50	100
24	4,58	5,40	5,94	6,25	6,46	6,63	7,13	7,64
12	7,79	9,18	10,10	10,62	10,98	11,27	12,13	12,99
10	9,01	10,63	11,69	12,30	12,72	13,04	14,04	15,03
8	10,72	12,63	13,90	14,62	15,12	15,51	16,70	17,88
6	13,19	15,55	17,11	17,99	18,61	19,08	20,55	22,00
1	46,17	54,42	59,89	62,97	65,13	66,80	71,92	77,01
0,50	68,33	80,55	88,64	93,20	96,40	98,86	106,44	113,97
0,42	74,62	87,96	96,79	101,78	105,27	107,95	116,24	124,45
0,33	83,02	97,87	107,70	113,24	117,12	120,11	129,33	138,47
0,25	95,66	112,77	124,09	130,48	134,96	138,40	149,02	159,56
0,17	110,69	130,49	143,59	150,99	156,16	160,15	172,44	184,63
0,08	139,39	164,32	180,82	190,13	196,65	201,67	217,14	232,50

Fonte: Autor (2025).

4.1.2 Obtenção dos Parâmetros da Equação IDF

A Figura 11 apresenta o resultado da linearização das equações utilizadas para obtenção de (n) e $\log C$, tendo (d) igual a 13, para cada tempo de retorno, a partir de intensidades de precipitação, em mm/h.

Figura 11 – Linearização da intensidade i (em mm/h), duração t (h) e parâmetro $(d) = 13$ 

Fonte: Autor (2025).

Dessa forma, a análise da Figura 2 possibilitou a determinação dos valores de n e $\log C$, cujos resultados estão apresentados na Tabela 6.

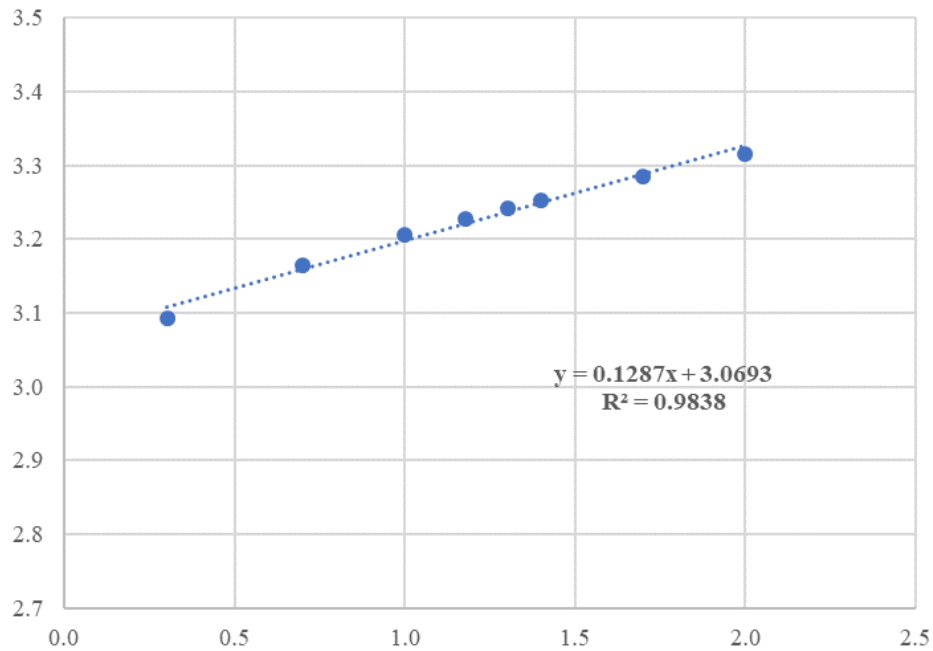
Tabela 6 - Valores obtidos para os parâmetros de $\log C$, n e d necessários à definição da curva IDF.

Tr	log C	C	n	d
2	3.0929	1238.5	0.7679	13
5	3.1643	1459.8	0.7679	13
10	3.2059	1606.6	0.7679	13
15	3.2277	1689.3	0.7679	13
20	3.2423	1747.0	0.7679	13
25	3.2533	1791.8	0.7679	13
50	3.2854	1929.3	0.7679	13
100	3.3150	2065.4	0.7679	13

Fonte: Autor (2025).

Com o valor de $\log C$ definido, torna-se possível a determinar os parâmetros m e $\log k$. O Figura 12 apresenta a linearização da equação 9 em relação aos tempos de retorno analisados.

Figura 12 – Valores de $\log Tr$ e $\log C$ para a obtenção dos parâmetros m e $\log k$.



Fonte: Autor (2025).

Com base nos dados analisados, elaborou-se a Tabela 7, que apresenta os valores de m e $\log k$ determinados a partir da linearização mostrada na Figura 12.

Tabela 7 - Valores obtidos para os parâmetros de $\log C$, n e d necessários à definição da curva IDF

m	log k	k
0.1287	3.069	1173.0054

Fonte: Autor (2025).

Por fim, com todos os parâmetros determinados, pôde-se definir a Equação IDF referente à área de estudo. A Tabela 8 apresenta os parâmetros finais obtidos para a estação analisada, após o tratamento dos dados.

Tabela 8 - Parâmetros para a Equação IDF.

PARÂMETRO	VALOR OBTIDO
k	1173.01
m	0.1287
d	13
n	0.7679

Fonte: Autor (2025).

Com base nos valores apresentados na Tabela 8, foi possível ajustar a equação de chuva (IDF) para a região de Porto Velho – RO, conforme demonstrado na Equação 22.

$$i = \frac{1173,0054.(Tr)^{0,1287}}{(t+13)^{0,7679}} \quad (22)$$

Em que:

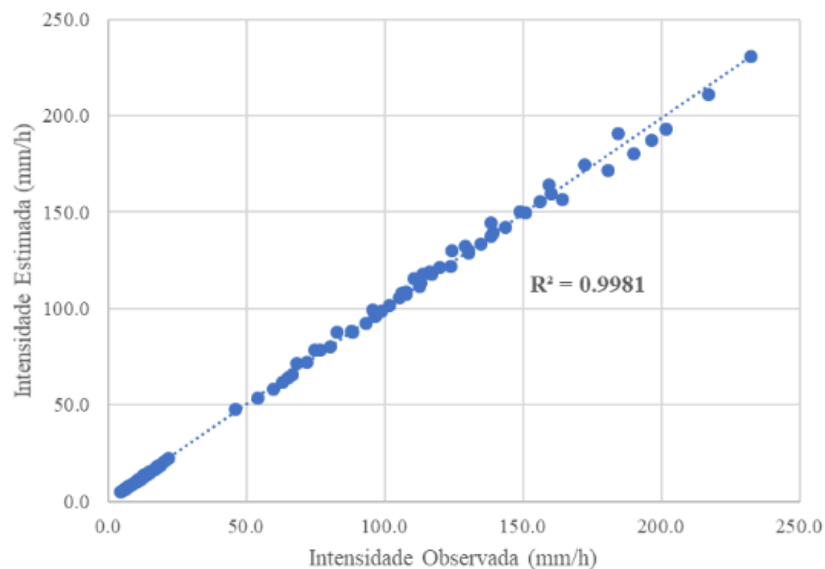
i – Intensidade da Precipitação em mm/h;

Tr – Tempo de retorno/recorrência.

t – Tempo de duração da precipitação em min;

A análise de desempenho da equação evidenciou elevada consistência, expressa por um índice de concordância de Willmott (1981) igual a 0,9999. De forma complementar, o coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9981$) reforça a excelente qualidade do ajuste obtido, conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Relação entre intensidades máximas de precipitações observadas e estimadas, com linha de tendência e o valor de R^2 .



