



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**A INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA ESTIMATIVA DE
VAZÕES DE PROJETO ATRAVÉS DO MÉTODO GRADEX**

ANA PATRÍCIA GOMES SILVA

POMBAL – PB

2023

ANA PATRÍCIA GOMES SILVA

A INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA ESTIMATIVA DE
VAZÕES DE PROJETO ATRAVÉS DO MÉTODO GRADEX

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Unidade Acadêmica de
Ciências e Tecnologia Ambiental da
Universidade Federal de Campina Grande,
como parte dos requisitos necessários
para obtenção do título de Engenheiro
Civil.

Orientador(a): Prof.(a) Dr. Manoel Moisés
Ferreira de Queiroz

POMBAL – PB

2023

S586i Silva, Ana Patrícia Gomes.

A influência das mudanças climáticas na estimativa de vazões de projeto através do método gradex / Ana Patrícia Gomes Silva. – Pombal, 2023.

111 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Manoel Moisés Ferreira de Queiroz”.

Referências.

1. Equação da chuva. 2. mudanças climáticas. 3. Aguas pluviais. 4. Dimensionamento hidráulico. 5. Drenagem urbana. I. Queiroz, Manoel Moisés Ferreira de. II. Título.

CDU 556.04 (043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

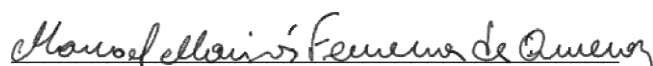
PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO.

ANA PATRÍCIA GOMES SILVA


A INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA ESTIMATIVA DE VAZÕES DE PROJETO ATRAVÉS DO MÉTODO GRADEX

Trabalho de Conclusão de Curso do discente (ANA PATRÍCIA GOMES SILVA) **APROVADO** em 10 de fevereiro de 2023 ano pela comissão examinadora composta pelos membros abaixo relacionados como requisito para obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL pela Universidade Federal de Campina Grande.

Registre-se e publique-se.


Prof. Dr. Manoel Moisés Ferreira de Queiroz
(Orientador – UFCG)


Prof^a. Dr^a. Rosinete Batista dos Santos Ribeiro
(Membro Interno –)


Eng. Deividu Kaik de Lima Araújo (Membro
Externo – STTRans, Patos/PB)

*Dedico esse trabalho a minha mãe e as
minhas irmãs que sempre me ajudaram e
acreditaram em mim.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela minha vida, por ter me fornecido força e coragem para continuar após passar por vários obstáculos, pela oportunidade de fazer uma graduação e por todas as pessoas incríveis que ele botou na vida minha durante todos esses anos.

Agradeço a toda minha família, especialmente, a minha mãe Maria de Jesus e as minhas irmãs Eloana, Emanuela e Laíza, por sempre me ajudar, me apoiar e acreditar no meu potencial, pois sem ela eu não teria chegado onde estou e nem me tornado quem eu sou hoje.

Agradeço a todos os amigos que fiz durante essa jornada na UFCG, especialmente a Ihasmim, Marina Mirelly, Naedna, Dayana, Diego Armando, Tatiane e Pedro Víctor, que me apoiaram na tomada decisões, que confiaram e me ajudaram em muitos momentos. Além disso, agradeço também a todos os membros da Pórtico Engenharia Jr, gestão 22/23, que me acolheram como parte dessa grande família e permitiram me desenvolver profissionalmente e pessoalmente.

Por fim, agradeço a professora Dr. Rosinete Batista, que me inseriu no mundo da hidráulica e ao professor Dr. Manoel Moisés que me fez abrir os olhos para essa magnífica área que é a de Recursos Hídricos, pelos ensinamentos passados e por ser uma grande fonte de inspiração.

“Se você não gosta do seu destino, não o aceite. Em vez disso, tenha a coragem para transformá-lo naquilo que você quer que ele seja”

- Naruto Uzumaki

RESUMO

O aumento da urbanização atuando em conjunto com as mudanças climáticas, na atualidade, tem intensificado os problemas decorrentes das enchentes urbanas devido ao aumento das vazões. Dessa forma, séries pluviométricas são utilizadas para estimar as vazões de cheia através de modelos sintéticos em decorrência da escassez de dados fluviométricos. Esta pesquisa tem como objetivo estimar vazões de projeto pelo método Gradex para um canal de macrodrenagem em um cenário anterior as mudanças climáticas atuais, com a utilizada da série da ANA, e outro que englobe as alterações climáticas, com a série da AESA. Os resultados mostram que as vazões tiveram seus valores aumentados em cerca de 1,7 vezes, pois para o primeiro cenário a vazão encontrada foi de 147,2 m³/s e para o segundo de 248 m³/s. A largura de fundo do canal foi cerca 60% maior para os dados mais recentes. Isso foi alcanço pela manipulação das séries históricas pluviométricas da ANA e AESA, aplicação do método dos blocos alternados como distribuição temporal de chuvas intensas, o método CN do SCS como determinação da chuva efetiva e o método Santa Bárbara na geração dos hidrogramas. Conclui-se que a consideração das mudanças climáticas no dimensionamento hidráulico gera um volume considerável de escoamento superficial, o que torna necessário a atualização constante das curvas IDF utilizadas. Além disso, é necessário adotar medidas de controle de enchentes e formular um plano de drenagem de águas pluviais quando o mesmo não é existente.

Palavras-chave: Equação da chuva, mudanças climáticas, águas pluviais.

ABSTRACT

The increase in urbanization working in conjunction with climate change, nowadays, has intensified the problems arising from urban floods due to increased flows. Thus, rainfall series are used to estimate the flow of flood through synthetic models due to the scarcity of fluviometric data. This research aims to estimate project flows by the Gradex method for a macrodrainage channel in a scenario prior to current climate change, with the one used in the ANA series, and another that encompasses climate change, with the ESA series. The results show that the flows had their values increased by about 1.7 times, because for the first scenario the flow was 147.2 m³/s and for the second of 248 m³/s. The bottom width of the channel was about 60% higher for the most recent data. This was achieved by the manipulation of the historical rainfall series of ANA and AESA, application of the alternating block method as temporal distribution of intense rainfall, the CN method of the SCS as determination of the effective rainfall and the Santa Barbara method in the generation of hydrograms. It is concluded that the consideration of climate change in hydraulic dimensioning generates a considerable volume of surface flow, which makes it necessary to constantly update the IDF curves used. In addition, it is necessary to adopt flood control measures and formulate a rainwater drainage plan when it does not exist.

Keywords: Rain equation, climate change, rainwater.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenvolvimento urbano e seus impactos no sistema de drenagem.	24
Figura 2 - Invasões da Várzea	26
Figura 3 - Planejamento de sistemas de drenagem urbana - Fluxograma das atividades principais	29
Figura 4 - Diagrama das metodologias adotadas para a estimativa de vazões de enchente	32
Figura 5 - Extrapolação da função de distribuição de extremos do volume escoado, a partir de TR = 10 anos, paralela à função de distribuição de extremos do volume precipitado.....	36
Figura 6 - Tipos de escoamentos em condutos livres	50
Figura 7 - Canalização a céu aberto. Tipos de revestimentos mais comuns	51
Figura 8 - Elementos hidráulicos característicos de diferentes tipos de seções transversais.....	52
Figura 9 - Etapas da metodologia proposta.....	55
Figura 10 - Localização do município de estudo.	56
Figura 11 - Mapa geológico de Pombal/PB	57
Figura 12 - Delimitação da bacia.....	62
Figura 13 - Perfil do talvegue	Erro! Indicador não definido.
Figura 14 - Mapa do relevo da bacia.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 15 - Classificação do solo	64
Figura 16 - Mapa de Uso e Ocupação	65
Figura 17 - Séries Históricas de precipitação	66
Figura 18 - Gráfico da linearização da intensidade	69
Figura 19 - Gráfico Log (T) x Log (C)	70
Figura 20 - Gráfico da intensidade linearizada - dados AESA	72
Figura 21 - Gráfico Log (T) x Log (C)	73
Figura 22 - Curvas IDF para TR=50 anos	74
Figura 23 - Distribuição Temporal de Chuvas Intensas para TR=50 anos	76
Figura 24 - Hietograma de chuva efetiva para TR=50 anos.....	78
Figura 25 - Hidrograma de projeto para TR=50anos.....	80
Figura 26 - Distribuição de Gumbel - dados ANA.....	80
Figura 27 - Distribuição de Gumbel - dados AESA	81

Figura 28 - Gradex - dados ANA.....	82
Figura 29 - Gradex - dados AESA.....	83
Figura 30 - Fator de forma K utilizado no dimensionamento.....	85
Figura 31 - Hidrogramas de projeto - série ANA.....	102
Figura 32 - Hidrogramas de Santa Bárbara - série AESA.....	107

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fórmulas de tempo de concentração avaliadas por Silveira (2005).....	41
Quadro 2 - Equações de tempo de concentração recomendadas para bacias urbanas e rurais	41
Quadro 3 - Equações para tempo de concentração	42
Quadro 4 - Fator de forma K para canais retangulares, triangulares ou trapezoidais	53
Quadro 5 - Fator de forma K1 canais circulares (PORTO, 2006).....	53
Quadro 6 - Cálculo da altura d'água (PORTO, 2006).....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais características da urbanização e seus efeitos nas bacias hidrográficas.....	25
Tabela 2 - Elementos da Microdrenagem (Modificado de BIDONE; TUCCI, 1995) ..	27
Tabela 3 - Medidas Estruturais.....	30
Tabela 4 - Premissas do método GRADEX quanto aos dados necessários	33
Tabela 5 - Condições de umidade.....	44
Tabela 6 - Agrupamento hidrológico dos solos	45
Tabela 7 - Grupos hidrológicos de solos	46
Tabela 8 - Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas – Condição II	47
Tabela 9 - Correção dos valores de CN de acordo com a umidade antecedente do solo	48
Tabela 10 - Velocidades médias em canais.....	54
Tabela 11 - Declividade Média do Talvegue	63
Tabela 12 - Postos pluviométricos	66
Tabela 13 - Distribuição de Gumbel série ANA.....	66
Tabela 14 - Desagregação da chuva da ANA	67
Tabela 15 - Intensidade de chuva - dados ANA.....	68
Tabela 16 - Log(T) x log(C) - dados ANA.....	69
Tabela 17 - Distribuição de Gumbel - dados AESA.....	71
Tabela 18 - Desagregação da chuva - dados AESA.....	71
Tabela 19 - Intensidades de chuva - dados AESA.....	72
Tabela 20 - Log(T) x log(C) - dados AESA.....	73
Tabela 21 - Tempo de Concentração Médio	75
Tabela 22 - Distribuição Temporal de Chuvas Intensas - Dados ANA.....	75
Tabela 23 - Distribuição Temporal de Chuvas Intensas - Dados AESA.....	76
Tabela 24 - Cálculo do CN Médio	77
Tabela 25 - Chuva excedente TR=50 anos - dados ANA.....	78
Tabela 26 - Chuva excedente TR=50 anos - dados AESA	78
Tabela 27 - Hidrograma de Projeto para TR=50 anos - dados ANA	79
Tabela 28 - Hidrograma de Projeto para TR=50anos - dados AESA	79
Tabela 29 - Aplicação do Método GRADEX - dados ANA	81
Tabela 30 - Aplicação do Método GRADEX - dados ANA	82

Tabela 31 - Valores do coeficiente de rugosidade da fórmula de Manning	84
Tabela 32 - Média e desvio padrão - série ANA.....	93
Tabela 33 - Distribuição de Gumbel - série ANA.....	93
Tabela 34 - Média e desvio padrão - série AESA.....	95
Tabela 35 - Distribuição de Gumbel - série AESA.....	95
Tabela 36 - Distribuição Temporal da chuva - série ANA.....	96
Tabela 37 - Distribuição Temporal da chuva - série ANA.....	96
Tabela 38 - Valores de vazão - série ANA	97
Tabela 39 – Valores de vazões - séries AESA.....	102

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

- A – área da bacia;
- ANA – Agencia nacional das águas;
- AESA – Agencia Executiva de Gestão das Águas;
- A_{imp} – área impermeável da bacia;
- A_m – área molhada;
- b – comprimento superficial do canal;
- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo;
- CN – curva número;
- h – lâmina de água;
- h_{EXC} – chuva efetiva;
- h_{TR} – altura escoadas para tempos de retorno desejado;
- i – intensidade de chuva;
- i_{ANA} – intensidade de chuva para dados da ANA;
- i_{AESA} – intensidade de chuva para dados da AESA;
- IDF – Intensidade Duração Frequência;
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;
- i_0 – declividade de fundo;
- k – coeficiente de forma;
- m – razão de aspecto;
- M – coeficiente dinâmico;
- n – coeficiente de Manning;
- P – precipitação total;
- Q – vazão;
- $\overline{Q_{TR}}$ – vazão média;
- Q_{TR} – vazão de pico;
- R – fator de pico;
- R_h – raio hidráulico;
- S – retenção potencial do solo;
- SIG – Sistema de Informação Geográfica;
- t_{base} – tempo base de duração do escoamento;
- t_c – tempo de concentração;

- TR – tempo de retorno;
- y – variável reduzida de Gumbel;
- y_0 – lamina d'água relativa;
- μ – média;
- σ – desvio padrão;

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	19
1.1.	Justificativa	20
1.2.	Objetivos	21
1.2.1.	Objetivo Geral	21
1.2.2.	Objetivos Específicos	21
1.3.	Escopo do Trabalho	21
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1.	Mudanças Climáticas	22
2.2.	Urbanização	23
2.3.	Sistema de Drenagem Urbana	26
2.3.1.	Microdrenagem	27
2.3.2.	Macrodrenagem	28
2.3.3.	Medidas de Controle de Enchentes	30
2.4.	Estimativa de Vazões de Projeto	31
2.4.1.	Método GRADEX	31
2.4.1.1.	Descrição do Método	33
2.4.1.2.	Distribuição de Probabilidades.....	36
2.4.2.	Dados Necessários	38
2.4.2.1.	Equação de Chuvas Intensas	38
2.4.2.2.	Geoprocessamento e a Caracterização Geomorfológica de Bacia Hidrográfica	39
2.4.2.3.	Tempo de Concentração.....	40
2.4.2.4.	Distribuição Temporal	42
2.4.2.5.	Precipitação Efetiva	44
2.4.2.6.	Geração de Hidrogramas pelo Método Santa Bárbara	48
2.5.	Dimensionamento de Canais	50
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1.	Caracterização da Área de Estudo	55
3.1.1.	Dados necessários e geoprocessamento	58
3.2.	Curvas IDF	58
3.2.1.	Séries históricas	58
3.2.2.	Definição das curvas IDF	59

3.3.	Chuva de Projeto	59
3.3.1.	<i>Tempo de Concentração</i>	59
3.3.2.	<i>Distribuição Temporal de Chuvas Intensas</i>	60
3.4.	Hidrogramas de Projeto	60
3.4.1.	<i>Chuva efetiva</i>	60
3.4.2.	<i>Geração dos hidrogramas de projeto</i>	60
3.5.	Aplicação do Método GRADEX.....	61
3.6.	Dimensionamento de Canais	61
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4.1.	Caracterização da Área de Estudo	62
4.2.	Curvas IDF	65
4.3.	Chuva de Projeto	74
4.3.1.	<i>Tempo de Concentração</i>	74
4.3.2.	<i>Distribuição Temporal</i>	75
4.4.	Hidrograma de Projeto	77
4.4.1.	<i>Chuva efetiva</i>	77
4.4.2.	<i>Hidrogramas pelo Método Santa Bárbara</i>	79
4.5.	Aplicação do Método Gradex.....	80
4.6.	Dimensionamento de Canais	83
5.	CONCLUSÕES.....	86
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
	APÊNDICE A – MEMÓRIA DE CÁLCULO DA DISTRIBUIÇÃO DE GUMBEL	93
	APÊNDICE B – MEMÓRIA DE CÁLCULO DA DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DE CHUVAS INTENSAS	96
	APÊNDICE C – MEMÓRIA DE CÁLCULO DA GERAÇÃO DE HIDROGRAMAS PELO MÉTODO SANTA BÁRBARA	97

1. INTRODUÇÃO

O aumento da urbanização atrelado às mudanças climáticas, na atualidade, tem possibilitado a ocorrência de impactos ambientais, cujas magnitudes são decorrentes da alteração da dinâmica de retenção e infiltração da água da bacia, advindas das mudanças de ocupação e uso do solo, com a remoção da cobertura vegetal original e aumento da impermeabilização, intensificando os problemas decorrentes das enchentes urbanas devido à elevação dos picos dos hidrogramas com o aumento das vazões.

A determinação das vazões de projeto de macrodrenagem tem sido um problema recorrente na engenharia, por estarem frequentemente associadas a períodos de retorno substancialmente maiores do que os dos registros fluviométricos regulares. A análise de frequência de cheias, baseada em curtas amostras de dados sistemáticos, pode conduzir as estimativas das probabilidades de excedência e quantis de eventos extremos não representativos.