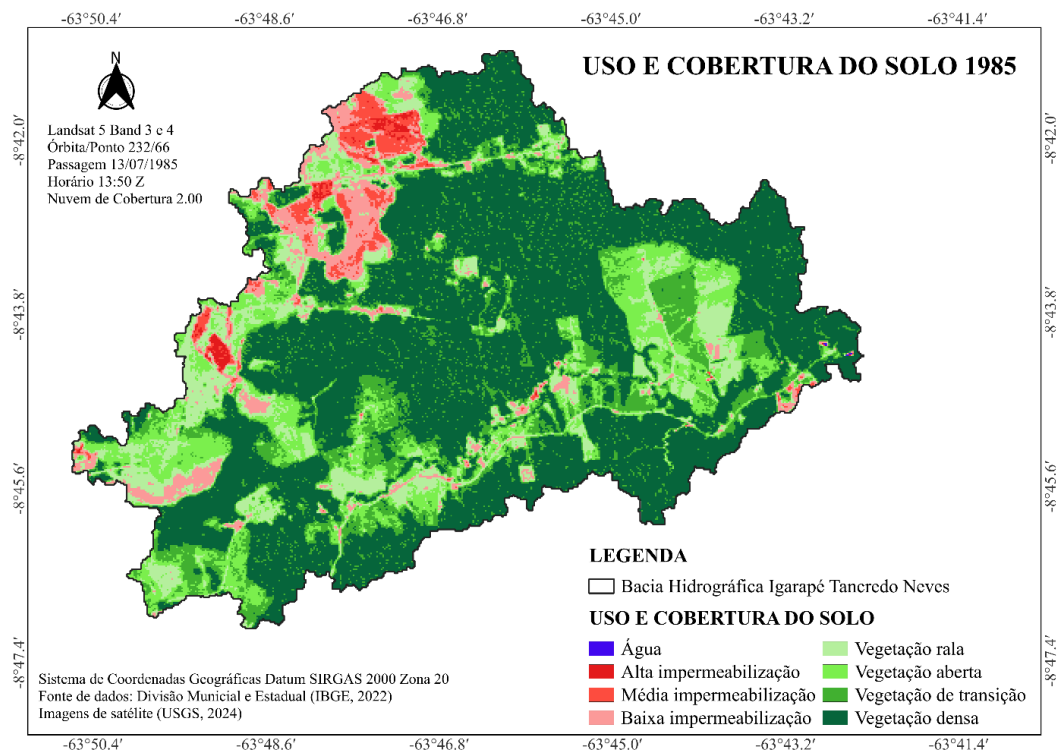
Fonte: Autor (2025).

Dessa forma, a estimativa da intensidade da chuva de projeto (mm/h) requer apenas a inserção do tempo de duração da precipitação (t), em minutos, e do tempo de retorno (T_r), em anos, nos parâmetros da equação ajustada.

4.2 Uso E Cobertura do Solo

A Figura 14 de 1985, revela um cenário onde a paisagem da Bacia Hidrográfica Igarapé Tancredo Neves é predominantemente moldada por características naturais. A cobertura do solo é majoritariamente composta por extensas áreas de vegetação densa, que indicam um estado de conservação ambiental mais elevado. As manchas urbana, representadas pelas classes de impermeabilização, aparecem de forma restrita e pontual, sugerindo uma ocupação antrópica de baixa intensidade. A presença de vegetação de transição e aberta sinaliza os estágios iniciais de modificação da paisagem natural, possivelmente associados a atividades agropecuárias ou a processos de expansão urbana ainda em fase inicial. Neste período, a bacia hidrográfica apresenta uma dinâmica ecológica com menor interferência humana, onde os elementos naturais ditam a organização espacial.

Figura 14 – Uso e cobertura do solo da Bacia Hidrográfica Igarapé Tancredo Neves no ano de 1985.

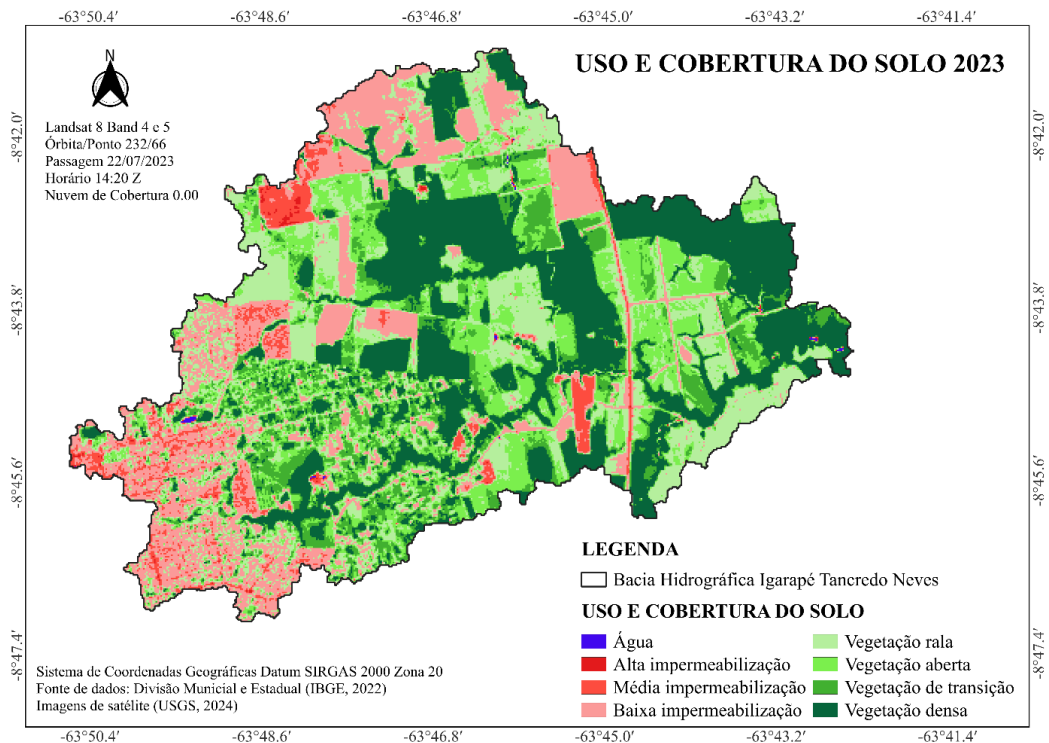


Fonte: Autor (2025).

Em contraste, a Figura 15 de 2023, retrata uma paisagem profundamente transformada pela ação humana ao longo de 38 anos. A expansão das áreas antrópicas torna-se a característica mais marcante, com um aumento significativo e espacialmente expressivo das classes de alta,

média e baixa impermeabilização. Esse padrão evidencia um intenso processo de urbanização e consolidação da malha urbana na bacia. Paralelamente, observa-se uma notável fragmentação e redução das áreas de vegetação densa, que foram substituídas por vegetação mais aberta, rala ou mesmo por superfícies impermeáveis. Esta transição sugere uma perda de cobertura florestal nativa e uma possível degradação dos habitats naturais. A configuração de 2023 demonstra claramente a pressão exercida pelo desenvolvimento socioeconômico sobre os recursos naturais, alterando a estrutura ecológica original da bacia.

Figura 15 – Uso e cobertura do solo da Bacia Hidrográfica Igarapé Tancredo Neves no ano de 2023.



Fonte: Autor (2025).

A comparação entre os anos de 1985 e 2023 demonstra profundas transformações no uso e cobertura do solo da Bacia Hidrográfica Igarapé Tancredo Neves, em Porto Velho (RO). Em 1985, predominava a vegetação densa, que ocupava 52,41% (46,05 km²) da área total, indicando uma paisagem com baixa interferência antrópica e condições naturais ainda preservadas. Entretanto, em 2023 essa classe reduziu-se para 26,42% (23,22 km²), representando uma perda de aproximadamente 50% da sua extensão original. Essa redução reflete o avanço das atividades humanas, em especial o desmatamento e a conversão de áreas florestais em usos agropecuários e urbanos, fenômeno também observado por Trancoso et al.

(2009) ao analisarem o ordenamento territorial na bacia do rio Madeira, da qual o Igarapé Tancredo Neves é uma sub-bacia.

De forma similar, observa-se um expressivo aumento das áreas impermeabilizadas. As classes de baixa impermeabilização cresceram de 5,33% (4,69 km²) para 18,78% (16,50 km²), enquanto as de média impermeabilização aumentaram de 2,23% (1,96 km²) para 3,82% (3,36 km²). No total, as superfícies impermeáveis passaram de 7,9% para 22,8% entre 1985 e 2023. Esse aumento está associado à expansão urbana desordenada e ao avanço das atividades agropecuárias, que promovem compactação do solo e consequente redução da infiltração hídrica.

As classes de vegetação, rala e vegetação aberta também apresentaram acréscimo significativo. A vegetação rala passou de 11,08% (9,74 km²) para 20,89% (18,35 km²), e a vegetação aberta de 13,31% (11,70 km²) para 17,52% (15,39 km²). Esses aumentos indicam processos de degradação florestal, resultantes de queimadas e substituição de vegetação nativa por formações secundárias de menor porte. Já a vegetação de transição reduziu-se de 15,18% (13,34 km²) para 12,32% (10,82 km²), sugerindo que parte dessas áreas evoluiu para classes menos vegetadas ou foi convertida em usos antrópicos.

A classe água apresentou discreto aumento, passando de 0,01 km² (0,01%) em 1985 para 0,06 km² (0,06%) em 2023. Essa variação pode estar relacionada à maior precisão dos produtos de sensoriamento remoto recentes e a possíveis alterações hidrológicas locais, como o assoreamento e a formação de pequenas áreas alagadas.

Tabela 9 – Valores da quantificação das classes de solos em km² e porcentagem.

Ano	1985		2023	
	Área (Km ²)	Área (%)	Área (Km ²)	Área (%)
Água	0,01	0,01%	0,06	0,06%
Alta imp.	0,40	0,45%	0,17	0,19%
Média imp.	1,96	2,23%	3,36	3,82%
Baixa imp.	4,69	5,33%	16,50	18,78%
Veg. rala	9,74	11,08%	18,35	20,89%
Veg. aberta	11,70	13,31%	15,39	17,52%
Veg. de transição	13,34	15,18%	10,82	12,32%
Veg. densa	46,05	52,41%	23,22	26,42%

Fonte: Autor (2025).

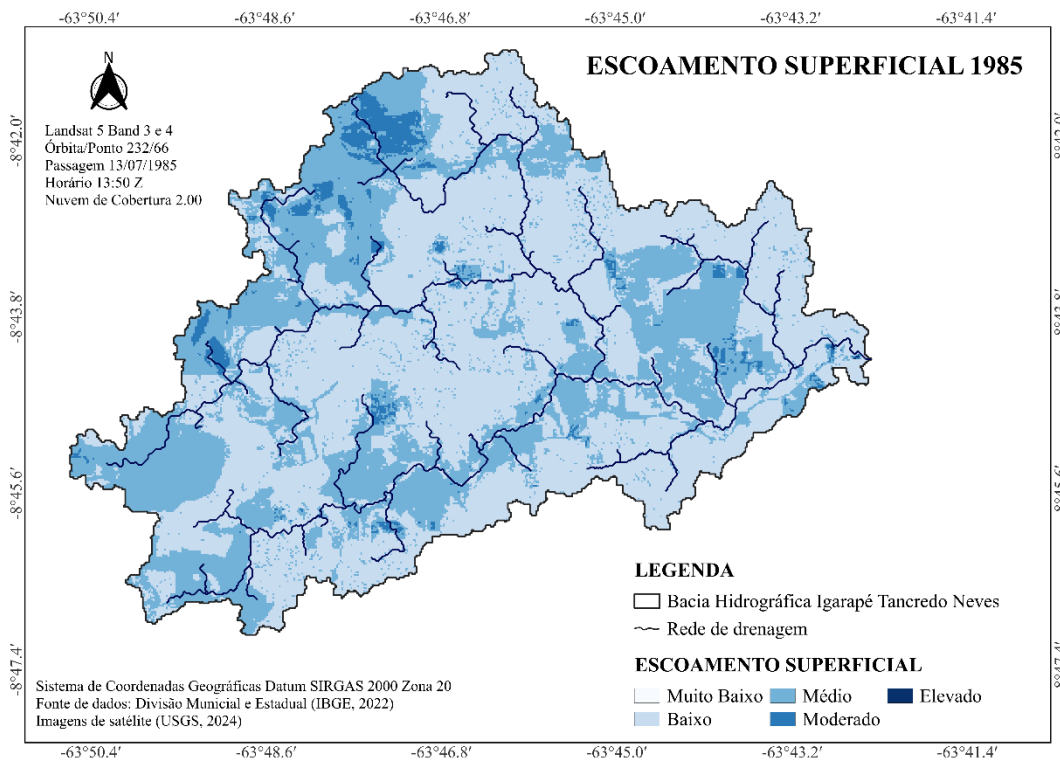
Os resultados apontam para um processo de substituição da cobertura florestal por áreas antropizadas, em toda a região da bacia, coerente com o avanço da urbanização e da agropecuária nas últimas décadas.

4.3 Escoamento Superficial

A análise comparativa dos mapas de escoamento superficial revela mudanças significativas na dinâmica hidrológica da bacia entre os anos de 1985 e 2023, evidenciando o impacto das transformações antrópicas no uso e cobertura do solo.