A ausência de séries históricas de vazões com extensão, periodicidade, resolução temporal e qualidade adequadas é a realidade brasileira em muitas bacias hidrográficas, principalmente bacias urbanas do semiárido, em que se pretende implantar estruturas hidráulicas.

Por outro lado, as séries pluviométricas, por serem mais abundantes que as séries históricas de vazão, são normalmente mais utilizadas para determinar vazões de projeto através de método sintéticos, porém ao utilizar dados de épocas diferentes, possibilita a mistura de informações que representam situações diferentes.

Mudanças contínuas, sutis e cíclicas de longo período no clima, após duas ou três décadas tornam-se significativas. A “persistência” dos fenômenos climáticos que, no caso da hidrologia, descreve o comportamento das precipitações ao longo do tempo, possibilita a ocorrência de períodos com comportamentos hidrológicos (secas ou excesso de chuva) distintos.

Uma alternativa de procedimento para cálculo das vazões máximas em bacias com escassez de dados fluviométrico é o método GRADEX, que propõe a extrapolação da curva de frequência dos volumes de cheia a partir de séries de alturas de precipitação máximas, cuja disponibilidade de dados é mais abundante, permitindo o cálculo de vazões mais realistas.

Dessa forma, este trabalho tem o intuito de realizar estimativas de vazões pelo método GRADEX a partir de séries históricas divididas em cenários que apresentem mudanças climáticas para avaliar o quanto elas influenciam no processo de dimensionamento hidráulico.

1.1. Justificativa

O processo de urbanização gera grandes modificações no ambiente natural, especialmente alterando o uso do solo e agravando os problemas de enchentes urbanas, em um ciclo de causa e efeito que acumula importantes perdas econômicas e sociais, o que resulta em um processo de aumento contínuo da degradação do ambiente construído (MIGUEZ et al., 2016). Ligado a esse processo está as mudanças climáticas que também contribuem com o aumento do escoamento superficial quando uma de suas consequências é o aumento do volume de água precipitado em determinada região.

O controle das enchentes se dá através da utilização de um sistema de manejo das águas pluviais que tem como principal dado de entrada a vazão de pico que é calculada através de modelos determinísticos, como modelos chuva-vazão, ou probabilísticos. Os modelos determinísticos são os mais utilizados e requerem séries extensas de dados pluviométricos que sempre apresentam mudanças de comportamento.

Conforme afirma Campus (2018), dentre os modelos existem, um dos capazes de detectar as mudanças de tendências dos ciclos hidrológicos através da análise da frequência das chuvas é o Método Gradex.

1.2. Objetivos

1.2.1. Geral

Proceder a estimativa e análise de vazões de projeto para estrutura de macrodrenagem na bacia hidrológica urbana na cidade de Pombal-PB em cenários anteriores e posteriores às mudanças climáticas atuais.

1.2.2. Específicos

- Obter equações de chuvas intensas para a cidade de Pombal – PB a partir de dados pluviométricos anteriores e posteriores às mudanças climáticas;
- Gerar os hidrogramas de projeto através do método de Santa Bárbara;
- Estimar a vazão de pico do canal pelo Método GRADEX;
- Análise dos resultados por meio do dimensionamento de canais utilizando as vazões estimadas;

1.3. Escopo do Trabalho

A presente pesquisa será dividida em capítulos, no qual o 2º trata-se do referencial teórico, ou seja, todos os conceitos e métodos necessários para sua elaboração. O 3º capítulo refere-se a metodologia proposta para desenvolvimento da pesquisa. O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e o 5º capítulo as conclusões.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Mudanças Climáticas

Um dos grandes desafios da atualidade é compreender e prever as mudanças climáticas de forma que seja possível elaborar medidas preventivas que amenizem os desastres naturais e permita a adaptação dos seres humanos a sua nova realidade (SILVA e GUETTER, 2003). Além disso, as definições existentes para alterações climáticas são numerosas e estão geralmente ligadas a fatores antrópicos, pois a principal causa dessas variações é o agravamento do fenômeno natural conhecido como efeito estufa e a emissão de gases na atmosfera provocada pela população intensifica o aquecimento global e torna suas consequências ainda mais severas.

Dessa forma, pode-se definir como variação climática aquela que está relacionada aos fatores naturais do planeta terra e suas respectivas interações e mudança climática como as alterações existentes nas variações climáticas causadas pela ação humana (TUCCI, 2002).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) é uma organização responsável por fornecer dados e relatórios sobre os impactos que as alterações climáticas causam no meio ambiente e, segundo o relatório publicado em fevereiro de 2022, o mundo se encontra em uma situação irreversível e um dos maiores vilões em desastres naturais nos últimos anos é as chuvas extremas.

O Brasil, nesses últimos anos, tem sofrido o impacto dessas variações através do aumento da lâmina de água precipitada que chega à superfície com grande intensidade causando danos ao sistema urbano ou em grande volume contribuindo com as cheias urbanas. Um exemplo desse fato são os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), onde a cidade de Aracaju/SE, obteve no mês de outubro uma chuva acumulada de 85 mm, valor 51% maior do que o frequente nesse período.

Esses dados de precipitações são comumente utilizados na determinação das equações de chuvas intensas, ou curvas IDF, e conseqüentemente na estimativa de vazões de projeto para obras de drenagem urbana; portanto, tais mudanças podem ocasionar alterações nos parâmetros das equações encontradas e influenciar no dimensionamento das estruturas (SILVA, 2022). Dessa forma, toda e qualquer IDF

deve ser atualizada para realizar a correta previsão de cheias de infraestruturas urbanas.

Segundo um estudo realizado por Carneiro, Filho e Raulino (2022), ao atualizar a IDF para a bacia do Rio Áracau, localizado no estado do Ceará, aumentou cerca de 11 vezes a probabilidade de a barragem entrar em colapso. Repetindo o processo para um período de retorno de 10.000 anos, os danos encontrados foram ainda mais severos em decorrência do aumento do pico dos hidrogramas. Sendo assim, é nítido que o impacto que as variações climáticas causam é de alto grau e faz-se necessário a adoção de medidas preventivas e de manutenção do reservatório.

Sendo assim, de maneira geral, medidas que podem ser adotadas para contornar tais cenários são: previsão de vazão, avaliação do impacto do uso do solo sobre bacias e biomas brasileiros, planejamento do espaço de risco de inundação, estimativa os cenários de modificação climática, avaliação das tendências de longo prazo entre as séries hidroclimáticas, impacto da variabilidade hidrológica e da modificação climática sobre o setor elétrico e sua adaptabilidade e avaliação do balanço de carbono dos sistemas naturais brasileiros (TUCCI, 2002).

2.2. Urbanização

O conceito de desenvolvimento urbano, segundo Derycke (1976), envolve os aspectos demográfico e econômico da população e o espacial do território. O aspecto demográfico está relacionado ao crescimento populacional e sua distribuição no território, o espacial refere-se à extensão e a expansão territorial das cidades e, por fim, o aspecto econômico lida com a evolução da produção e da renda urbana. Dessa forma, pode-se definir urbanização como o processo de transformação e desenvolvimento de um meio rural para urbano, pois à medida que a população vai se concentrado em uma determinada região, outras começam a migrar para ela em busca de novas oportunidades. Logo, aquele lugar passa a se expandir cada vez mais e o desenvolvimento econômico tende a evoluir.

A urbanização se desenvolveu rapidamente a partir da segunda metade do século vinte e foi marcada pela grande concentração da população em pequenas áreas, em periferias ou em regiões de risco (TUCCI, 2005). Sendo assim, esse crescimento desordenado deixou parte da população, principalmente a que se

encontrava em regiões mais pobres, sem os serviços de infraestrutura urbana, ou seja, sem acesso a água tratada e saneamento básico.

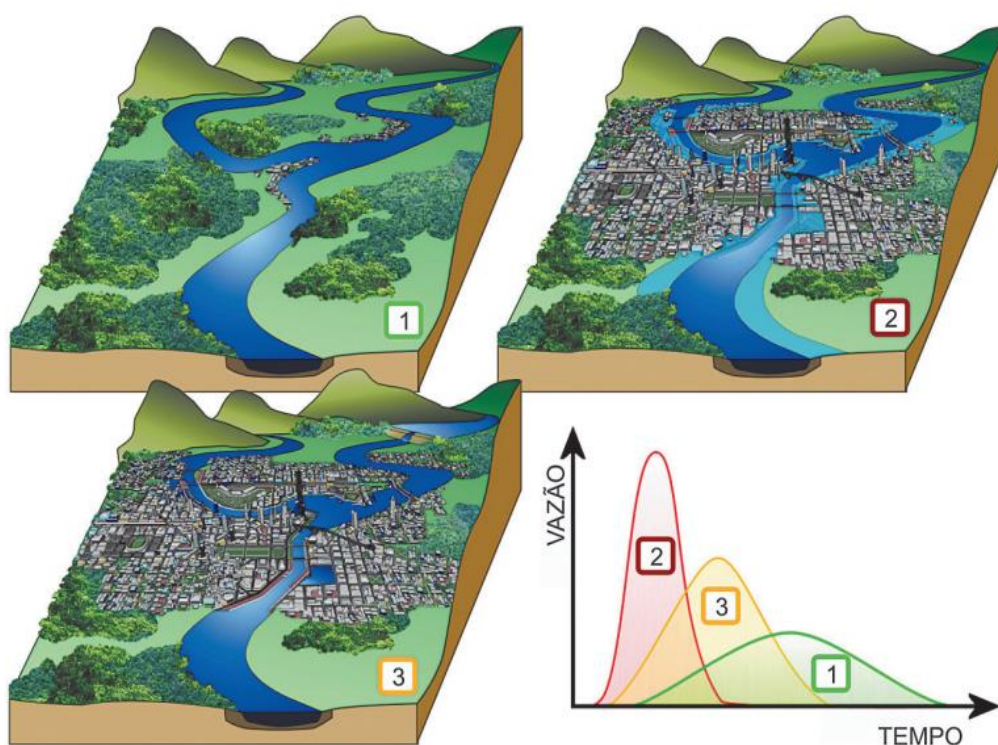
Para SMDU (2012), o desenvolvimento urbano de uma cidade pode ser dividido em 3 cenários distintos, representado na figura 1, que são definidos como:

Cenário 1: Início da ocupação fora da zona de inundação das áreas de várzeas dos corpos hídricos;

Cenário 2: Ocupação urbana desordenada que invade as várzeas dos rios e torna o solo impermeável;

Cenário 3: Bacia apresenta estruturas de controle de cheias.

Figura 1 - Desenvolvimento urbano e seus impactos no sistema de drenagem.



Fonte: SMDU (2012)

O cenário 2 representa o momento na qual os impactos da urbanização geram prejuízos a sociedade. Algumas características da urbanização que causam impactos na bacia hidrográfica foram listadas por Viola (2008) e estão representados na tabela 1.

Tabela 1 - Principais características da urbanização e seus efeitos nas bacias hidrográficas

Características	Impactos
Impermeabilização	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento da vazão de cheia; inibe a recarga natural dos aquíferos; • Diminuição da vazão de estiagem.
Redes de Drenagem	<ul style="list-style-type: none"> • Maiores picos a jusante.
Lixo	<ul style="list-style-type: none"> • Degradação da qualidade d'água; • Entupimento de bueiros e galerias; • Deposição no fundo de canais e rios; • Moléstias de Veiculação Hídrica.
Redes de Esgoto Deficientes	<ul style="list-style-type: none"> • Degradação da qualidade d'água; • Moléstias de Veiculação Hídrica
Desmatamento	<ul style="list-style-type: none"> • Maiores picos e volumes; • Mais erosão; • Assoreamento em canais, galerias e rios.
Ocupação das Várzeas (Áreas sujeitas naturalmente a inundações ampliadas pela ação antrópica)	<ul style="list-style-type: none"> • Maiores prejuízos; • Maiores Picos; • Maiores efeitos das moléstias de veiculação hídrica; • Maiores custos de utilidade pública.
Crescimento populacional e do consumo	<ul style="list-style-type: none"> • Diminuição da disponibilidade hídrica para outros usos que não sejam o abastecimento humano; • Maiores investimentos em infraestrutura.

Fonte: Viola (2008)

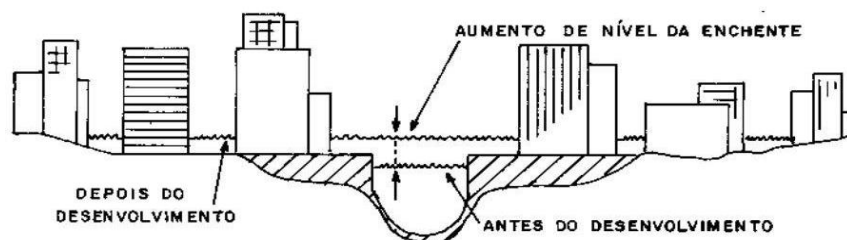
Em relação aos impactos sofridos pela população, Viola (2008) cita as perdas de bem materiais e a morte de pessoas durante desastres naturais, a paralização das atividades econômicas; a contaminação da população pelo contato com água poluída por esgoto ou por materiais tóxicos presentes no subsolo entre outros.

Portanto, conclui-se que para evitar todos os impactos decorrentes da urbanização ou amenizar grande parte de seus efeitos, é necessário realizar um planejamento eficiente que leve em conta não só o sistema de drenagem de águas pluviais, mas sua compatibilização com os demais projetos necessários para tornar a cidade mais sustentável, limpa e livre de problemas de infraestrutura urbana.

2.3. Sistema de Drenagem Urbana

A drenagem urbana é o processo que realiza a coleta, tratamento e transporte das águas pluviais até o corpo receptor, que na maioria das vezes é um rio. Em outras palavras, se trata de um sistema de prevenção contra enchentes urbanas, que, segundo Tucci (2005), são causadas pela inundação das áreas ribeirinhas ou por inundação devida à urbanização, figura 2. No segundo caso, além do aumento das vazões, outros impactos que surgem, segundo o Manual de Drenagem Urbana de Curitiba (2002), é o aumento da temperatura, causada pelas superfícies impermeabilizadas, aumento dos sedimentos produzidos pela população, redução da qualidade da água e contaminação dos aquíferos por aterros e fossas sépticas.

Figura 2 - Invasões da Várzea



Fonte: Tucci (2005)

No Brasil, grande parte dos sistemas de drenagem ou não existem ou não são eficientes, pois quando foram implantados não existia uma normatização. Contudo, ao decorrer dos anos, novos estudos surgiram e modelos foram criados em grandes centros de pesquisa para servirem de base na formulação de medidas preventivas contra as inundações (LIRA, 2003).

Para SMDU (2012), a drenagem urbana deve ser dividida em dois sistemas: a microdrenagem e a macrodrenagem. Os conceitos e as características de cada sistema serão definidos nos tópicos a seguir, mas, de modo geral, a microdrenagem pretende controlar a água que escoar sobre loteamentos de uma cidade e a macrodrenagem a que escoar sobre os corpos hídricos de uma bacia hidrográfica.

2.3.1. Microdrenagem

O sistema de microdrenagem urbana ou rede primária urbana é composto, segundo o Plano Diretor de Macro drenagem Urbana de Curitiba (SMMA, 2002), pelo pavimento das ruas, por guias, sarjetas, bocas de lobo, galerias e pequenos canais. É dimensionado para o período de retorno de 2 a 10 anos e possui o objetivo de impedir o escoamento da água para dentro das edificações, impedir o alagamento de ruas e, conseqüentemente, evitar problemas no trânsito de veículos e pedestres.

O clico desse sistema consiste no escoamento das águas pluviais que estão sobre os loteamentos e ruas para as sarjetas que, por sua vez, direciona a água para as bocas de lobo que são ligadas aos dispositivos de manutenção, postos de visita ou coletores, através das galerias. As funções de cada componente segundo Bidone e Tucci (1995), estão apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 - Elementos da Microdrenagem (Modificado de BIDONE; TUCCI, 1995)

Elemento	Função
Galeria	Tubulações utilizadas para coletar e conduzir as águas pluviais.
Poço ou posto de visita	Dispositivo utilizado na manutenção e inspeção da rede.
Boca de lobo	Dispositivo de captação das águas pluviais presentes nas vias.
Tubo de ligação	Tubulação que direciona a água presente nas bocas de lobo para a galeria ou postos de visita.
Meios-Fios	Blocos de pedra ou concreto que separa o passeio da via pública.
Sarjeta	Faixa da via pública paralela ao meio-fio que recebe e conduz a água das vias públicas.
Sarjetões	Dispositivo de direcionamento da água das sarjetas para as bocas de lobo.
Conduitos forçados	Tubulações responsáveis por conduzir a água sem preencher a seção transversal por completo.
Estações de bombeamento	Conjunto de estrutura, tubulações e máquinas utilizado para conduzir a água para determina altitude quando o escoamento por gravidade não é mais eficaz.