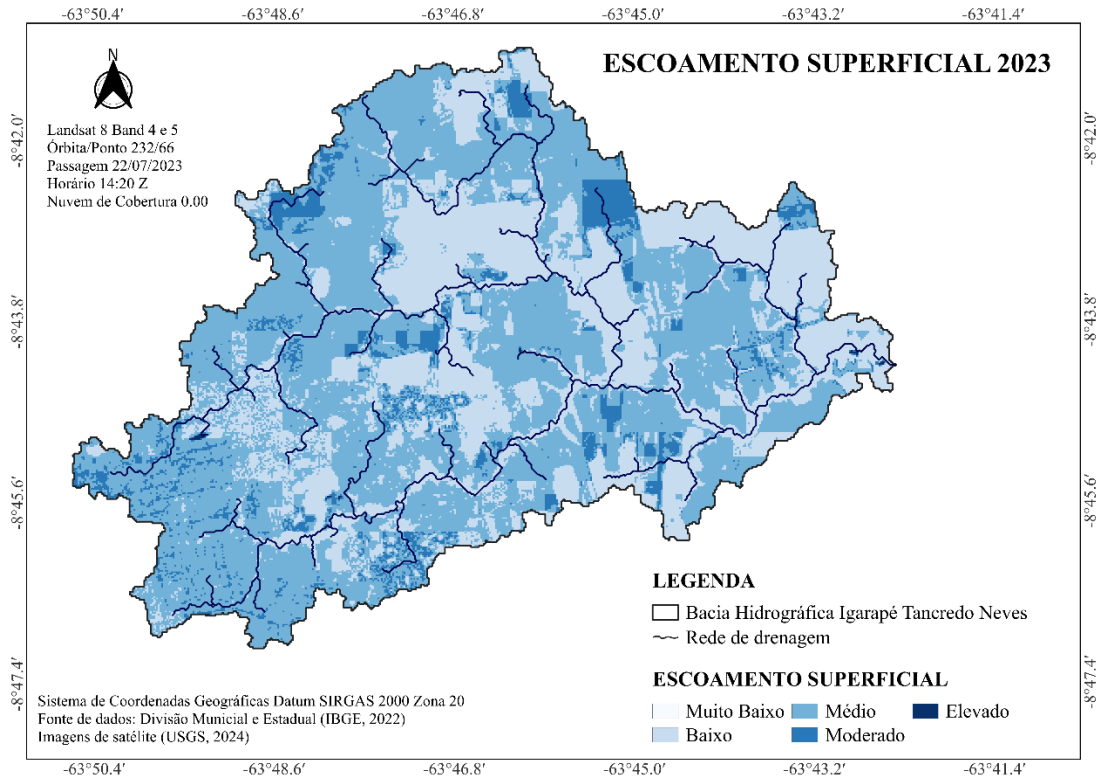
Em 1985, predominavam as classes de escoamento lento e baixo, distribuídas principalmente nas áreas centrais e ao longo dos cursos d'água, conforme Figura 16. Essa configuração reflete uma paisagem com maior presença de vegetação natural e superfícies permeáveis, que favorecem a infiltração da água no solo e reduzem o volume do escoamento superficial. As classes de escoamento moderado e elevado ocorriam de forma pontual, associadas a solos mais compactados ou trechos urbanos ainda em formações.

Figura 16 – Escoamento superficial na Bacia Hidrográfica do Igarapé Tancredo Neves no ano de 1985.



No cenário de 2023, conforme Figura 17 observa-se uma redução das áreas de escoamento baixo, acompanhada pelo aumento expressivo das classes de escoamento médio e moderado, distribuído em toda a região da bacia. Essa alteração indica o avanço da impermeabilização do solo, decorrente da expansão urbana, pavimentação, substituição de áreas vegetadas por edificações e vias, assim como o avanço das atividades agropecuárias.

Figura 17 – escoamento superficial na Bacia Hidrográfica do Igarapé Tancredo Neves no ano de 2023.



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 10 demonstra de forma quantitativa uma análise do escoamento superficial na Bacia Hidrográfica Igarapé Tancredo Neves, em que revela alterações significativas ao longo das últimas décadas, diretamente relacionadas às mudanças no uso e cobertura do solo.

Em 1985, predominava o escoamento baixo (23 a 46 mm), que abrangia 60,37% da área total (53,05 km²). O escoamento médio (46 a 69 mm) representava 36,58% (32,14 km²), enquanto o escoamento moderado (69 a 92 mm) correspondia a apenas 3,04% (2,67 km²) da área. Esses valores refletem um cenário de baixa impermeabilização e elevada cobertura vegetal, especialmente de vegetação densa e de transição, que favoreciam a infiltração da água no solo e a recarga dos aquíferos locais.

Entretanto, em 2023, observa-se uma mudança expressiva na dinâmica hidrológica da bacia. O escoamento médio passou a predominar, cobrindo 57,20% da área total (50,26 km²), enquanto o escoamento baixo reduziu-se para 35,54% (31,22 km²). Além disso, o escoamento moderado aumentou significativamente, atingindo 7,20% (6,32 km²), valor aproximadamente três vezes maior do que o observado em 1985. Essa evolução demonstra uma tendência de intensificação do escoamento superficial, resultado direto da redução da cobertura vegetal, da

expansão urbana e do avanço das atividades agropecuárias, que promoveram a compactação e impermeabilização do solo.

A predominância atual de escoamento médio e o crescimento das classes de escoamento moderado e elevado indicam que a bacia está hidrologicamente mais vulnerável, com maior volume de água escoando superficialmente e menor infiltração. Como afirma Tucci (2008), essa alteração tende a elevar o risco de alagamentos, erosão e assoreamento dos canais de drenagem, especialmente nas áreas urbanizadas e em trechos com declividade mais acentuada.

Esses resultados estão em consonância com os de Fritzen e Binda (2011), que apontam que a urbanização desordenada compromete o equilíbrio hidrológico natural, ao aumentar a impermeabilização do solo, canalizar cursos d'água e suprimir a vegetação. Tais fatores reduzem a infiltração e intensificam o escoamento superficial, ampliando a frequência e severidade de eventos de inundação. De modo semelhante, Silva et al. (2018) e Menezes et al. (2020) destacam que a substituição da cobertura vegetal por superfícies impermeáveis altera o ciclo hidrológico local, reduz a evapotranspiração e favorece o acúmulo de água pluvial nas áreas mais baixas das bacias urbanas.

Tabela 10 – Valores da quantificação dos tipos de escoamento em km² e porcentagem

Ano	1985		2023	
	Escoamento (mm)	Área (Km ²)	Área (%)	Área (Km ²)
Lento (0 a 23)	0,00	0,00%	0,00	0,00%
Baixo (23 a 46)	53,05	60,37%	31,22	35,54%
Médio (46 a 69)	32,14	36,58%	50,26	57,20%
Moderado (69 a 92)	2,67	3,04%	6,32	7,20%
Elevado (92 a 114)	0,01	0,01%	0,06	0,06%

Fonte: Autor (2025).

4.4 Vazão de Pico

As Tabelas 11, 12 e 13 apresentam os resultados da caracterização geométrica e hidráulica dos canais analisados. Foram determinados parâmetros fundamentais, como comprimento, desnível, declividade, coeficiente de rugosidade de Manning, largura do canal, área molhada, perímetro molhado, raio hidráulico e vazão estimada, os quais permitem compreender o comportamento hidráulico de cada trecho avaliado. Esses resultados constituem a base para a representação física dos canais, refletindo suas condições de escoamento.

Posteriormente, os valores obtidos foram utilizados como dados de entrada no modelo hidrológico empregados no estudo, possibilitando a simulação do escoamento superficial.

Tabela 11 – Dados do Rio 01

Comprimento	1159	m
Desnível	4	m
Declividade	0,003451	m/m
Manning	0,035	
Index Flow	280,4161	m ³ /s
Largura	32	m
Desnível:	2,88	m
Área:	92,16	m ²
Perímetro Molhado:	37,76	m
Raio Hidráulico:	2,440678	m

Fonte: Autor (2025).

Tabela 12 – Dados do Rio 02

Comprimento	5226	m
Desnível	6	m
Declividade	0,001148	m/m
Manning	0,035	
Index Flow	67,50551	m ³ /s
Largura	32	m
Desnível:	1,66	m
Área:	53,12	m ²
Perímetro Molhado:	35,32	m
Raio Hidráulico:	1,503964	m

Fonte: Autor (2025).

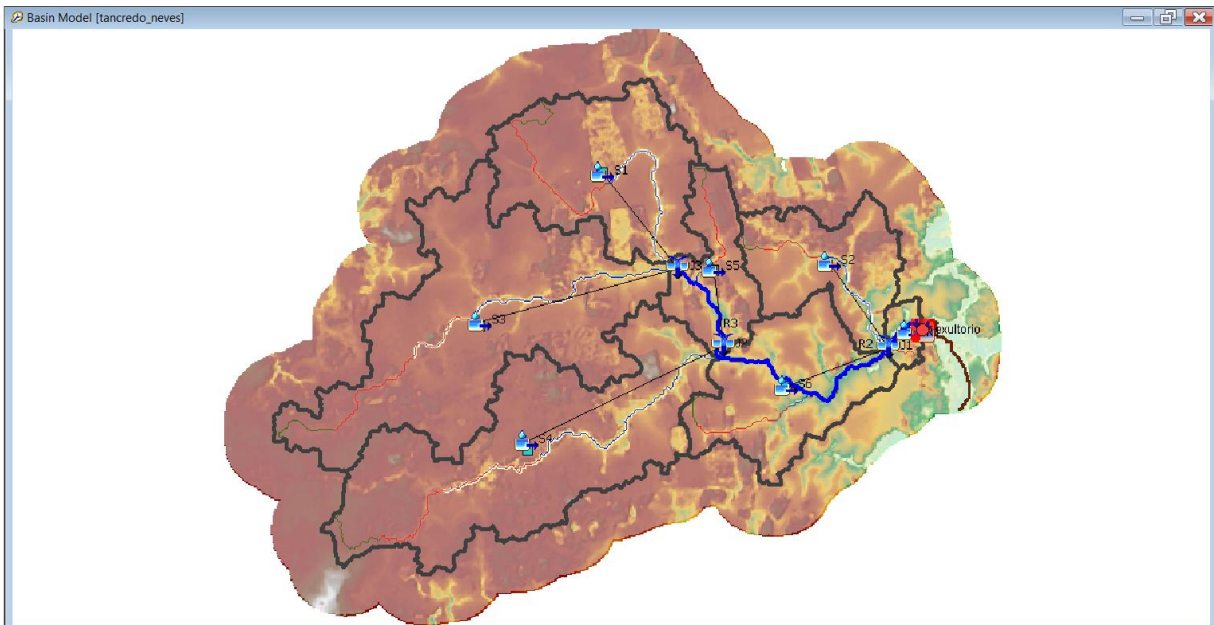
Tabela 13 – Dados do Rio 03

Comprimento	2868	m
Desnível	6	m
Declividade	0,002092	m/m
Manning	0,035	
Index Flow	57,69063	m ³ /s
Largura	32	m
Desnível:	1,25	m
Área:	40	m ²
Perímetro Molhado:	34,5	m
Raio Hidráulico:	1,15942	m

Fonte: Autor (2025).

A Figura 18 apresenta a disposição das sub-bacias e os trechos de rios na bacia hidrográfica Igarapé Tancredo Neves.

Figura 18 – Disposição das Sub-bacias e trechos de rios no ambiente Hec-Hms



Fonte: Autor (2025).

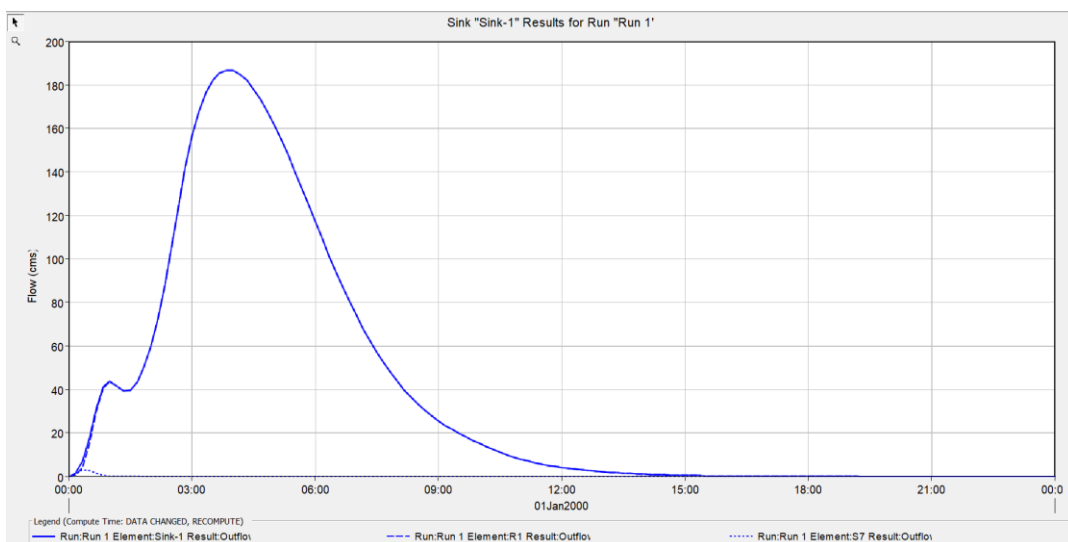
Os resultados das simulações hidrológicas realizadas para os anos de 1985 e 2023 no exultório da Bacia Hidrográfica Igarapé Tancredo Neves revelam alterações significativas no comportamento hidrológico ao longo do período de 38 anos.

No início dos hidrogramas observou-se um pequeno desnível ou oscilação antes da subida principal da vazão. Esse comportamento é demonstrado por Hawkins et al. (2003) em seu estudo, em que os autores confirmam que tal comportamento é compatível com contribuições iniciais provenientes de sub-bacias menores e trechos mais próximos ao ponto de controle, que respondem rapidamente ao início da precipitação e geram um primeiro pulso de escoamento superficial.

Pequenas variações nos parâmetros de abstração inicial (Ia) e do Curve Number (CN) podem alterar significativamente a transformação da chuva em escoamento superficial. O parâmetro Ia representa a quantidade de precipitação que o solo é capaz de reter antes de gerar escoamento, estando diretamente ligado à infiltração, rugosidade e cobertura vegetal. Quando esse valor diminui, a superfície torna-se mais propensa a converter rapidamente a precipitação em escoamento direto, reduzindo o tempo de resposta da bacia e favorecendo a ocorrência de picos mais acentuados no hidrograma (Caletka et al., 2020).