Fonte: Tucci (1995)

Para a CETESB (1980), a drenagem urbana precisa andar junto com a rede de água, de esgoto, elétrica entre outros. Isso é importante porque muitas vezes esses sistemas estão interligados, como é o caso do sistema de esgoto urbano com o de microdrenagem. Segundo Neto e Fernández (2018), os países da América Latina possuem o sistema separador absoluto, na qual os sistemas de esgoto e águas

pluviais são separados. Contudo, dados do SNIS (2021) mostram que 43,5% dos municípios brasileiros estudados possuem sistema exclusivo para drenagem de águas pluviais, 11,9% possuem sistema unitário (misto com esgotamento sanitário), 22,1% possui sistema combinado para drenagem.

Henrique et al (2021), realizou um estudo no canal do Prado, localizado em Campina Grande-PB, onde foram coletadas amostras em 7 pontos ao longo do canal para constatar a contaminação fecal das águas pluviais através da adição de indicadores fecais. Desta forma, um dos indicadores esteve presente em 90% das amostras e os demais em cerca de 50%, o que comprova que o esgoto sanitário é lançando dentro da rede de drenagem urbana.

Portanto, a escolha de qual tipo de sistema de esgotamento utilizar impacta no custo do projeto, pois o sistema unitário requer tubulações com grandes diâmetros que possuem um custo mais elevado no mercado. Outra consequência desse sistema é o risco de enchentes, pois o volume de águas pluviais pode superar o previsto e a seção poderá romper ou causar inundação na cidade (NETO; FERNÁNDEZ, 2018). A pesquisa do SNIS (2021) mostra que 4% dos municípios brasileiros estão sujeitos a risco de inundações e 319,3 mil pessoas já foram desabrigadas ou desalojadas em casos extremos.

Dessa forma, os efeitos podem ser reduzidos através do correto dimensionamento da rede, da execução seguida por recomendações existentes, pelo respeito a topografia e pelo respeito de cada detalhe do projeto para que a rede de macrodrenagem também não sofra danos e consiga cumprir seu objetivo de maneira eficaz.

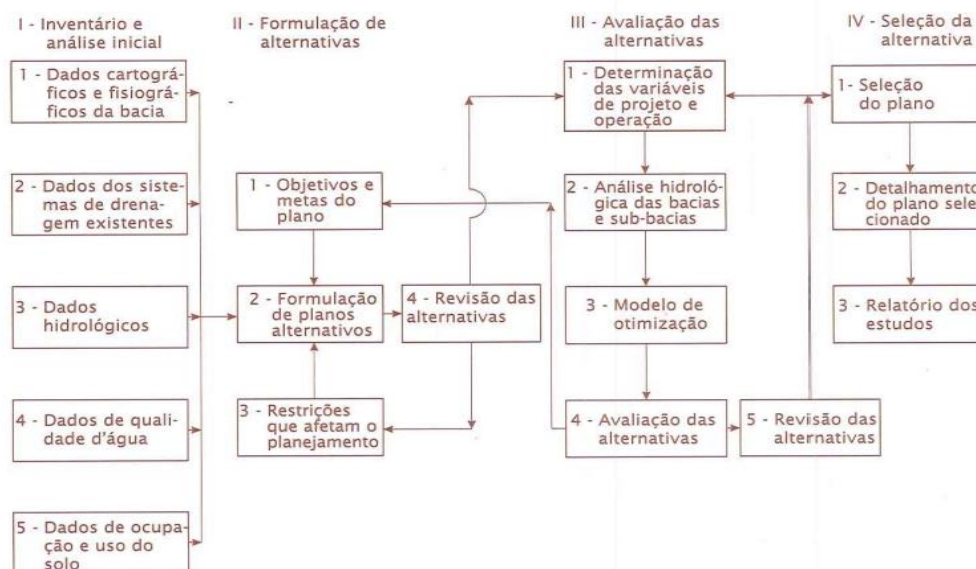
2.3.2. Macrodrenagem

O Plano Diretor de Macrodrenagem Urbana de Curitiba (2002), define o sistema de macrodrenagem como aquele composto por estruturas de maiores dimensões, como canais e córregos, projetado para vazões com período de retorno de 25 a 100 anos. Destina-se a captação das águas do sistema de microdrenagem e do escoamento superficial de águas pluviais, visando evitar as enchentes devido a bacia urbana.

Para Tucci, Porto e Barros (1995), as obras de macrodrenagem consistem em corrigir ou ampliar seções de corpos hídricos, construir canais artificiais ou estruturas de proteção contra erosões, assoreamento, travessias e estações de bombeamento. Por sua vez, a implantação se torna necessária quando existe alagamentos, necessidade de ampliação ou limpeza e quando existe a ocupação das várzeas (LIRA, 2002).

Na formulação de um planejamento de sistemas de drenagem urbana são necessárias diversas atividades. A figura 3 apresenta as principais listadas por Wanielista e Yousef (1993).

Figura 3 - Planejamento de sistemas de drenagem urbana - Fluxograma das atividades principais



Fonte: Wanielista e Yousef (1993)

Segundo Canholi (2005), um plano diretor de macrodrenagem só é efetivo e abrangente se cumprir as etapas básicas presente no fluxograma da figura 3 e também englobar a definição do sistema de macrodrenagem, a consolidação dos critérios básicos de projeto, estudo de projetos existentes, levantamento do quadro institucional e das leis municipais, estaduais e federais vigentes, pois dessa forma a probabilidade de erros no dimensionamento, execução e orçamento pode ser minimizada.

2.3.3. Medidas de Controle de Enchentes

As medidas de controle podem ser classificadas em estruturais e não-estruturais. As medidas estruturais são aquelas onde existe a implantação de estruturas para controlar e melhorar o escoamento da água na bacia. Já as medidas não-estruturais são as baseadas na adoção de planos de adaptação as enchentes (SUDERHSA, 2002).

As medidas estruturais possuem alto custo e agem sobre a bacia para reduzir os picos dos hidrogramas e prevenir erosões. Nos rios, podem acelerar o escoamento da água com a construção de diques, retardar com reservatório ou desviar o escoamento com o uso de canais de desvio (TUCCI, 2005). A Tabela 3 relaciona algumas medidas estruturais, suas principais vantagens e desvantagens e onde podem ser aplicadas.

Tabela 3 - Medidas Estruturais

Medida	Vantagem	Desvantagem	Local de Aplicação
Alteração da cobertura natural	Redução do pico de cheia	Inviável para grandes áreas	Pequenas bacias
Controle de perda do solo	Redução do assoreamento	Inviável para grandes áreas	Pequenas bacias
Construção de diques e polders	Alta proteção da área	Dados significativos caso falhe	Grandes rios e na planície.
Redução da rugosidade por desobstrução	Aumento da vazão com pouco investimento	Efeito localizado	Pequenos rios
Corte de meandro	Ampliação da área protegida e acelera o escoamento	Causa impactos em rios com fundo aluvionar	Área de inundação estreita
Reservatórios no geral	Controle do fluxo a jusante	Difícil localização devido a desapropriação	Bacias intermediárias
Reservatórios com comportas	Maior eficiência	Vulnerável a erros humanos	Projetos de usos múltiplos
Reservatórios para cheias	Operação com perdas reduzidas	Custo do partilhado	Restrito ao controle de enchentes
Caminho da cheia	Amortecimento de volume	Varia com temperatura	Grandes bacias
Desvios	Redução de vazão	Varia com temperatura	Bacias médias e grandes

Fonte: Modificado de SIMONS et al. (1977)

As medidas não-estruturais possuem custos mais baixos e não visam reduzir os impactos das enchentes, possuem apenas o de avisar e ajudar a população. As mais utilizadas, segundo Tucci (2005), são: previsão e alerta de inundação, zoneamento das áreas de risco de inundação, seguro e proteção individual contra inundação.

Em relação a bacia hidrográfica, as medidas de controle podem ser aplicadas na fonte ou distribuída, na microdrenagem ou macrodrenagem. A medida aplicada na fonte é aquela que cobrirá determinada área, como uma praça ou lote residencial, procurando aumentar a infiltração ou armazenamento de água. Na microdrenagem, a medida consiste em drenar a água com maior velocidade através do uso de dispositivos. Por fim, na macrodrenagem, o controle está presente na canalização, pois a ocupação das margens do canal ou corpo hídrico não permite que ele seja ampliado lateralmente, logo, a solução está no aumento da profundidade (SUDERHSA, 2002).

Melhores resultados são encontrados quando medidas estruturais e não-estruturais estão juntas, mas caso o orçamento não permita tal investimento, as soluções preventivas não-estruturais conseguem reduzir os impactos a curto prazo sofridos pela população (CANHOLI, 2005).

2.4. Estimativa de Vazões de Projeto

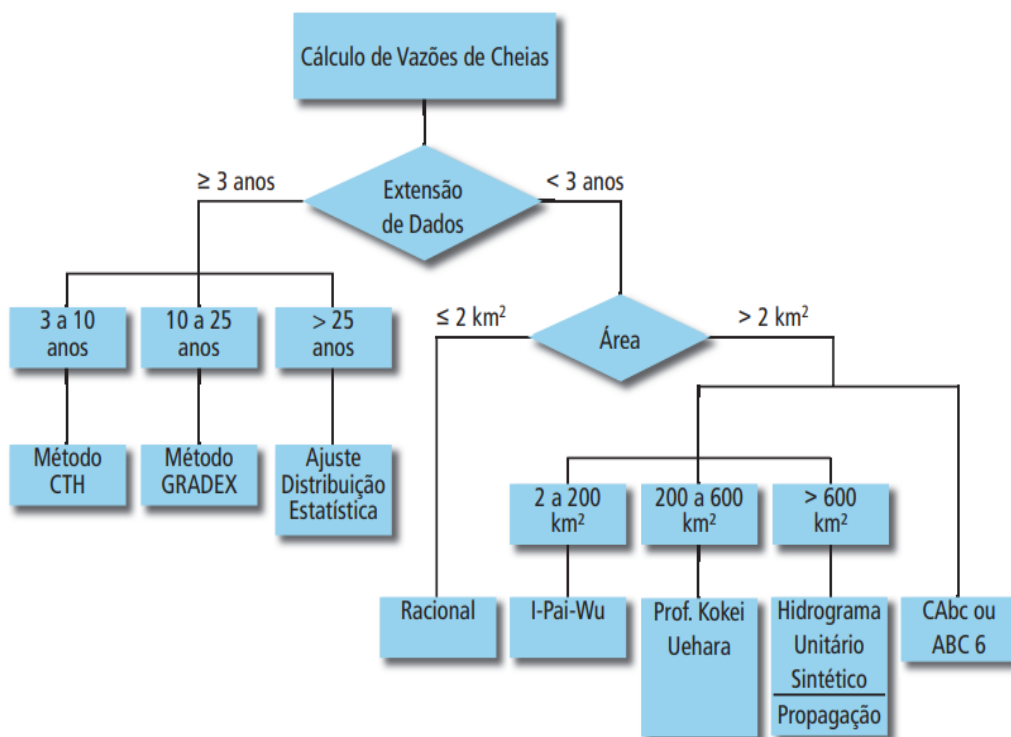
2.4.1. Método GRADEX

O método GRADEX é um método probabilístico de determinação de vazões extremas utilizado em bacias que possuem escassa quantidade de dados fluviométricos. Foi desenvolvido em 1968 pelo serviço de Exploração de Eletricidade da França (EDF), porém só foi apresentado oficialmente por Guillot e Duband em 1968 (CAMPOS, 2018). Pode ser usado na estimativa e extrapolação dos valores de cheias com tempos de recorrências elevados, considerando as frequências de chuvas e utilizando modelo de distribuição de probabilidades com formatos exponenciais para relacionar os volumes precipitados com volumes escoados (ZUFFO; LEME, 2005).

As metodologias existentes e mais utilizadas na estimativa de vazões são listadas no Guia Prático para Projetos de Pequenas Obras Hidráulicas (DAEE, 2005),

onde considerada o Método GRADEX como a aquela a ser utilizada no caso de séries fluviométricas com extensão de dados entre 10 e 25 anos, conforme figura 4.

Figura 4 - Diagrama das metodologias adotadas para a estimativa de vazões de enchente



Fonte: DAEE (2005)

A extensão de dados proposta para o método GRADEX por DAEE (2005) resulta em uma limitação no emprego do método em grande parte do Brasil visto que os dados fluviométricos, que representam de maneira mais eficiente o comportamento de vazões de uma bacia hidrográfica, são escassos e possuem pequenas extensões. Por isso, utiliza-se dados pluviométricos para gerar hidrogramas por modelos chuva-vazão e proceder na utilização do método, mas para garantir que os erros resultantes sejam reduzidos faz-se necessário uma quantidade muito maior desses dados (CAMPOS, 2018). Os requisitos de aplicação do Método GRADEX foram resumidos e descritos por Zuffo (1993), conforme tabela 4.

Tabela 4 - Premissas do método GRADEX quanto aos dados necessários

Dado	Valor recomendado	Fonte	Observação
Área de drenagem	0 a 5000 km ²	Guillot (1972) e Guillot et al. (1973) apud Zuffo (1993)	Guillot e Duband (1967) não limitaram a área, mas sugeriram que bacias superiores à 10.000 km ² fossem subdivididas
Tempo de concentração	1 hora a 4 dias	Guillot (1972) e Guillot et al. (1973) apud Zuffo (1993)	-
Unidade de tempo dos dados	Horário (pluviógrafos) para bacias com área de drenagem da ordem de 100 km ² ou inferior	Guillot e Duband (1967)	-
	Diário para as demais bacias		
Número de pluviógrafos/pluviômetros	Um para bacias com área de drenagem da ordem de 100 km ² ou inferior	Versiani e Coelho (1991)	Avaliar a necessidade de aplicação do coeficiente de abatimento da chuva pontual
	Três a cada 1000 km ²		Calcular a precipitação média na bacia
Extensão da série de vazões	No mínimo 10 anos	CTGREF (1972)	-
Extensão da série de precipitações	Superior à série de vazões	Guillot e Duband (1967)	-
	No mínimo 30 anos	Fernandes (1990)	Recomendação comum em estudos estatísticos

Fonte: Zuffo (1993)

2.4.1.1. Descrição do Método

A aplicação do método GRADEX é feita em 9 etapas segundo Zuffo (1993), conforme descrito por Campus (2018):

- **Etapa 1:** Determinar o tempo fixo “t” igual ao tempo base de duração do escoamento (t_{base}), de forma que o escoamento de base seja descartado, ou adotar a sugestão de Zuffo e Leme (2005), em que o tempo de base pode ser um valor entre uma e duas vezes o tempo de concentração da bacia (t_c), ou seja $t_c \leq t_{base} \leq 2 * t_c$. Além disso, caso a permeabilidade da bacia seja

maior do que a desejada para o método, que gera valores consideráveis para as vazões, pode ser adotado um valor intermediário igual a $t_{base} = 1,5 \cdot t_c$. No presente estudo, adotou-se $t_{base} = t_c$.

- **Etapa 2:** Calcular a precipitação diária máxima média e gerar a reta de distribuição de frequência a partir da aplicação do papel probabilístico de Gumbel.
- **Etapa 3:** Calcular as vazões médias de duração “ t_{base} ”, tomando como base as vazões máximas anuais da bacia em estudo.
- **Etapa 4:** Transformação das séries de vazões médias em lâmina d’água escoada superficialmente “ h ” para analisar esses resultados com as precipitações que também se encontram na mesma unidade.

Essa transformação é realizada pela razão entre o volume escoado em metros cúbicos, representado pela área abaixo de cada um dos hidrogramas gerados com duração “ t_{base} ”, pela área da bacia “ A ” em quilômetros quadrados e multiplicado pelo fator de conversão de unidades igual 3,6 para que o resultado obtido esteja na unidade milímetros, conforme a equação (1).

$$h = \frac{\int_{-\frac{t_{base}}{2}}^{\frac{t_{base}}{2}} Q dt}{A} \times 3,6 \quad (1)$$

Onde h é a altura de lâmina d’água escoada superficialmente, em mm, t_{base} é o tempo de base do hidrograma, em h, Q é a vazão, em m^3/s , e A é a área superficial da bacia analisada, em km^2 .

- **Etapa 5:** Os valores obtidos de alturas de lâmina d’água escoadas “ h ” devem ser plotados juntamente com as precipitações diárias médias anuais no papel probabilístico de Gumbel, onde as alturas escoadas serão plotadas em seus respectivos períodos de retorno (TR) calculados a partir das equações de Gumbel, representada pelas equações (2), (3) e (4).

$$TR \approx \frac{1}{P} = \frac{1}{F} \quad (2)$$

$$F = \frac{m}{n + 1} \quad (3)$$

$$y = -\ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{TR} \right) \right) \quad (4)$$

Onde P é a probabilidade de o valor em questão ser igualado ou superado, é a frequência de um evento, m é o número da ordem de um evento, n é o número de anos de observação da série analisada e y é a variável reduzida.