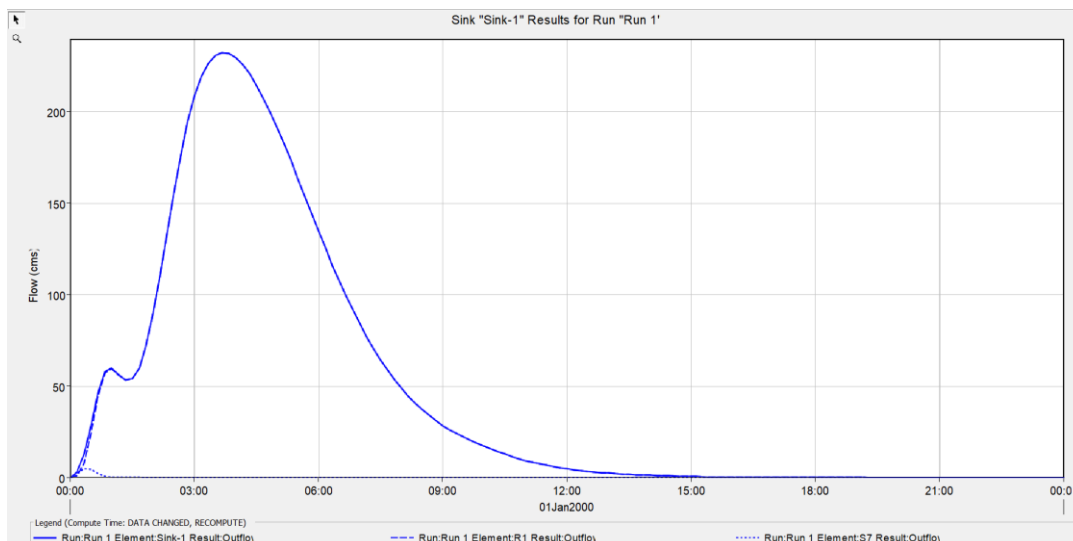
Na Bacia Hidrográfica Igarapé Tancredo Neves, observou-se que o aumento das áreas impermeáveis e a redução das zonas vegetadas implicaram em elevação dos valores de CN médio (variando de 70 em 1985 para 75 no ano de 2023), indicando menor capacidade de infiltração e, conseqüentemente, maior geração de escoamento superficial. Essa alteração afeta diretamente a fase inicial da chuva, intensificando o volume e a velocidade com que o escoamento atinge a rede de drenagem. Assim, a combinação entre altos valores de CN e baixos valores de Ia explica o aumento da vazão de pico verificado nos modelos hidrológicos simulados para o período mais recente, refletindo o impacto da urbanização sobre o comportamento hidrológico da bacia.

Figura 19 – Vazão de pico para o ano de 1985



Fonte: Autor (2025).

Figura 20 – Vazão de pico para o ano de 2023



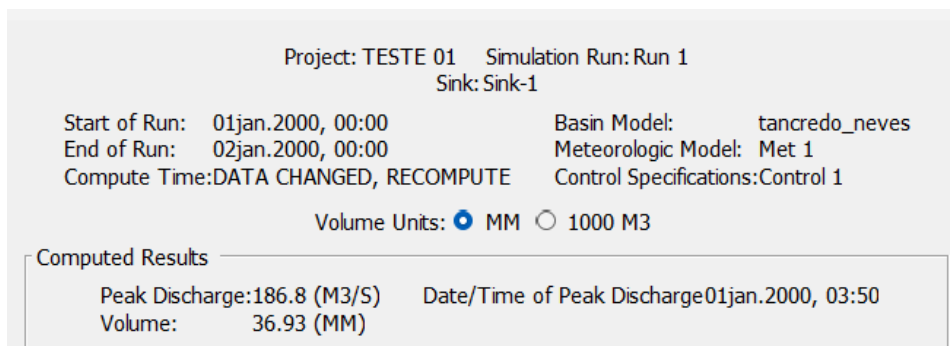
Fonte: Autor (2025).

Observa-se um aumento expressivo de 24,5% na vazão de pico, que passou de 186,8 m³/s para 232,5 m³/s, representando um incremento absoluto de 45,7 m³/s. Segundo Tucci (2000), aumentos na vazão de pico na faixa de 20-30% são característicos de bacias que passaram por processos moderados de urbanização, compatível com os 24,5% observados neste estudo.

De forma similar a vazão, o volume escoado apresentou crescimento de 23,7%, evoluindo de 36,93 mm para 45,68 mm. Sendo assim, os incrementos de vazão de pico e volume escoado segue o padrão esperado para alterações no coeficiente de escoamento superficial, conforme demonstrado por Leopold (1968).

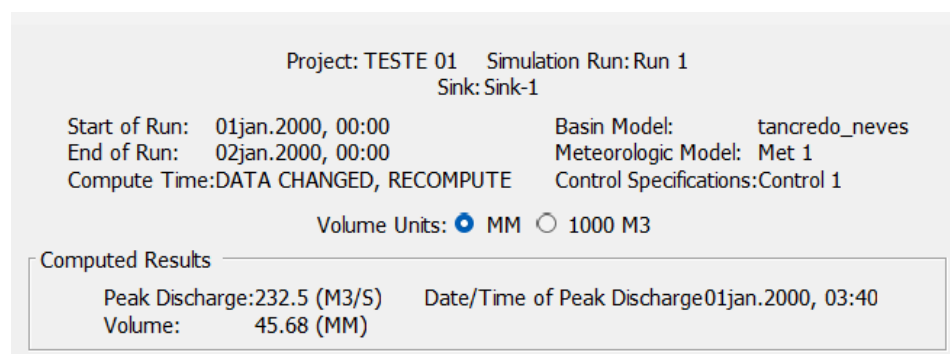
Além disso, registrou-se uma antecipação de 10 minutos no tempo de ocorrência do pico de vazão, reduzindo de 03:50 para 03:40, o que equivale a uma diminuição de 4,2% no tempo de resposta da bacia. Essa antecipação do tempo de pico em 10 minutos, correspondente a uma redução de aproximadamente 4-5% no tempo de concentração da bacia, constitui fenômeno consistentemente documentado por Chow et al. (1988) em bacias com aumento de áreas impermeáveis.

Figura 21 – Resumo dos resultados para o ano de 2023



Fonte: Autor (2025).

Figura 22 – Resumo dos resultados para o ano de 2023



Fonte: Autor (2025).

A comparação entre os dois períodos demonstra de forma clara o efeito da urbanização sobre o comportamento hidrológico da bacia. O aumento do Curve Number de 1985 para 2023 está associado a maior impermeabilização do solo, o que resulta em maiores picos de vazão, menor tempo de concentração e maior volume escoado superficialmente. Essa tendência evidencia a importância do planejamento urbano aliado à drenagem sustentável, a fim de mitigar os impactos das mudanças no uso do solo sobre os sistemas hídricos urbanos.

5 CONCLUSÃO

A análise do comportamento hidrológico da Bacia Hidrográfica Igarapé Tancredo Neves entre 1985 e 2023 revelou mudanças significativas decorrentes da intensificação da urbanização na região. A avaliação do uso e cobertura do solo mostrou uma redução expressiva das áreas vegetadas e o avanço das superfícies impermeáveis, como áreas urbanizadas e setores destinados à agropecuária. Esse processo alterou diretamente o potencial de infiltração do solo, refletido no aumento do Curve Number (CN), que passou de 70 para 75 ao longo do período estudado.

Essas transformações resultaram em mudanças marcantes no escoamento superficial. Em 1985, predominavam áreas com escoamento baixo, enquanto em 2023 observou-se um aumento significativo das classes de escoamento médio e moderado, distribuídas por toda a bacia. Isso confirma um cenário crescente de impermeabilização do solo, que eleva a velocidade e o volume de água direcionados à rede de drenagem.

Os resultados da modelagem hidrológica reforçam esse diagnóstico. A vazão de pico registrou um aumento de 24,5%, saltando de 186,8 m³/s em 1985 para 232,5 m³/s em 2023, o que representa um incremento de 45,7 m³/s. O volume escoado também apresentou elevação de 23,7%. Além disso, houve uma antecipação de 10 minutos no tempo de ocorrência da vazão máxima, evidenciando que a bacia passou a responder mais rapidamente aos eventos de precipitação intensa. Esses resultados demonstram que o sistema hidrológico se tornou mais sensível e mais sujeito a eventos extremos de cheia.

Diante desse quadro, conclui-se que a bacia está mais vulnerável a processos de inundação, especialmente em áreas de maior ocupação urbana. O estudo evidencia a necessidade de revisão das estratégias de expansão urbana e de implementação de medidas que priorizem a proteção das áreas permeáveis, a manutenção da vegetação remanescente e a adequação da infraestrutura de drenagem.