- **Etapa 6:** A partir do valor de “h” para um período de retorno de 10 anos, é traçada uma reta relacionando a altura escoada com a variável reduzida “y” utilizando o mesmo coeficiente angular da semirreta gerada pela distribuição dos valores de precipitação. Partindo da variável y relacionada com o tempo de retorno TR, obtém-se a distribuição de frequências para as alturas médias escoadas na duração “t_{base}”.
- **Etapa 7:** Converter as alturas escoadas “h_{TR}” para os tempos de retorno desejados (TR ≥ 10 anos), definidas pela distribuição de frequências geradas pela extrapolação realizada pelo Método GRADEX, de lâmina para vazão. Dessa forma, os valores “h_{TR}” são multiplicados pela área da bacia “A” e dividindo pelo período de tempo “t_{base}”, conforme a equação (5).

$$\overline{Q}_{TR} = \frac{h_{TR} \times A}{t_{base}} \quad (5)$$

- **Etapa 8:** Calcular o fator de pico “R” determinado média da razão entre a vazão instantânea máxima anual com a vazão média máxima anual de duração “t_{base}”, com representado pela equação 6.

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Q_{pico_i}}{Q_{med_i}} \quad (6)$$

Onde R é fator de pico, n é número de eventos relacionados, Q_{pico} é a vazão instantânea máxima anual e Q_{med} é a vazão média máxima anual de duração “t_{base}”.

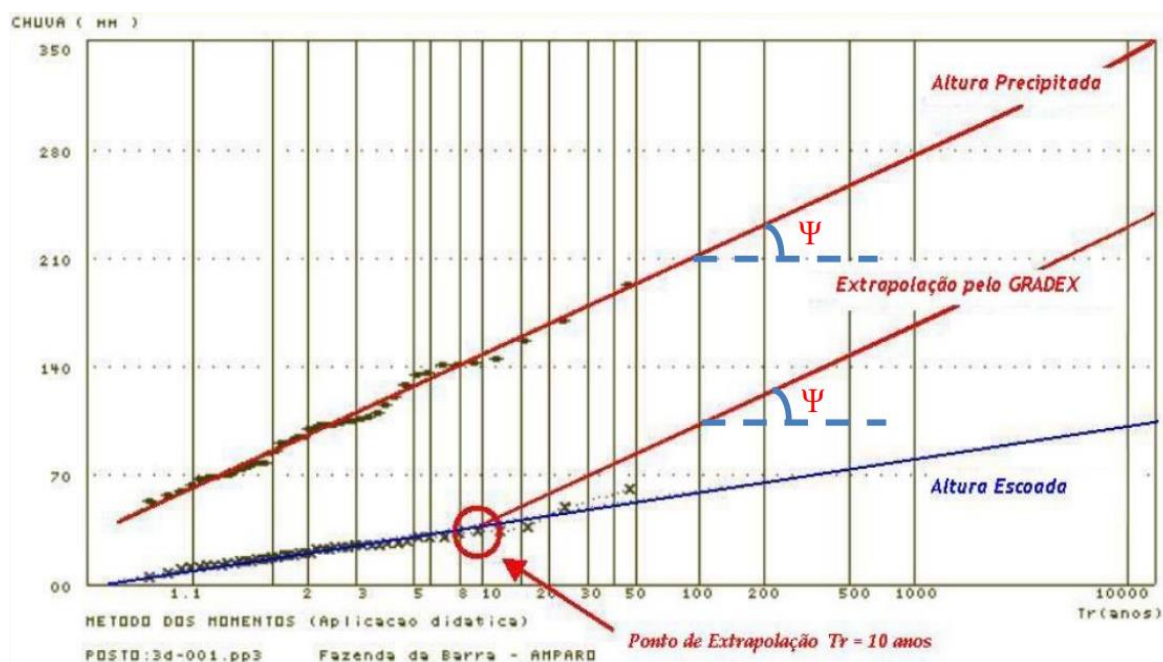
- **Etapa 9:** Determinar a vazão de pico para qualquer período de retorno TR desejado a partir do produto entre a vazão média, calculada pela equação (5), pelo fator de pico, calculado pela equação (6), conforme apresentado pela equação (7).

$$Q_{TR} = \overline{Q}_{TR} \times R \quad (7)$$

De forma resumida, o método consiste em determinar uma equação linear para a série de vazões, em mm, que possua o mesmo coeficiente angular da reta de

distribuição de Gumbel e tendo seu início no tempo de retorno igual a 10 anos, de acordo com a figura 6 (CAMPOS, 2018).

Figura 5 - Extrapolação da função de distribuição de extremos do volume escoado, a partir de TR = 10 anos, paralela à função de distribuição de extremos do volume precipitado



Fonte: Zuffo (1993)

2.4.1.2. Distribuição de Probabilidades

O ponto crucial na aplicação do método GRADEX é a distribuição de probabilidades. De acordo com Campos (2018), a função utilizada na análise da frequência das cheias não é fácil de ser determinada. O método sugere a aplicação da distribuição de Gumbel aplicado aos valores de precipitações máximas (MOTA, 2016). Contudo, Naghettini (1994) cita a distribuição Gamma, Normal e Log-Normal como outros modelos que podem ser utilizados.

Pesquisas realizadas na região Sul e Sudeste do Brasil sugere que a distribuição de Gumbel se ajusta bem os dados de precipitações e vazões (FERNANDES, 1990). De acordo com Zuffo (1993), se comparada as vazões obtidas pelo de Gumbel e Log-Normal, os resultados obtidos apresentam valores aproximados para período de recorrência de 100 anos. Além disso, o autor afirma que as

distribuições de Gumbel e Exponenciais são assíntotas e por esse motivo seu uso é justificado no método GRADEX.

De acordo com Zuffo (1993), Gumbel utilizou a distribuição cumulativa da distribuição de Extremos Tipo I em 1956, onde ele assumiu “x” como uma variável aleatória contínua, “α” e “β” como seus parâmetros e “F(x)” uma função de probabilidade total, escrita como:

$$F(\alpha, \beta, x) = \Phi(y) \quad (8)$$

Em que:

$$y = \alpha(x - \beta) \quad (9)$$

Sendo y a variável reduzida, α um parâmetro de concentração, β a medida da tendência central e Φ(y) não contém mais parâmetros.

Gumbel (1956), construiu um papel probabilístico na qual “x” é a ordenada e “y” a abscissa, em escala linear. Nele uma escala “Φ(y)” foi traçada paralela à “y”, no qual obteve os valores apresentados a seguir em função das probabilidades “Φ”:

$$x = \beta + \frac{y}{\alpha} \quad (10)$$

A variável reduzida “y” pode ser linearizada pela redução logarítma dupla, ficando expressa por:

$$y = -\ln(-\ln(1 - \frac{1}{TR})) \quad (11)$$

Substituindo a equação (11) na (10),

$$x = \beta - \frac{\ln}{\alpha}(-\ln(1 - \frac{1}{TR})) \quad (12)$$

A equação (12) representa uma equação linear onde 1/ α é o coeficiente angular e é chamado de GRADEX ou gradiente de extremos. Os parâmetros α e β podem ser determinados a partir da média (μ) e do desvio padrão (σ) das séries históricos onde:

$$\alpha = \frac{1,2825}{\sigma} \quad (13)$$

$$\beta = \mu - 0,45 \times \sigma \quad (14)$$

Como o GRADEX é diretamente proporcional ao desvio padrão da amostra utilizada, a equação da probabilidade será:

$$p(x) = 1 - e^{-e^{-\frac{x-\beta}{a}}} \quad (15)$$

2.4.2. Dados Necessários

2.4.2.1. Equação de Chuvas Intensas

Um dos dados mais importantes estudados pela Hidrologia é a precipitação, visto que representa um fator importante no escoamento superficial direto, na infiltração, na evapotranspiração entre outros (SILVA, 2009). Por sua vez, as principais características a serem analisadas são intensidade, duração, frequência e altura pluviométrica (SOUZA, 2014).

Para Tucci, Porto e Barros (1995), as chuvas intensas ou extremas são aquelas na qual sua intensidade ultrapassa a mínima da região. Os dados são obtidos através de aparelhos de medição como pluviômetros e pluviógrafos. O primeiro equipamento consegue obter somente volumes com duração de 1 dia, já o outro registra chuvas de menores durações de maneira contínua.

A intensidade, duração e frequência das chuvas intensas associadas a um período de retorno formam as curvas IDF ou equação de chuva, que são utilizadas no processo de estimativa de vazões de projeto para obras de drenagem a partir da utilização de modelos chuva-vazão.

Na determinação da equação da chuva em regiões onde são escassos os dados de pluviógrafos, é necessário desagregar a chuva de 1 dia obtida por pluviômetros em uma chuva de 24 h e a partir dela determinar outras lâminas equivalentes às pequenas durações. A CETESB (1986) determinou que a relação entre a chuva de 24h e 1 dia é o coeficiente 1,14 para locais onde só existem dados de postos pluviométricos. Os demais coeficientes para diferentes durações podem ser obtidos através da equação (16) recomendada por Silveira (2000).

$$C_{24}(d) = e^{1,5 \times \ln\left(\frac{\ln(d)}{7,3}\right)} \quad (16)$$

Onde $C_{24}(d)$ é o coeficiente de desagregação referente a duração escolhida e d é a duração escolhida, em minutos.

Com os valores desagregados a equação da chuva é definida a partir da determinação dos parâmetros da equação (17) (TUCCI; PORTO; BARROS, 1995). Contudo, se o procedimento for realizado no Microsoft Excel, é necessário aplicar

logaritmo duas vezes e representá-los graficamente para definir os parâmetros, como representado na equação (18) e (19), através da utilização das linhas de tendência.

$$i = \frac{C}{(t + t_0)} = \frac{k \times T^m}{(t + t_0)^n} \quad (17)$$

$$\log(i) = \log(C) - n \times \log(t + t_0) \quad (18)$$

$$\log(C) = \log(k) - m \times \log(T) \quad (19)$$

Onde k , m e n e t_0 são parâmetros que variam com o local de estudo, T é o período de retorno e t é a duração da chuva para qual deseja-se saber a intensidade da precipitação. O valor de t_0 é obtido na tentativa e erro até o valor de R^2 da linha de tendência do Excel estiver próximo de 1.

2.4.2.2. Geoprocessamento e a Caracterização Geomorfológica de Bacia Hidrográfica

A bacia hidrográfica pode ser considerada como um curso de água sujeito à entrada de água através da precipitação e saída através do escoamento superficial e evapotranspiração (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). A obtenção de características da bacia é imprescindível na modelagem hidráulica, como em modelos chuva-vazão.

Sua delimitação é feita através da topografia, onde os divisores de água são responsáveis pela divisão da área. Esse processo pode ser feito manualmente, através de plantas ou cartas topográficas, ou automática, com o uso de um sistema de informação geográfica (SIG).

SIG é um sistema onde dados espaciais e procedimentos computacionais estão juntos para permitir a análise e separação de informações e criar representações sobre o tema estudado. Dentre os modelos de SIG existentes, os mais utilizados na caracterização de uma bacia são os modelos raster e vetorial (GOÉS, 2009).

Dentre os tipos de modelo raster ou matricial existentes, o mais utilizado na hidrologia é o modelo digital de elevação, onde consistem em imagens de satélite que permite a extração de informações sobre topografia, solo e drenagem. As ferramentas de geoprocessamento permitem que um raster seja convertido para um vetor que torna ainda mais fácil a manipulação dos dados. Ambos os modelos podem ser

obtidos em portais de órgãos que trabalham com ferramentas SIG, como a Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA), Agência Executiva de Gestão das Águas (AESAs), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Geoportal do Exército entre outros.

O software gratuito de geoprocessamento chamado QGIS possui ferramentas, como o SAGA e GRASS, capazes de extrair a rede de drenagem e sub-bacias através da análise de MDE, com o algoritmo *r.watershed*, ou delimitar uma bacia hidrográfica a partir da definição de um exutório, com o algoritmo *r.water.outlet*. Um software que está integrado ao Qgis é o Google Earth Pro que também permite a análise e extração de informações da área de interesse.

Além dos softwares, existem sites que permitem obter informações sem precisar passar por um processamento. O SIG AESA permite verificar as bacias, subbacias, rios entre outras informações do estado da Paraíba. O BDIA, que é o banco de dados de informações ambientais do IBGE, permite analisar e exportar diversas informações sobre solo, topografia, vegetação entre outros dados de qualquer lugar do Brasil.

Existe uma diversidade de tecnologias SIG capazes de realizar inúmeros processos de forma rápida e eficiente, o que torna um grande aliado dos profissionais de diferentes áreas. Portanto, cabe ao usuário decidir qual ferramenta é mais adequada às suas atividades e possibilita alcançar melhores resultados para sua pesquisa.

2.4.2.3. Tempo de Concentração

O tempo de concentração é uma das características da bacia hidrográfica de grande importância para a modelagem hidrológica. Para Silva (2021), o tempo de concentração pode ser definido como o tempo que uma porção de água leva para sair do ponto mais extremo da bacia até o seu exutório. Na literatura, existem inúmeras formas de determinação para essa grandeza, todavia é preciso analisar qual a melhor metodologia que se encaixa na bacia estudada.

Silveira (2005) analisou 23 das mais utilizadas equações de tempo de concentração, conforme quadro 1, com o objetivo de avaliar o erro a ser obtido quando aplicada em bacias urbanas e rurais. Algumas formulas mostraram abranger áreas

maiores que os requisitos impostos. Para as bacias urbanas, só quatro equações foram recomendadas para uso, pois apresentaram erros entre 30 e 49%.

Quadro 1 - Fórmulas de tempo de concentração avaliadas por Silveira (2005)

Nome	Equação (1)
Izzard (2)	$T_c = 85,5 (i/36286+C_i)^{-0,667} L^{0,33} S^{-0,333}$
Kerby-Hathaway (3)	$T_c = 0,619 N^{0,47} L^{0,47} S^{-0,235}$
Onda Cinem. (2)	$T_c = 7,35 n^{0,6} i^{-0,4} L^{0,6} S^{-0,3}$
FAA (2)	$T_c = 0,37 (1,1-C) L^{0,5} S^{-0,333}$
Kirpich (2)	$T_c = 0,0663 L^{0,77} S^{-0,385}$
SCS Lag (2)	$T_c = 0,057 (1000/CN-9)^{0,7} L^{0,8} S^{-0,5}$
Simas-Hawkins (4)	$T_c = 0,322 A^{0,594} L^{-0,594} S^{-0,150} S_{scs}^{0,313}$
Vente Chow (5)	$T_c = 0,160 L^{0,64} S^{-0,32}$
Dooge (6)	$T_c = 0,365 A^{0,41} S^{-0,17}$
Johnstone (7)	$T_c = 0,462 L^{0,5} S^{-0,25}$
Corps Engineers (8)	$T_c = 0,191 L^{0,76} S^{-0,19}$
Giandotti (9)	$T_c = 0,0559 (4,0 A^{0,5} + 1,5 L) L^{-0,5} S^{-0,5}$
Pasini (10)	$T_c = 0,107 A^{0,333} L^{0,333} S^{-0,5}$
Ventura (10)	$T_c = 0,127 A^{0,5} S^{-0,5}$
Picking (11)	$T_c = 0,0883 L^{0,667} S^{-0,333}$
DNOS (12)	$T_c = 0,419 k^{-1} A^{0,3} L^{0,2} S^{-0,4}$
George Ribeiro (13)	$T_c = 0,222 (1,05 - 0,2p)^{-1} L S^{-0,04}$
Schaake et al (14)	$T_c = 0,0828 L^{0,24} S^{-0,16} A_{imp}^{-0,26}$
McCuen et al (15)	$T_c = 2,25 i^{-0,7164} L^{0,5552} S^{-0,2070}$
Carter (15)	$T_c = 0,0977 L^{0,6} S^{-0,3}$
Eagleson (15)	$T_c = 0,274 n R^{0,67} L S^{-0,5}$
Desbordes (16)	$T_c = 0,0869 A^{0,3039} S^{-0,3832} A_{imp}^{-0,4523}$
Espey-Winslow (15)	$T_c = 0,343 \phi L^{0,29} S^{-0,145} A_{imp}^{-0,6}$

Fonte: Silveira (2005)

Para bacia rural foram recomendadas, em ordem de prioridade, a equação do Corps Engineers, Vente Chow, Onda cinemática e Kirpich; e para bacia urbana a de Carter, Schaake, Kirpich e Desbordes, conforme quadro 2.

Quadro 2 - Equações de tempo de concentração recomendadas para bacias urbanas e rurais

Fórmulas	Ordem	Bacias rurais			Bacias urbanas		
		Áreas (km ²)	EM% %	EP %	Áreas (ha)	EM %	EP %
Corps E.	1R	<12000	9	21			
V. Chow	2R	<12000	-7	19			
Onda Cin.	3R	<12000	2	20			
Kirpich	4R, 3U	<12000	-9	19	<2700	1	39
Carter	1U				<1100	1	40
Schaake	2U				<62	-9	30
Desbordes	4U				<5100	11	49

Fonte: Silveira (2005)

Queiroz e Alves (2020) analisou 9 formulas de tempo de concentração, de acordo com o quadro 3, aplicadas em uma bacia urbana com área de 66 km². O parâmetro utilizado para verificar a eficiência foi a velocidade média de escoamento, onde a velocidade real foi comparada com a obtida por cada equação. O método cinemático foi o que apresentou o melhor resultado seguido por Carter, Giandotti, Picking.

Quadro 3 - Equações para tempo de concentração

Tempo de Concentração	Fórmula	Fonte
Método Cinemático	(1) $T_c = \frac{1000}{60} \sum \frac{L}{v_m}$	Porto <i>et al.</i> (2001)
Carter	(2) $T_c = 0,0977L^{0,6}S^{-0,3}$	Silveira (2005)
Picking	(3) $T_c = 5,3 \left(\frac{L^2}{S}\right)^{\frac{1}{8}}$	Pinto <i>et al.</i> (1976)
Giandotti	(4) $T_c = \frac{4\sqrt{A_d} + 1,5L}{0,8\sqrt{H}}$	Brasil (2005)
Kirpich	(5) $T_c = 0,95 \left(\frac{L^2}{H}\right)^{0,385}$	Brasil (2005)
Kirpich_DER	(6) $T_c = 1,42 \left(\frac{L^2}{H}\right)^{0,385}$	Brasil (2005)
David	(7) $T_c = \frac{0,000324 \cdot L^{1,45}}{H^{0,28}}$	David (1976)
US corps Engineers	(8) $T_c = 0,191L^{0,76}S^{-0,19}$	Silveira (2005) Linsley <i>et al.</i> (1967)
Johnstone	(9) $T_c = 0,462L^{0,5}S^{-0,25}$	Silveira (2005)

Fonte: Queiroz; Alves (2020)

Percebe-se que caso a bacia estudada possua características semelhantes à de Queiroz e Alves, os resultados encontrados por eles podem ser aplicados. Contudo, caso não seja possível, a recomendação de Silveira (2005) é aceitável.

2.4.2.4. Distribuição Temporal

A chuva de projeto é o principal dado de entrada no modelo chuva-vazão e trata da distribuição da chuva ao longo do tempo sendo representada graficamente por meio de hietogramas (ABREU; SOBRINHA; BRANDÃO, 2017). Geralmente, não existe o conhecimento de como a precipitação se distribui na região, portanto são

adotados métodos empíricos para simular sua variação no tempo (TUCCI, 1995). Além disso, o autor cita que a distribuição adotada irá influenciar na forma do hidrograma e no volume de água a ser infiltrada.

Segundo Jatón (1984), os modelos de distribuição temporal podem ser divididos em métodos baseados em curvas IDF, métodos derivados de precipitações acumuladas, métodos baseados na estrutura interna das tormentas e métodos baseados em tormentas históricas.

O método trabalhado nessa pesquisa é derivado das curvas IDF e denominado "Método dos Blocos Alternados", foi apresentado por Zahed e Marcellini (1995). Os dados iniciais para esse modelo são o tempo de retorno, tempo de duração da chuva e o de discretização, onde aplica-se a relação IDF, transforma-se a intensidade para lâmina de água e acumula-se os valores. Em seguida calcula-se o incremento, onde os resultados são distribuídos de forma que o maior valor fica no centro do hidrograma e os demais são distribuídos, de maneira decrescente, à direita e à esquerda do centro.

Benfica (1999) em sua pesquisa comparou as chuvas de projetos gerados por 4 métodos, sendo dois deles baseados em relações intensidade-duração-frequência. O método dos blocos alternados apresentou as maiores intensidades e os maiores picos de vazão pelo fato dele levar em conta apenas o efeito crítico do escoamento. Contudo, as diferenças entre as vazões máximas e mínimas dos hidrogramas gerados variou entre 0,2 e 1,7% em um posto e de 0,3 a 2,5% no outro.

Abreu, Sobrinha e Brandão (2017) aplicaram o método dos blocos alternados e o de Huff para os períodos de retorno de 25, 50 e 100 anos. Os hidrogramas de cheias gerados apresentaram profundas diferenças, onde constatou-se aumentos entre 32 e 46% na vazão máxima para o método dos blocos alternados em comparação ao método de Huff do 1º quartil, demonstrando que a análise da distribuição temporal da tormenta de projeto é fundamental para a obtenção de resultados confiáveis.

Portanto, embora o método dos blocos alternados possua desvantagens, sua facilidade torna possível a aplicação em qualquer bacia onde só possui a equação da chuva como entrada, o que permite ser um modelo frequentemente utilizado (BENFICA, 1999).

2.4.2.5. Precipitação Efetiva

A precipitação efetiva ou excedente é definida como parte da precipitação total que escoar na superfície do solo (SMDU,2012). Portanto, antes de gerar os hidrogramas de projeto é preciso tirar a parte da chuva que consegue infiltrar no solo, visto que o objetivo principal da drenagem urbana é evitar as enchentes causadas pela parte excedente da chuva que ficou na superfície, cujo volume pode aumentar em 200 a 300% quando existe alto grau de urbanização, cita o autor.

Entre os métodos existente para determinação da precipitação efetiva, o mais utilizado é o desenvolvido pelo SCS – Soil Conservation Service (atual NRCS – Natural Resources Conservation Service), onde o principal parâmetro que separa o escoamento superficial é a curva número (CN). Esse fator consiste em um valor tabelado variando entre 0 e 100, onde 0 é um solo com infiltração infinita e 100 se refere a um solo impermeável (CUNHA et al, 2015).

A equação proposta pelo método para encontrar a chuva excedente é a seguinte:

$$H_{EXC} = \frac{(P - 0,2S)^m}{P + 0,8S}, P < 0,2S \quad (20)$$

Onde P é a precipitação total e S a retenção potencial do solo, ambos em mm.

A parcela 0,2S representa a perda inicial devido á interceptação e retenção em depressões e pode ser calculado pela equação 21.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (21)$$

Para determinar o CN da bacia é preciso identificar inicialmente a condição de umidade do solo, conforme tabela 5, para saber se o valor adotado precisa ser corrigido através dos valores apresentados na tabela 9. Caso exista a falta de informações relacionada a umidade, adota-se a condição II (USDA-NRCS, 2004).

Tabela 5 - Condições de umidade

Condição	Descrição
I	Solos secos: as chuvas nos últimos 5 dias não ultrapassam 15 mm.
II	Situação média: as chuvas nos últimos 5 dias totalizam entre 15 e 53 mm.
III	Solo úmido: as chuvas nos últimos 5 dias foram superiores a 53 mm.

Fonte: Tucci (2005)

As definições sobre os tipos de solos para uso do método SCS são variadas, contudo, a tabela 6 apresenta as definições realizadas por Mockus (1972) baseadas nos solos dos Estados Unidos.

Tabela 6 - Agrupamento hidrológico dos solos

Classes de Solos	
SOLO A	Solos com alta capacidade de infiltração, arenosos, profundos e de drenagem boa a excessiva. Apresentado pouco silte e argila e alta taxa de transmissão de água. Possuem capacidade de infiltração (fc) de 7,6 – 11,4 mm/hora.
SOLO B	Solos arenosos menos profundos que os da classe A, com capacidade de infiltração moderada, consistindo de solos com profundidade moderada a alta, drenagem moderada a alta, textura moderadamente fina a moderadamente grosseira. Capacidade de infiltração (fc) de 3,8 – 7,6 mm/hora.
SOLO C	Solos com baixa capacidade de infiltração devido a presença de camadas impermeáveis em sub superfície ou pela presença de textura moderadamente fina a fina, com boa percentagem de argila. Tem capacidade de infiltração (fc) de 1,3 – 3,8 mm/hora.
SOLO D	Solos com capacidade de infiltração muito baixa, consistindo de solos argilosos, ou solos com lençol freático permanentemente superficial ou com camada de impedimento superficial ou solos rasos assentados sobre estrato impermeável. Capacidade de infiltração (fc) de 0 – 1,3. Solos contendo argila expansiva e pouco profundos.

Fonte: Mockus (1972)

Sartori (2004) comparou as definições feitas por Mockus (1972) com a classificação dos solos brasileiros já existente, aplicando o método SCS em 20 eventos na Microbacia Hidrográfica do Ribeirão dos Marins, Piracicaba/SP. Os resultados obtidos quando comparados com as definições brasileiras foram condizentes com a realidade da bacia, mas para a definição americana foram subestimados em cerca de 90% dos eventos. Portanto, o autor elaborou uma classificação do solo baseado nos grandes grupos hidrológicos presentes no Estado de São Paulo, conforme apresentado na tabela 7.

Cunha et al (2015) cita que pelo fato do método SCS ter sido desenvolvido para bacias com características específicas, a precipitação efetiva gerada leva a estimativas de vazões consideradas superestimadas. Contudo, a classificação realizada por Sartori (2004) representa uma calibração do método, visto que engloba uma grande porcentagem dos tipos de solos brasileiros. Dessa forma, a utilização das tabelas desenvolvidas pelo autor pode conduzir a estimativas de vazões mais realistas.

Tabela 7 - Grupos hidrológicos de solos

Grupo Hidrológico	Classes Gerais de Solos
A	LATOSSOLO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macroporosidade; LATOSSOLO AMARELO E LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso;
B	LATOSSOLO AMARELO e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa; LATOSSOLO BRUNO; NITOSSOLO VERMELHO; NEOSSOLO QUARTZARÊNICO; ARGISSOLO VERMELHO ou VERMELHO AMARELO de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta.
C	ARGISSOLOS pouco profundos, mas não apresentando mudança textural abrupta ou ARGISSOLO VERMELHO, ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos profundos e apresentando mudança textural abrupta; CAMBISSOLO de textura média e CAMBISSOLO HÁPLICO ou HÚMICO, mas com características físicas semelhantes aos LATOSSOLOS (latossólico); ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO; NEOSSOLO FLÚVICO.
D	NEOSSOLO LITÓLICO; ORGANOSSOLO; GLEISSOLO; CHERNOSSOLO; PLANOSSOLO; VERTISSOLO; ALISSOLO; LUVISSOLO; PLINTOSSOLO; SOLOS DE MANGUE; AFLORAMENTOS DE ROCHA; Demais CAMBISSOLOS que não se enquadram no Grupo C; ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta.

Fonte: Sartori (2004)

Existem tabelas de valores de CN para bacias urbanas e rurais e, semelhante as tabelas sobre as classes de solos, essas também possuem suas variações dependendo do autor. A tabela 8 representa a tradução da americana para bacias urbanas e suburbanas realizada por Tucci et al (1993).

Tomaz (2002) recomenda que o método da curva número deve ser utilizado com precaução, pois a equação não possui o parâmetro tempo e não leva em conta a duração e intensidade da chuva. Além disso, quando a bacia possui diferentes tipos de uso e ocupação, é recomendado calcular o CN médio obtido pela média ponderada (PORTO, 1995).

Tabela 8 - Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas – Condição II

Utilização ou cobertura do solo	Grupo de solos			
	A	B	C	D
Zonas cultivadas: sem conservação do solo	72	81	88	91
Zonas cultivadas: com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições	68	79	86	89
Terrenos baldios em boas condições	39	61	74	80
Prado em boas condições	30	58	71	78
Bosques ou zonas com cobertura ruim	45	66	77	83
Florestas: cobertura boa	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, cemitérios, boas condições				
Com relva em mais de 75%	39	61	74	80
Com relva de 50% a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios	89	92	94	95
Zonas industriais	81	88	91	93
Zonas residenciais				
Lotes de (m ²)	% média impermeável			
<500	65	77	85	90
1000	38	61	75	83
1300	30	57	72	81
2000	25	54	70	80
4000	20	51	68	79
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc.	98	98	98	98
Arruamentos e estradas				
Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais	98	98	98	98
Paralelepípedos	76	85	89	91
Terra	72	82	87	89

Fonte: Tucci (1993)

A correção do parâmetro CN pode ser realizado de acordo com as equações desenvolvidas por Hawkins et al (1985):

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2,281 - 0,01281 \times CN_{II}} \quad (22)$$

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0,427 - 0,00573 \times CN_{II}} \quad (23)$$

Onde CN_I é correção para a condição I e CN_{III} é a correção para a condição III.

Tabela 9 - Correção dos valores de CN de acordo com a umidade antecedente do solo

Condição II	Condição I	Condição III
100	100	100
95	87	98
90	78	96
85	70	94
80	63	91
75	57	88
70	51	85
65	45	82
60	40	78
55	35	74
50	31	70
45	26	65
40	22	60
35	18	55
30	15	50
25	12	43
20	9	37
15	6	30
10	4	2
5	2	13

Fonte: Tucci (2005)

Determinado o CN, o procedimento de aplicação consiste em acumular a precipitação total de projeto, aplicar a equação 18 e desacumular os valores. Os resultados são representados por meio de hietogramas.

2.4.2.6. Geração de Hidrogramas pelo Método Santa Bárbara

O método Santa Bárbara foi desenvolvido por James M. Stubchaer em 1975, de acordo com Akan (1993), e foi apresentado no mesmo ano em um seminário na Universidade de Kentucky (WANIELISTA, 1997). Consiste na representação gráfica da variação da vazão em função do tempo de determinada seção de controle.

O método admite que toda a água que cai sobre a área impermeável gera escoamento superficial e que o hidrograma é obtido a partir de um reservatório imaginário onde o tempo de espera é igual ao tempo de concentração da bacia.

O procedimento do método foi desenvolvido pelo autor para ser realizado no Microsoft Excel, onde cada coluna da planilha representa uma parte do cálculo. A seguir será descrito o passo a passo feito por Tomaz (2002) de forma resumida:

- **Coluna 1:** Representa a contagem do tempo, em min, discretizada da mesma maneira que foi determinada a chuva de projeto.
- **Coluna 2:** Representa a transformação do tempo em horas.
- **Coluna 3:** Precipitação Total obtida através de métodos de distribuição temporal.
- **Coluna 4:** Chuva efetiva calculada a partir do método da curva CN do SCS.
- **Coluna 5:** Parcela relativa à infiltração do solo obtida pela diferença entre a coluna 3 e 4.
- **Coluna 6:** Representa a velocidade de escoamento da região impermeabilizada, em mm/h, obtida pelo quociente entre a coluna 3 e o intervalo de tempo.
- **Coluna 7:** Representa a velocidade de escoamento da região permeável, em mm/h, obtida pelo quociente entre a coluna 4 e o intervalo de tempo.
- **Coluna 8:** Representa as coordenadas do hidrograma calculada pela equação a seguir:

$$I = [i \times d + i_e \times (1 - d)] \times A \quad (24)$$

Onde I é a ordenada da hidrograma, em m^3/s , i é a velocidade de escoamento na área impermeabilizada, em m/s , i_e é a velocidade de escoamento na área permeável, em m/s , d é a fração da área impermeável em relação a área total (adimensional) e A é a área total da bacia, em m^2 .

- **Coluna 9:** Soma acumulada de 2 linhas da coluna 8.
- **Coluna 10:** Repetição dos valores da coluna 11.
- **Coluna 11:** Cálculo da vazão através da equação (25) e (26):

$$Q_j = Q_{j-1} + K_r \times (I_{j-1} + I_j - 2 \times Q_{j-1}) \quad (25)$$

$$K_r = \frac{\Delta t}{2 \times t_c + \Delta t} \quad (26)$$

Onde Q_j é a vazão de saída, em m^3/s , Q_{j-1} é a vazão de saída anterior, em m^3/s , K_r é o coeficiente de retardo (adimensional), $I_{j-1} + I_j$ é o valor obtido na coluna 11, em m^3/s , t_c o tempo de concentração em segundos e Δt é o intervalo de tempo em segundos;

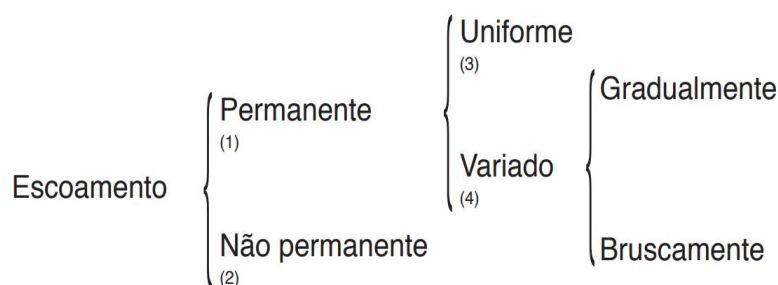
A quantidade de colunas apresentadas por Tomaz (2002) é maior do que o resumo descrito, pois ele incluiu todo o processo de cálculo da chuva efetiva, já no resumo é levado em conta que esses dados já foram obtidos.

2.5. Dimensionamento de Canais

Canais ou condutos livres são aqueles em que a pressão que age sobre o líquido é a pressão atmosférica, possui seção aberta ou fechada e o escoamento é feito por gravidade podendo ser permanente ou não permanente com regime uniforme, não uniforme ou variado (PORTO, 2006).

O escoamento permanente é aquele na qual a velocidade é constante, dessa forma os parâmetros do canal também se mantem constante. Por outro lado, o escoamento não é permanente quando a velocidade varia ao longo do canal, contudo, os parâmetros variam conforme sua localização na seção. Em relação ao regime, pode ser uniforme quando as velocidades estão paralelas e constantes, não uniforme quando apresentam uma inclinação na linha d'água e variado quando o escoamento apresenta variações lentas e graduais ou variações bruscas. As definições dos tipos de escoamentos em canais, segundo Neto e Fernández (2018), estão resumidas na figura 6.