A relevância deste trabalho está em fornecer uma análise temporal permitindo compreender como as transformações do território influenciaram o comportamento hidrológico ao longo de quase quatro décadas. Além disso, o estudo contribui com informações essenciais para o planejamento urbano, para a gestão de riscos hidrológicos e para o aprimoramento de práticas de engenharia que considerem a dinâmica natural da bacia. Também reforça a importância da modelagem hidrológica e do geoprocessamento como ferramentas indispensáveis para o diagnóstico e a tomada de decisão em áreas urbanas.

Assim, este trabalho não apenas quantifica as alterações ocorridas, mas também destaca a urgência de integrar planejamento ambiental e desenvolvimento urbano, a fim de promover um uso mais sustentável e seguro do território da Bacia Hidrográfica Igarapé Tancredo Neves.

REFERÊNCIAS

- ABREU, M. C.; SOBRINHA, R. B.; BRANDÃO, J. L. B. Incertezas na modelagem chuva-vazão associadas aos métodos de distribuição temporal de chuvas intensas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE, 6., 2017, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), 2017. pp. 1-6.
- ALVES, A. V. P., SANTOS, G. B. d. S., FILHO, F. C. M. d. M. & SANCHES, L., 2013. Análise dos métodos de estimativa para os parâmetros das distribuições de Gumbel e GEV em eventos de precipitações máximas na cidade de Cuiabá-MT. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, Volume 6, nº 1, pp. 32-43.
- BARRELLA, W. et al. As relações entre as matas ciliares, os rios e os peixes. In: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO FILHO; H.F. (Ed.) Matas ciliares: conservação e recuperação. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.
- BOTELHO, R.G. M.; SILVA, A.S. Bacia Hidrográfica e Qualidade Ambiental. In: VITTE, A. C.; GUERRA, A. J. T. (Org.). Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007.
- BRAGA, V. d. S., 2018. Uso do método fuzzy c-means para o agrupamento de estações pluviométricas na regionalização de equações de chuvas intensas. Curitiba (PR). Trabalho Final de Curso (Curso de Engenharia Civil) - Departamento de Hidráulica e Saneamento da Universidade Federal do Paraná.
- BRASIL. Lei Federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997. Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Diário Oficial da União. Brasília, Imprensa Oficial, 09 de janeiro de 1997.
- CALETKA, M.; MICHALKOVÁ, M. Š.; KARÁSEK, P.; FUČÍK, P. Improvement of SCS-CN initial abstraction coefficient in the Czech Republic: A study of five catchments. *Water*, v. 12, n. 7, p. 1964, 2020. DOI: 10.3390/w12071964. Acesso em: 20 set. 2025.
- CETESB. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Drenagem urbana: Manual de projeto. 3. ed., São Paulo, 492p., 1986.
- CHOW, V. T. et al. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- CLARKE, R. T. A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 19, p. 1–20, 1973.
- COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013.
- CONCEIÇÃO NETO, R. C.; RODRIGUES, E; TEJAS, G. T. T; SOUZA, R. M. S. MANIESI, V. Determinação da equação de intensidade, duração e frequência para precipitações pluviométricas máximas de Porto Velho, RO. In: Congresso Técnico-Científico da Engenharia e Agronomia, 9, 2023, Gramados. Anais eletrônicos [...] Rio Grande do Sul:

CONTECC, 2023. Disponível em: <https://www.confea.org.br/eventos/contecc/contecc-2023/civil>. Acesso em: 19 out. 2025.

COSTA JUNIOR, J. R. C. Como criar um Hidrograma Unitário Sintético? – Sobre Águas. 2022. Disponível em: <https://sobreasaguas.com/2022/05/04/como-criar-um-hidrograma-unitario-sintetico/>. Acesso em: 15 jun. 2025.

EVANGELISTA, J. R.; LOPES, S. R. T.; ZILES, L. M. M. P.; TEJAS, G. T.; GOBO, J. P. A. Impacto do desmatamento na temperatura de superfície terrestre e vegetação na Reserva Biológica do Jaru – RO. Revista Brasileira de Climatologia, Dourados, v. 37, p. 163-185, jul./dez. 2025. ISSN 2237-8642. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima>. Acesso em: 30 jun. 2025.

FEITOSA JUNIOR, Jamilton Gonçalves. Estimativa da precipitação máxima diária anual e equação de chuvas intensas para seis municípios da região sul do Brasil. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2018. Disponível em: <
<http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/handle/1/25301>>. Acesso em: 12 out. 2025.

FORSDYKE, A. G., 1978. Previsão do tempo e clima. São Paulo : Melhoramentos/Edusp.

FREITAS, L.E et al. Atlas Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Macaé. Rio de Janeiro: Editora Nova Triade do Brasil Ltda, 2015. p. 96.

FRITZEN, M.; BINDA, A. L. Alterações no ciclo hidrológico em áreas urbanas: cidade, hidrologia e impactos no ambiente. Ateliê Geográfico, Goiânia, v. 5, n. 3, p. 239–254, dez. 2011. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/atelie/article/view/16703>. Acesso em: 30 out. 2025.

GOMES, A. O., 2011. Modelagem estatística da precipitação: estudo de caso bacia do rio Taquarizinho / MS. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. 63 p. Disponível em: . Acesso em: 12 set. 2025.

GUIMARÃES, G. M.; SOARES FILHO, Britaldo Silveira (Org.). Modelagem da Dinâmica Intra-Urbana no Bairro Savassi, Em Belo Horizonte. In: ALMEIDA, C. M.; CAMÂRA, G.; MONTEIRO, A. M. V. (Org.). Geoinformação em urbanismo: cidade real x cidade virtual. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. Cap. 13. p. 286–303.

HARVEY, David. A produção capitalista do Espaço. 2. ed. São Paulo: Annablume, 2006.

HAWKINS, R. H. *et al.* Runoff Curve Number Method: Examination of the Initial Abstraction Ratio. In: ASCE WATERSHED MANAGEMENT CONFERENCE, 2003. Proceedings [...]. American Society of Civil Engineers, 2003. Disponível em: https://ponce.sdsu.edu/hawkins_initial_abstraction.pdf?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 05 Ago. 2025

HOLTZ, A. C. T., 1976. Precipitação. Em: Hidrologia Básica. São Paulo: Edgard Blucher, pp. 7-34.

HUFF, F. A. Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water resources research*, v. 3, n. 4, p. 1007-1019, 1967. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/WR003i004p01007>. Acesso em: 13 ago. 2025

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Malha Municipal. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-doterritorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: 06 fev. 2025.

LAIPELT, L. et al. ANADEM: A digital terrain model for South America. 2024. Submetido para publicação na Remote Sensing. Disponível em: <https://www.preprints.org/manuscript/202404.1305/v1>. Acesso em: 14 mai. 2025.

LEOPOLD, L. B. (1968). *Hydrology for urban land planning*. USGS Circular 554. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/circ/1968/0554/report.pdf>. Acesso em: 24 de set. 2025.

LIMA, W. P.; ZAKIA, M. J. B. Hidrologia de matas ciliares. In: RODRIGUES, R. R.; LEITÃO FILHO, H. F. (Ed.) *Matas ciliares: conservação e recuperação*. 2. ed. São Paulo: EdUSP, 2000. p. 33–43.

MACHADO, Carlos José Espínola. A Questão Regional e o Planejamento do Território no Brasil. In: *Rumos do Desenvolvimento Brasileiro: Elementos para a Construção de um Projeto de Desenvolvimento com Equidade - Volume II*. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2000. p. 97-124.