Figura 6 - Tipos de escoamentos em condutos livres

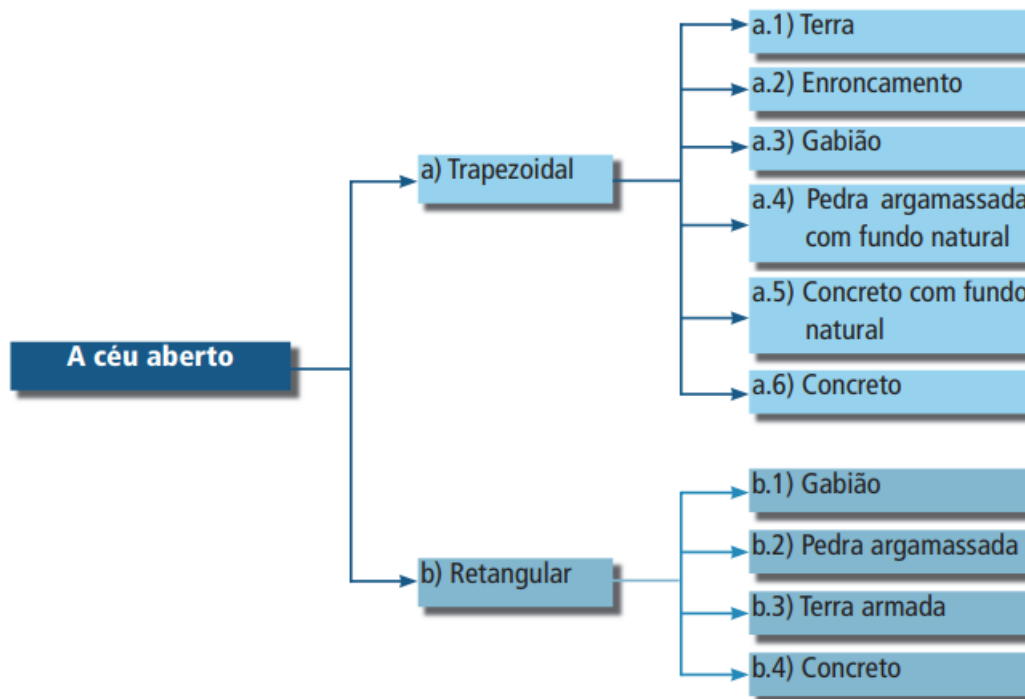


- (1) Escoamento permanente [numa determinada seção transversal, a vazão e a velocidade permanece(m) constante(s) ao longo do tempo].
- (2) Escoamento não permanente [numa determinada seção transversal, a vazão e a velocidade varia(m) ao longo do tempo].
- (3) Escoamento permanente uniforme [trecho uniforme, profundidade e velocidade constante].
- (4) Escoamento permanente variado [acelerado ou retardado].

Fonte: Neto; Fernández (2018)

As formas de seções mais utilizadas são a circular, trapezoidal e retangular, cujo revestimento varia para cada situação de projeto. A figura 7 apresenta os revestimentos mais comuns em canais segundo o DAEE (2005).

Figura 7 - Canalização a céu aberto. Tipos de revestimentos mais comuns



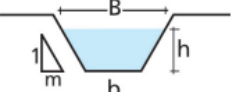
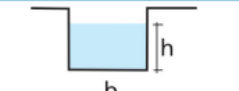
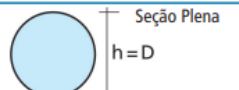
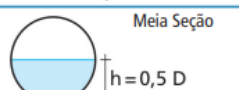
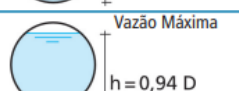
Fonte: DAEE (2005)

Segundo Porto (2006), os parâmetros necessários para descrever um canal são:

- Área molhada (A): é a área da seção do canal na qual o fluido pode escoar;
- Perímetro molhado (P): é o comprimento da parte da seção que está em contato com o líquido;
- Raio hidráulico (R_h): é o quociente da área molhada pelo perímetro molhado;
- Altura de água (y): distância vertical entre o ponto mais baixo da seção até a superfície livre;
- Altura de hidráulica (y_h): razão entre a área molhada e a largura da seção livre;
- Largura de topo (B): largura da superfície em contato com a atmosfera;
- Declividade de fundo (I_o): declividade longitudinal do canal;
- Declividade da linha d'água (I_a): declividade piezométrica;
- Declividade da linha de energia (I_f): variação da energia da corrente no sentido do escoamento.

A DAEE (2005) apresenta as equações desenvolvidas para os parâmetros das seções mais utilizadas, conforme figura 8.

Figura 8 - Elementos hidráulicos característicos de diferentes tipos de seções transversais

Geometria da Seção	Área Molhada (A_m)	Perímetro Molhado (P_m)	Raio Hidráulico (R_H)	Largura Superficial (B)
	$(b+mh)h$	$b + 2h\sqrt{1+m^2}$	$\frac{(b+mh)h}{b + 2h\sqrt{1+m^2}}$	$b+2mh$
	$b \cdot h$	$b+2h$	$\frac{b \cdot h}{b+2h}$	b
 Seção Plena $h=D$	$\frac{\pi \cdot D^2}{4}$	$\pi \cdot D$	$\frac{D}{4}$	----
 Meia Seção $h=0,5 D$	$\frac{\pi \cdot D^2}{8}$	$\frac{\pi \cdot D}{2}$	$\frac{D}{4}$	----
 Vazão Máxima $h=0,94 D$	$0,7662 \cdot D^2$	$2,6467 \cdot D$	$0,2895 \cdot D$	----

Fonte: DAEE (2005)

Dentre as diversas equações existentes no dimensionado de canais, a mais utilizada é a equação de Manning (1890), por já ter sido utilizada nos mais diferentes tipos de seções e apresentar resultados satisfatórios (MONTEIRO, 1984). A fórmula proposta está representada pela equação 27.

$$Q = \frac{1}{n} \times R_h^{2/3} \times \sqrt{i} \times A_m \quad (27)$$

Onde R_H é raio hidráulico em m, A_m é a área molhada em m^2 , P_m é o perímetro molhado (em m), n é o coeficiente de rugosidade de Manning, i é a declividade média em m/m.

Segundo Neto e Fernández (2018), em condutos livres com escoamento uniforme quando a forma da seção já está pré-definida, existirá mais de uma combinação de elementos para satisfazer a equação. Dessa forma, a equação é reorganizada, conforme equação 28, de maneira que permita o uso de fatores tabelados que permitam o dimensionamento do canal.

$$\frac{Q \times n}{i^{1/2}} = R_h^{2/3} \times A_m \quad (28)$$

Onde a parcela da esquerda representa as variáveis hidráulicas e a da direita as variáveis geométricas. A partir disso, são definidos o coeficiente dinâmico (M) e o coeficiente de forma (K), onde:

$$y_0 = \frac{M}{K} \quad (29)$$

$$M = \left(\frac{Q \times n}{i^{1/2}} \right)^{3/8} \quad (30)$$

Quando o canal for circular, no lugar de y_0 , calcula-se D, onde:

$$D = \frac{M}{K_1} \quad (31)$$

O fator de forma K é definido em função da declividade do talude (Z) ou pela razão de aspecto ($m=b/y_0$). Já o valor de K_1 é obtido por tabelas em função da lâmina d'água relativa y_0/D . Porto (2006) desenvolveu as tabelas a serem utilizadas na determinação desses coeficientes, um trecho delas estão presentes nos quadros 4 e 5.

Quadro 4 - Fator de forma K para canais retangulares, triangulares ou trapezoidais

$m = b/y_0$	Z = 0,0	Z = 0,50	Z = 1,0	Z = 1,25	Z = 1,5	Z = 1,75	Z = 2,0
0	0,000	0,530	0,771	0,859	0,935	1,001	1,061
0,2	0,300	0,640	0,850	0,929	0,998	1,058	1,113
0,4	0,453	0,735	0,921	0,993	1,056	1,112	1,163
0,6	0,572	0,818	0,986	1,052	1,110	1,163	1,211
0,8	0,672	0,893	1,046	1,107	1,162	1,211	1,256
1	0,760	0,961	1,103	1,159	1,210	1,257	1,299

Fonte: Porto (2006)

Quadro 5 - Fator de forma K1 canais circulares (PORTO, 2006).

y_0/D	$\alpha = A/D^2$	$\beta = R_h/D$	Q/Qp	y_0/D	$\alpha = A/D^2$	$\beta = R_h/D$	Q/Qp
0,01	0,001	0,007	0,000	0,51	0,403	0,253	0,517
0,02	0,004	0,013	0,001	0,52	0,413	0,256	0,534
0,03	0,007	0,020	0,002	0,53	0,423	0,259	0,551
0,04	0,011	0,026	0,003	0,54	0,433	0,262	0,568
0,05	0,015	0,033	0,005	0,55	0,443	0,265	0,586

Fonte: Porto (2006)

Para a determinação da altura y_0 é utilizado o coeficiente K2, representado:

$$K_2 = \frac{n \times Q}{\left(\frac{8}{b^3} \times i^2 \right)} \quad (32)$$

A tabela desenvolvida por Porto (2006) que apresenta valores de Y_0/b pra cada inclinação do talude está representado no quadro 6.

Quadro 6 - Cálculo da altura d'água (PORTO, 2006)

y_w/b	Z = 0,0	Z = 1,0	Z = 1,5	Z = 2,0	Z = 2,5	Z = 3,0	Z = 3,5	Z = 4,0
0,02	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002
0,04	0,004	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
0,06	0,009	0,009	0,009	0,009	0,010	0,010	0,010	0,010
0,08	0,013	0,015	0,015	0,016	0,016	0,016	0,017	0,017
0,1	0,019	0,021	0,022	0,023	0,023	0,024	0,025	0,025

Fonte: Porto (2006)

Após o canal ser dimensionado, para avaliar se o material de revestimento das paredes não sofrerá erosões, ou seja, quando a velocidade do escoamento ultrapassa a recomenda para cada tipo de material, pode utilizar a tabela apresentada por Porto (2006) retirada do curso de canais da EEUFMG, conforme tabela 10.

Tabela 10 - Velocidades médias em canais

Material das Paredes do Canal	Velocidade Média (m/s)
Areia muito fina	0,23 a 0,3
Areia solta-média	0,3 a 0,46
Areia grossa	0,46 a 0,61
Terreno arenoso comum	0,61 a 0,76
Terreno silte-argiloso	0,76 a 0,84
Terreno de aluvião	0,84 a 0,91
Terreno argiloso-compacto	0,91 a 1,14
Terreno argiloso duro	1,14 a 1,22
Solo cascalhado	1,22 a 1,52
Cascalho grosso, pedregulho, piçarra	1,52 a 1,83
Rochas sedimentares moles-xistos	1,83 a 2,44
Alvenaria	2,44 a 3,05
Rochas compactadas	3,05 a 4,00
Concreto	4,00 a 6,00

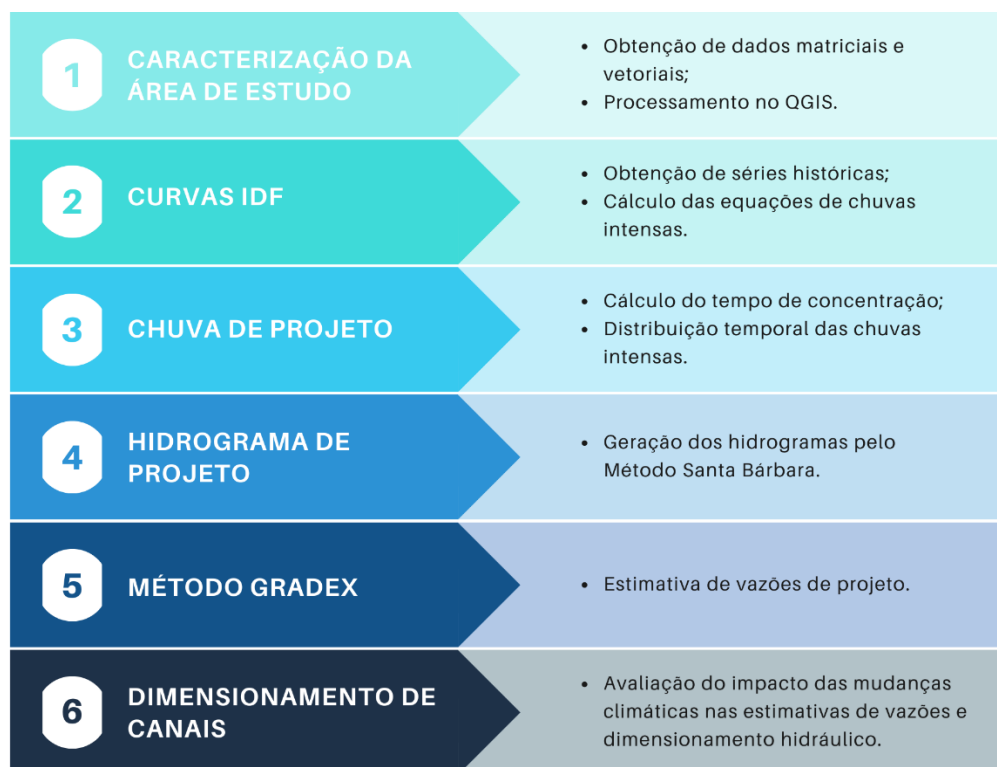
Fonte: Adaptada de Porto (2006)

A adoção de uma velocidade que esteja de acordo com o revestimento definido mantém o canal estável e definido, o que o torna mais seguro e reduz os gastos futuros com manutenção.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia para a estimativa de vazões com influência das mudanças climáticas proposta para essa pesquisa será dividida em 6 etapas, conforme representado na Figura 9.

Figura 9 - Etapas da metodologia proposta.



Fonte: O autor (2023)

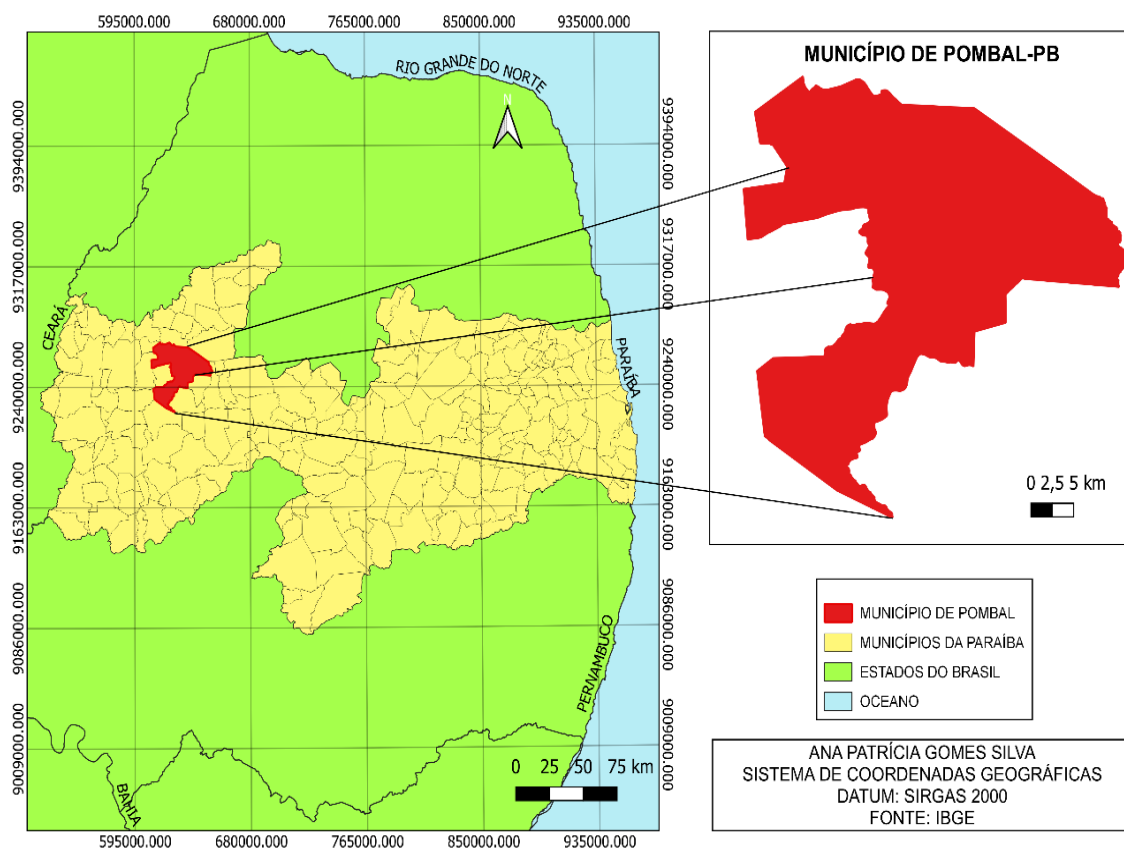
3.1. Caracterização da Área de Estudo

O estudo foi realizado para a cidade Pombal, localizada no Sertão da Paraíba, a 6°46'13" S de latitude e 37°48'06" W de longitude, como ilustrado na Figura 10. O município possui 32.802 habitantes distribuídos na extensão territorial de 894,099 km², onde 80,2% está concentrado na zona urbana e 19,8% na zona rural (IBGE, 2020). Além disso, está incluindo na bacia do Rio Piranhas, entre a subbacia do Rio Piancó e a região do Alto Piranhas e apresenta escoamento intermitente (CPRM, 2005).

A cidade é limitada ao norte pelos municípios de Santa Cruz, Lagoa e Paulista, ao leste por Condado, ao sul por São Bento do Pombal, Cajazeiras, Coremas, e São José da Lagoa Tapada, e ao oeste, por São Aparecida e São Francisco (CPRM, 2005).

Dados do SNIS (2021) indicam que 99,74% da população pombalese tem acesso a água e 80,2% é atendida com esgotamento sanitário e coleta de resíduos domiciliares, mas apenas 1,1% é atendida com drenagem de águas pluviais e a cidade possui 10,5 % de domicílios sujeitos à inundação.

Figura 10 - Localização do município de estudo.



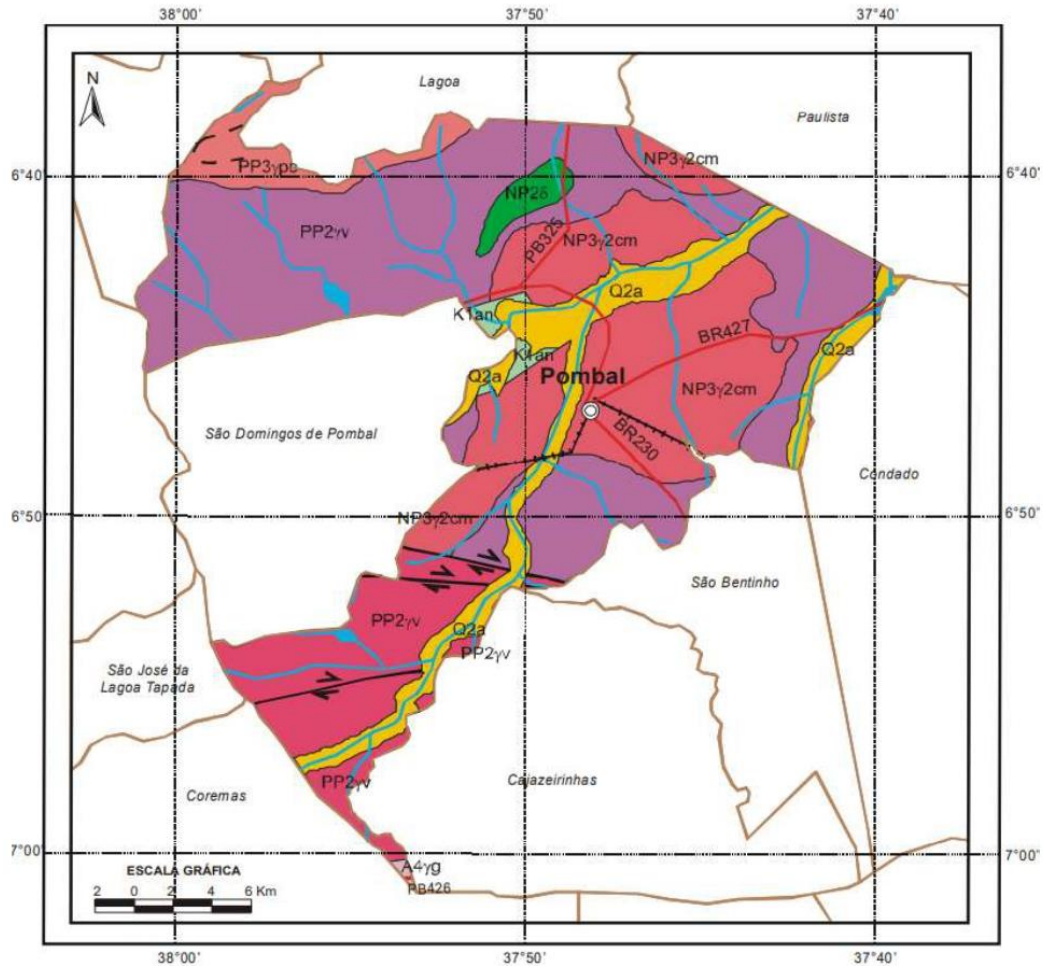
Fonte: O autor (2023)

Na cidade, a Coordenação Municipal de Defesa Civil é a instituição responsável por a gestão de riscos e resposta a desastres referentes a problemas com a Drenagem e o Manejo das Águas Pluviais Urbanas, o controle e monitoramento de precipitações é feito através de pluviômetros e a cidade não possui sistema de alerta de riscos hidrológicos (enxurradas, alagamentos e inundações) (SNIS, 2021).

Em relação a geologia, o município está inserido na depressão sertaneja, região com pediplanação monótoma, desenvolvido por processos erosivos, e relevo suave-ondulado, formação baseada em planícies, com estreitos vales de vertentes dissecadas, como mostra a Figura 11. Inserido no bioma caatinga, apresenta o clima

tropical semiárido com período chuvoso entre abril e novembro com precipitação média anual de 431,8 mm (CPRM, 2005).

Figura 11 - Mapa geológico de Pombal/PB



UNIDADES LITOSTRATIGRÁFICAS

Cenozóico

Q2a Depósitos aluvionares (a): areia, cascalho e níveis de argila.

Mesozóico

K1an Formações Antenor Navarro (an): arenito fino a grosso, siltito e argilito (leque aluvial e fluvial entrelaçado)

Neoproterozóico

NP3γ2cm Suite calcálica de médio a alto potássio Itaporanga (cm): granito e granodiorito porfirítico associado a diorito (588 Ma U-Pb)

NP2δ Suite máfica: gabro, diorito e tonalito

Paleoproterozóico

PP3γps Suite Poço da Cruz: augenitise granítico, leuco-ortognitise quartzo monzonítico a granito (1900 Ma U-Pb)

PP2γv Suite Várzea Alegre: ortognitise tonalítico-granodiorítico e migmatito (2098 Ma U-Pb)

PP2γcal Complexo Calcário (cal): ortognitise diorítico a granítico com restos de supra crustais 2300 Ma U-Pb

Arqueano

A4γg Complexo Granjeiro (γg): ortognitise TTG (2541 Ma U-Pb)

CONVENÇÕES GEOLÓGICAS

- Contato geológico
- Falha ou fratura
- Falha ou Zona de Cisalhamento Transcorrente Dextral

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

- ⊙ Sede Municipal
- Rodovias
- Linha férrea
- Limites Intermunicipais
- Rios e riachos
- Açude/barragem

Fonte: CPRM, 2005.

3.1.1. Dados necessários e geoprocessamento

Para a caracterização geomorfologia da bacia foram utilizadas imagens de radar do satélite ALOS, desenvolvido pela NASA, como dados matriciais e os dados vetoriais foram obtidos no portal do IBGE ou CPRM.

Toda a caracterização da bacia foi realizada através do processamento dos dados obtidos no software QGIS with GRASS versão 3.16. Nele deve ser extraído, através do algoritmo *r.watershed*, o sistema de drenagem, a direção do fluxo entre outras informações necessárias. Em seguida, utiliza-se o *r.water.outlet* para delimitar a área de drenagem com o exutório nas coordenadas -6,765 (latitude) e -37,805 (longitude). Por fim, com a calculadora de campo calcula-se a área e perímetro da bacia e o comprimento do talvegue.

A caracterização da topografia foi feita através das ferramentas para raster do programa, como a análise de terreno. Utilizando o plugin do Quick Maps Services, que habilita os serviços do Google Maps dentro do Qgis, realiza-se a definição do uso e ocupação de solo por meio da criação de camadas vetoriais que identifique cada tipo presente na bacia. O plugin Profile Tool será utilizado para definir a inclinação do talvegue.

3.2. Curvas IDF

3.2.1. Séries históricas

Para avaliar a influência das mudanças climáticas, foram obtidas séries históricas no período anterior as mudanças climáticas atuais causadas como consequências do aquecimento global e posteriores que contemplem os últimos anos marcados por desastres naturais.

Foram utilizadas as séries no portal do Hidroweb, administrado pela Agencia Nacional de Águas (ANA), e no da Agência Executiva de Gestão das Águas (AESAs).

3.2.2. Definição das curvas IDF

O procedimento utilizado para definição das curvas IDF para a cidade de Pombal é o mesmo descrito no item 2.4.2.1 e será realizado no Microsoft Excel. No software, cada série terá seus valores máximos extraídos e será calculado a média e desvio padrão para cada amostra na qual será aplicada a distribuição de probabilidade de Gumbel.

A chuva será desagregada para os períodos de retorno de 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 75 e 100 anos com durações de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60, 120, 150, 180, 210, 240, 300, 420, 480, 540, 600, 720, 900, 1200 e 1440 min.

3.3. Chuva de Projeto

3.3.1. Tempo de Concentração

Na distribuição temporal de chuva, um importante dado é o tempo de concentração da bacia e nessa pesquisa optou-se por defini-lo com sendo o valor médio entre as equações recomendadas por Silveira (2005) para bacias urbanas, cujas equações estão representadas a seguir.

- Equação de Carter

$$T_C = 0,0977 \times L^{0,6} \times S^{-0,3} \quad (33)$$

- Equação de Schaake

$$T_C = 0,0828 \times L^{0,24} \times S^{-0,16} \times A_{imp}^{-0,26} \quad (34)$$

- Equação de Kirpich

$$T_C = 0,0663 \times L^{0,77} \times S^{-0,385} \quad (35)$$

- Equação de Desbordes

$$T_C = 0,0869 \times A^{0,3039} \times S^{-0,3832} \times A_{imp}^{-0,4523} \quad (36)$$

Onde t_c é o tempo de concentração em horas, L é o comprimento do talvegue em km, S é a declividade em m/m, A_{imp} é a área impermeável em km^2 e A é a área da bacia em km^2 .

3.3.2. Distribuição Temporal de Chuvas Intensas

O parâmetro inicial para chuva de projeto é a definição do tempo de duração, para essa pesquisa adota-se o mesmo valor do tempo de concentração com discretização de 5 min.

Com a duração definida, aplica-se a relação IDF para o tempo de retorno de 100, 75, 50, 25, 10, 5, 3,33, 2,5, 2, 1,67, 1,43, 1,25 e 1,11 anos, que são aqueles utilizados no método gradex. Em seguida transforma-se a intensidade para lâmina e calcula-se o incremento. A distribuição é feita de maneira decrescente e iniciando a esquerda do pico conforme recomendado por Canholi (2014).

3.4. Hidrogramas de Projeto

3.4.1. Chuva efetiva

A precipitação efetiva será definida conforme descrito no item 2.4.2.5, contudo, na determinação do CN será calculado uma média ponderada para os tipos de uso e ocupação existentes na bacia.

Como a pesquisa é feita partir de dados pluviométricos, não existe informações sobre os últimos 5 minutos de chuva, dessa forma, a condição do solo adotada é a II, conforme recomendado por USDA-NRCS (2004).

Em relação ao tipo de solo, a classificação utilizada será a de Sartori (2004) por se tratar de solos brasileiros e levar a uma redução de erros na estimativa de vazões de projeto.

3.4.2. Geração dos hidrogramas de projeto

A criação dos hidrogramas irá seguir o procedimento de Tomaz (2002) descrito no item 2.4.2.6, onde o tempo de concentração e duração são os mesmos adotados para a chuva de projeto, mas quando representados graficamente a duração se

estende até a vazão se aproximar de zero para que a forma do gráfico pareça com a de hidrogramas unitários conhecidos.

A fração impermeável do solo é obtida através do quociente entre o total da área impermeável existente na bacia por a área total da bacia.

3.5. Aplicação do Método GRADEX

O ponto de partida, para a extrapolação pelo GRADEX, é obtido pela aplicação da distribuição de extremos tipo I à série de volumes escoados. Esse valor corresponde à magnitude da vazão média escoada em milímetros, estimada pela distribuição, para um período de retorno de 10 anos, adotado como ponto de partida.

Escolhido o valor do ponto de extrapolação do GRADEX, é montado o papel probabilístico de Gumbel-Chow, sobre o qual são lançadas as distribuições de extremos, para ambas as séries, precipitações e vazões. É traçada também, a reta extrapolada, de mesmo GRADEX de precipitação, a partir da distribuição dos volumes escoados, a partir do ponto definido como o de partida para o GRADEX.

O procedimento é realizado no Excel seguindo as etapas descritas por Zuffo (1993) no item 2.4.1.1 para os períodos de retorno de 100, 75, 50, 25, 10, 5, 3,33, 2,5, 2, 1.67, 1.43, 1.25 e 1.11 anos.

3.6. Dimensionamento de Canais

O dimensionamento dos canais a partir das vazões estimadas pelo método gradex segue os fundamentos descritos no item 2.5, onde serão definidas as seções para canais retangulares com inclinação de fundo igual a inclinação do talvegue.

Como a finalidade do pré-dimensionamento hidráulico é a avaliação dos resultados obtidos, será adotado valores de fator de forma e altura de água desenvolvidos por Porto (2006) por tentativa e erro até respeitar as velocidades mínimas para o material definido.

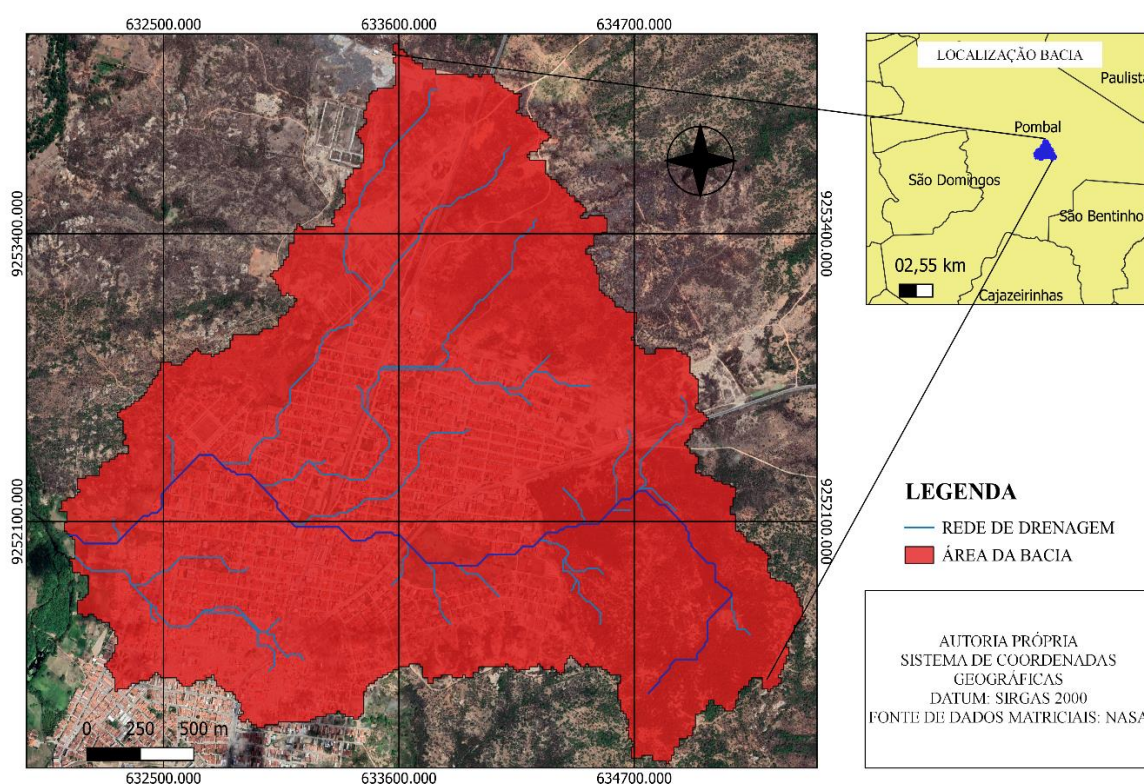
A cidade de Pombal possui no sistema de drenagem de água pluviais composto por sarjetas, galerias, postos de visitas e bocas de lobo (SNIS, 2021). As paredes das galerias são revestidas de pedra argamassada, portanto, nesse canal fictício será adotado o mesmo material para revestimento das paredes e verificação da velocidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização da Área de Estudo

A bacia urbana delimitada a partir das coordenadas -6,765 e -37,805 possui área de 6,1 km², perímetro de 7,5 km e compreende a parte superior da cidade de Pombal/PB, conforme Figura 12.

Figura 12 - Delimitação da bacia



Fonte: O autor (2023)

A rede de drenagem da bacia apresenta formato alongado e o seu padrão é do tipo dendrítico. O talvegue principal possui comprimento de 4,65 km com declividade média de 0,01 m/m, com cota máxima de 208 m e cota mínima de 172 m.