MANSANO, A. P. Aplicação de modelagem hidrológica e hidráulica no mapeamento de inundações na bacia do Igarapé São Francisco, Rio Branco – AC. 2024. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 2024.

NAGHETTINI, M. & PINTO, E. J. d. A., 2007. *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte: CPRM. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/454>. Acesso em: 15 ago. 2025

MOREIRA, I. A. Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros. 2005. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, S. C. Relação entre intensidade, duração e frequência de chuvas em Rio Claro, SP: Métodos e aplicação. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, n. 13, p. 59-68. 2009. Disponível em: http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/Sumario_Numero13.htm. Acesso em: 27 set. 2025.

NAGHETTINI, M. & PINTO, E. J. d. A., 2007. *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte: CPRM.

NASCIMENTO, C. P.; SANTOS, C.; SILVA, M. Porto Velho: A produção do espaço urbano de Rondônia (1980/2010). *Revista Geografar*, v. 7, n. 1, p. 20–52, 2012. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/geografar/article/view/22447/18461>. Acesso em: 9 mai. 2025.
SANTOS, C. A fronteira do Guaporé. Porto Velho: EDUFRO, 2001.

OLIVEIRA, R. S., 2017. Determinação da equação de chuvas intensas para o município de Toledo/PR. Toledo (PR). Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

PENNER, G. C.; NASCIMENTO, C. R. P. Análise estatística da precipitação máxima diária para Franca, SP, como o propósito da curva IDF. Revista Ciências Exatas e Naturais, v. 20, n. 1, 2018. DOI: 10.5935/RECEN.2018.01.01.

PEREIRA, D. C.; DUARTE, L.R.; SARMENTO A. P. Determinação da curva de intensidade, duração e frequência do município de Ipameri-GO. REEC. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 13, n. 2, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5216/reec.v13i2.43330>

PINTO, N. L. de S. et al. Hidrologia básica. 18. reimpr. São Paulo: Edgard Blücher, 2017.

PINTO, E. J. D. A. Atlas pluviométrico do Brasil: Metodologia para definição das equações Intensidade-Duração-Frequência do Projeto Atlas Pluviométrico. Belo Horizonte. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. CPRM. 2013. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/11560>. Acesso em: 21 jun. 2025.

SANTOS, Milton. Metamorfoses do Espaço Habitado. 6. ed. São Paulo: Edusp, 2008.

SANTOS, M.; SILVEIRA, M. L. O Brasil: Território e sociedade no início do século XX. 17. ed. Rio de Janeiro: Record, 2013.

SILVA, A. S. Solos Urbanos. In: GUERRA, A. J. T. Geomorfologia Urbana. Rio de Janeiro: Bertrand, 2011.

RIGHETTO, A. M.; GOMES, K. M.; FREITAS, F. R. S. Poluição difusa nas águas pluviais de uma bacia de drenagem urbana. Eng. Sanit. Ambient., v. 22, n. 6, p. 1109–1120, 2017.

SILVEIRA, A. L. L. da. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). Hidrologia: ciência e aplicação. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS; ABRH, 2001. p. 35–51.

RONDÔNIA. Lei Complementar Nº 255/2002. Recursos Hídricos - Institui a Política, cria o Sistema de Gerenciamento e o Fundo de Recursos Hídricos do Estado de Rondônia e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília, Imprensa Oficial, 25 de janeiro de 2002.

ROSS, C. W.; PRIHODKO, L.; ANCHANG, J. Y.; KUMAR, S. S.; JI, W.; HANAN, N. P. Grupos Hidrológicos Globais de Solos (HYSOGs250m) para Modelagem de Escoamento Baseada em Número de Curvas. 2018. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, EUA. Disponível em: <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1566>. Acesso em: 20 Ago. 2025

SABINO, M., 2018. Intensidade-Duração-Frequência de Precipitação Máxima em Mato Grosso. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Física Ambiental, UFMT. pp. 13-24.

SILVA, C. G. F. Relatório Final do Projeto de Iniciação Científica: Avaliação morfométrica da Bacia do Igarapé Tancredo Neves como indicativo da suscetibilidade a ocorrência de

inundações e alagamentos. Porto Velho, Instituto Federal de Rondônia, 2023. Disponível em: https://suap.ifro.edu.br/media/upload/pesquisa/relatorios/Resumo_Expandido-2adaf687d6e74d2a9448b2c5360bdd22.pdf. Acesso em: 14 fev. 2025.

SINGH, V. P.; FREVERT, D. K. (Ed.). *Mathematical models of large watershed hydrology*. Highlands Ranch: Water Resources Publications, 2002. 891 p. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=abRyo4OLjgYC&printsec=frontcover>. Acesso em: 24 jun. 2025.

STEFFEN, A. P., 2018. Estimativa e mapeamento da chuva de projeto para instalações prediais na região oeste do Paraná. Toledo-PR 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

TRANCOSO, R.; CARNEIRO FILHO, A.; TOMASELLA, J.; SCHIETTI, J.; FORSBERG, B. R.; MILLER, R. P. Deforestation and conservation in major watersheds of the Brazilian Amazon. *Environmental Conservation*, v. 36, n. 4, p. 277-288, 2009.

TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. S.; SILVEIRA, V. S. Zoneamento do Risco de Inundação do rio Vacacaí no Município de São Gabriel, RS. *Revista Geo UERJ*, n. 24, v. 1, 2013. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/geouerj/article/view/3808/5036>. Acesso em: 14 mai. 2025.

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Editora da UFRGS, 2000.

TUCCI, C. E. M., 2001. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2. ed. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. Inundações urbanas na América do Sul. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cm/a/DtjpbSNnDJXFQkVmp4TbL4L/>. Acesso em: 8 jun. 2025

TUCCI, C. E. M. & BERTONI, J. C., 1993. Precipitação. Em: *Hidrologia Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: UFRGS, pp. 177-231.

TUCCI, C. E. M. *Modelos Hidrológicos*. 2 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS; ABRH; GWP, v. 1, 678 p., 2005.

TUCCI, C. E. M. *Inundações urbanas: impactos da urbanização*. Porto Alegre: Ed. ABRH/RHAMA, p87-124, 2007.

TUCCI, C. E. M. *Urbanização e Recursos Hídricos*. In: TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (Orgs.). *Inundações Urbanas na América do Sul*. Brasília: Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura, 2008. p. 23-60.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Landsat 5, Bandas 3 e 4, e Landsat 8, Bandas 4 e 5. Earth Explorer, 2025. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov>
USACE. Hydrologic Engineering Center (HEC). Davis, California, USA, 2012.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE), Hydrologic Engineering Center. HEC-HMS Hydrologic Modeling System, User's Manual, Version 4.0, CPD-74A. Davis, CA, 2013.

Disponível em: https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Users_Manual_4.2.pdf. Acesso em: 5 jun. 2025.

VAREJÃO-SILVA, M. A., 2006. Nuvens e Meteoros. Em: Meteorologia e Climatologia. Recife: Versão Digital 2, pp. 352-360.

VILLELA, S. M. & MATTOS, A., 1975. Precipitação. Em: Hidrologia Aplicada. São Paulo: Mcgraw hill do Brasil, pp. 41-61.

WILLMOTT C. J. On the validation of models. *Physical Geography*, v. 2, p. 184–194, 1981. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-017-3048-8_23. Acesso em: 10 Ago. 2025