A declividade média foi calculada através da média ponderada, onde os dados extraídos pelo plugin Profile Tools foram agrupados e definido sua declividade através do comprimento do trecho e a diferença das cotas, como representado na tabela 11.

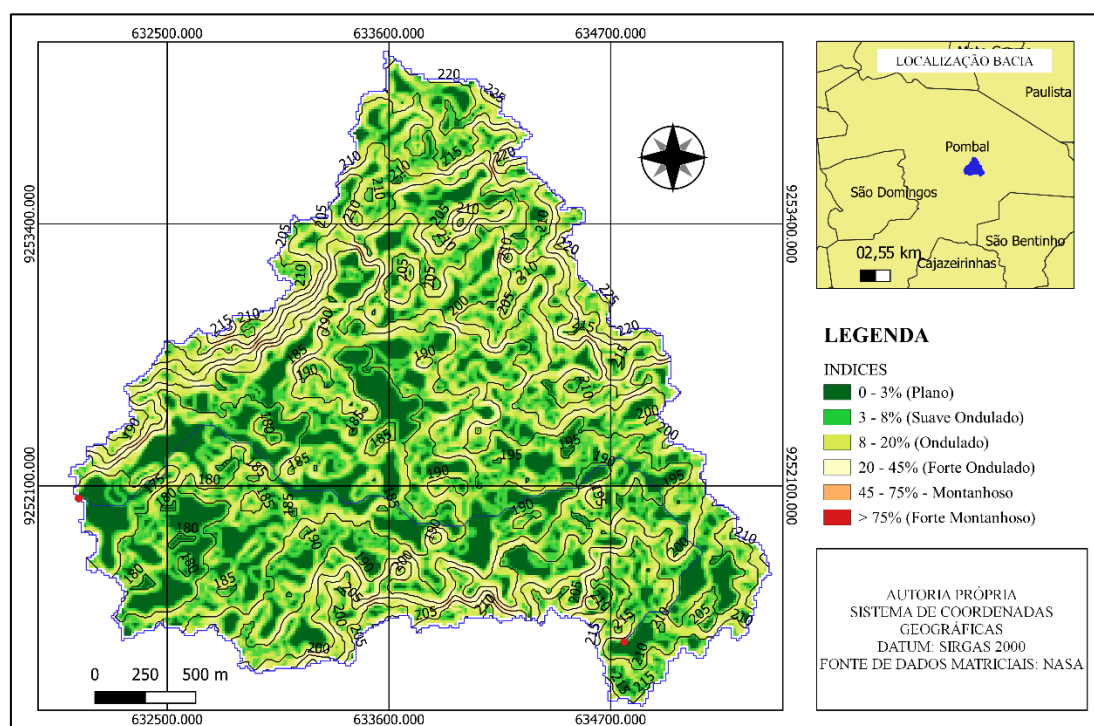
Tabela 11 - Declividade Média do Talvegue

Nº	Comprimento (m)	Declividade (m/m)
1	839,8	0,003
2	1112,3	0,004
3	459,1	0,011
4	899,3	0,006
5	485,9	0,010
6	131,1	0,038
7	483,7	0,010
8	235,1	0,013
Total	4646,2	0,012
Declividade Média		0,01

Fonte: O autor (2023)

O relevo da bacia está, em sua grande parte, ocupado pelo tipo suave-ondulado, que já característica do município e região, representado pela Figura 13.

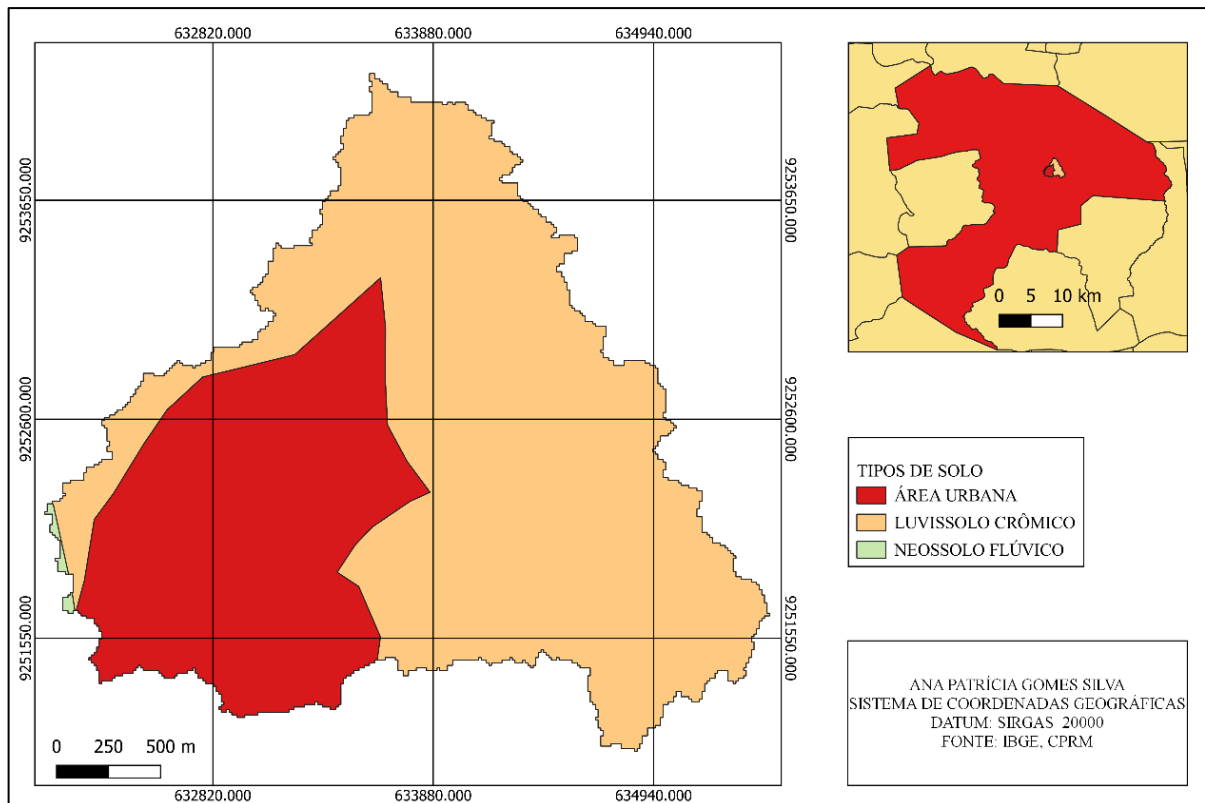
Figura 13 - Mapa do relevo da bacia



Fonte: O autor (2023)

A análise do solo foi feita a partir de vetores da CPRM, onde definiu-se como sendo do tipo Luvissole crômico, que segundo o IBGE (2023), é um solo raso com mudança textural abrupta e argila de atividade alta e saturações por bases altas. Na região do rio ou em suas proximidades o solo é do tipo Neossolo Flúvico. A Figura 14 apresenta o mapa de classificação do solo da bacia.

Figura 14 - Classificação do solo

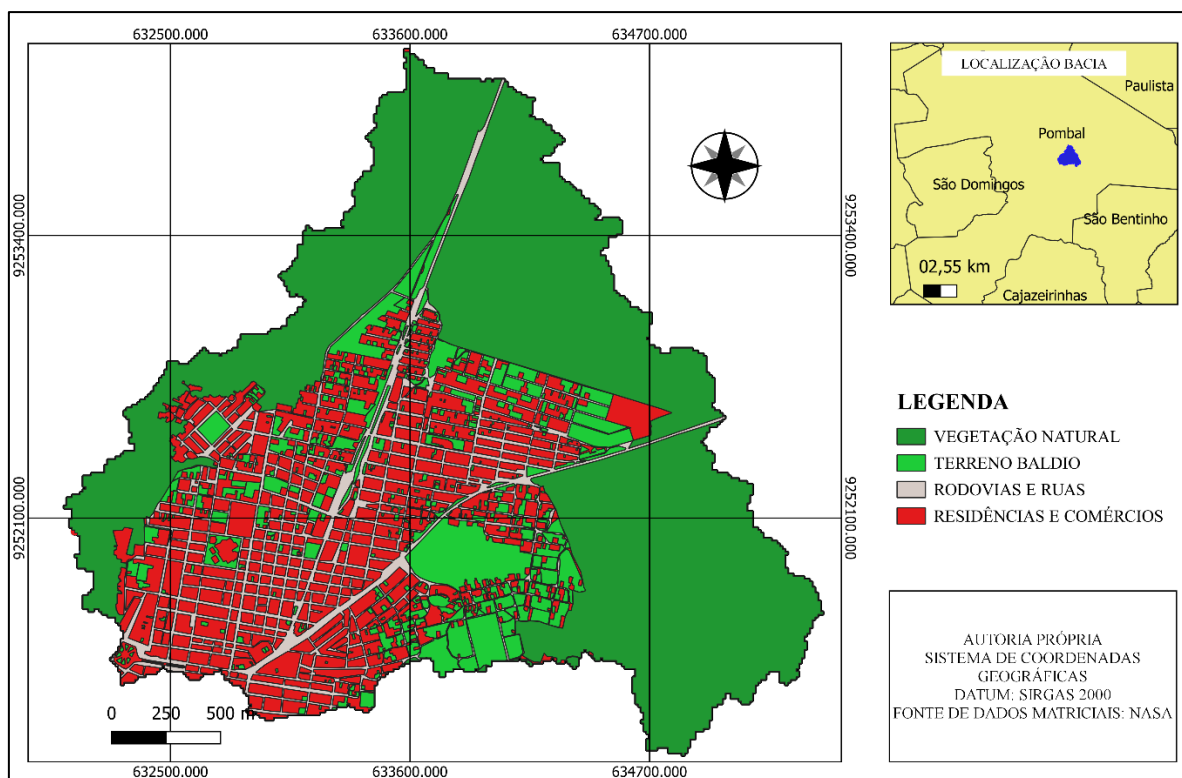


Fonte: O autor (2023)

O solo foi dividido em áreas residencial e comercial, rodovias e ruas, áreas permeáveis e terrenos baldios. Assim, foi obtido a classificação de uso e ocupação do solo, conforme representado pela Figura 15.

Se for traçado retas paralelas ao comprimento da bacia e calcular sua média, é obtido a largura média da bacia. A divisão entre o comprimento da bacia e a largura média representa o fator de forma da bacia. Realizando esse processo no Qgis, encontra-se o comprimento de 3,5 km, largura de 1,8 km e fator de forma de 0,52.

Figura 15 - Mapa de Uso e Ocupação



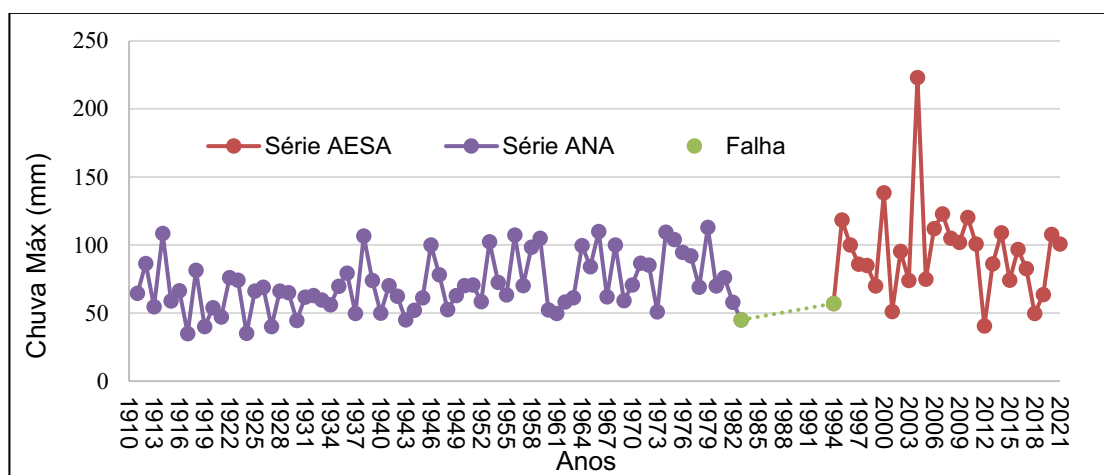
Fonte: O autor (2023)

4.2. Curvas IDF

A definição das relações IDF foram realizadas para a série extraída da ANA com 74 anos de extensão e período de medição de 1911 a 1983 e da AESA com 29 anos de extensão e período de 1994 a 2021, as informações de ambos os postos estão presentes na tabela 12. Como esperado, não foram encontradas séries com 30 anos de extensão de dados que englobem os últimos anos, portanto toda a análise será em cima desses períodos citados. A Figura 16 apresenta a séries utilizadas plotadas em um gráfico.

É esperado que os parâmetros das equações sofram alterações em decorrência das mudanças climáticas, como a pesquisa já citada feita por Carneiro, Filho e Raulino (2022). Portanto, sempre que for citado dados ANA, refere-se ao procedimento de determinação da série para a precipitações anteriores as mudanças climáticas e dados AESA para a equação definida com precipitações que estão incluídas nas variações climáticas atuais.

Figura 16 - Séries Históricas de precipitação



Fonte: O autor (2023)

Tabela 12 - Postos pluviométricos

Código	Órgão	Localização	Período de medição	Latitude	Longitude
-	AESA	Pombal	1994-2021	-37,801	-6,772
637032	ANA	Pombal	1910-1984	-37,817	-6,767

Fonte: O autor (2023)

Para os dados anteriores as mudanças climáticas, a distribuição de Gumbel aplicada está representada na tabela 13.

Tabela 13 - Distribuição de Gumbel série ANA

TR	Y	k	Chuva 1 dia (mm)
2	0,37	-0,16	67,5
5	1,50	0,72	85,4
10	2,25	1,30	97,3
15	2,67	1,63	104,1
20	2,97	1,87	108,8
30	3,38	2,19	115,3
40	3,68	2,42	120,0
50	3,90	2,59	123,5
75	4,31	2,91	130,0
100	4,60	3,14	134,6

Fonte: O autor (2023)

A desagregação da chuva dos dados da tabela 13 está presente na tabela 14. O valor de 1,14 marcado representa o coeficiente da CETESB que relaciona a chuva de 1 dia com a de 24 horas.

Tabela 14 - Desagregação da chuva da ANA

Duração (min)	2	5	10	15	20	30	40	50	75	100	Coeficientes
5	8,0	10,1	11,5	12,3	12,8	13,6	14,2	14,6	15,3	15,9	0,10
10	13,6	17,3	19,7	21,0	22,0	23,3	24,2	24,9	26,3	27,2	0,18
15	17,4	22,0	25,1	26,8	28,0	29,7	30,9	31,8	33,5	34,7	0,23
20	20,2	25,6	29,2	31,2	32,6	34,6	35,9	37,0	39,0	40,3	0,26
25	22,5	28,5	32,5	34,7	36,3	38,5	40,0	41,2	43,4	44,9	0,29
30	24,5	31,0	35,3	37,7	39,4	41,8	43,5	44,8	47,1	48,8	0,32
60	32,3	40,9	46,6	49,8	52,1	55,2	57,4	59,2	62,3	64,5	0,42
120	40,8	51,7	58,9	63,0	65,8	69,8	72,6	74,8	78,7	81,5	0,53
150	43,7	55,4	63,1	67,5	70,5	74,8	77,8	80,1	84,3	87,3	0,57
180	46,1	58,4	66,6	71,2	74,4	78,9	82,0	84,5	88,9	92,1	0,60
210	48,2	61,1	69,6	74,4	77,7	82,4	85,7	88,3	92,9	96,2	0,63
240	50,0	63,4	72,2	77,2	80,7	85,5	89,0	91,6	96,4	99,8	0,65
300	53,1	67,3	76,6	81,9	85,6	90,8	94,4	97,3	102,4	106,0	0,69
360	55,7	70,5	80,3	85,9	89,8	95,2	99,0	102,0	107,3	111,1	0,72
420	57,9	73,3	83,5	89,3	93,3	98,9	102,9	106,0	111,6	115,5	0,75
480	59,8	75,8	86,3	92,3	96,4	102,2	106,4	109,5	115,3	119,3	0,78
540	61,5	77,9	88,8	94,9	99,2	105,2	109,4	112,7	118,6	122,8	0,80
600	63,1	79,9	91,0	97,3	101,7	107,8	112,2	115,5	121,6	125,9	0,82
720	65,8	83,3	94,9	101,5	106,1	112,5	117,0	120,5	126,8	131,3	0,86
900	69,2	87,6	99,8	106,7	111,5	118,3	123,0	126,7	133,3	138,0	0,90
1200	73,6	93,2	106,2	113,5	118,7	125,8	130,9	134,8	141,9	146,9	0,96
1440	76,9	97,4	111,0	118,6	124,0	131,5	136,7	140,8	148,2	153,4	1,14

Fonte: O autor (2023)

O valor da precipitação aumenta à medida que o tempo de retorno e a duração aumenta. Contudo, quando transformado em intensidade, ela irá diminuir à medida que a duração aumenta. Os valores de intensidade estão presentes na tabela 15.

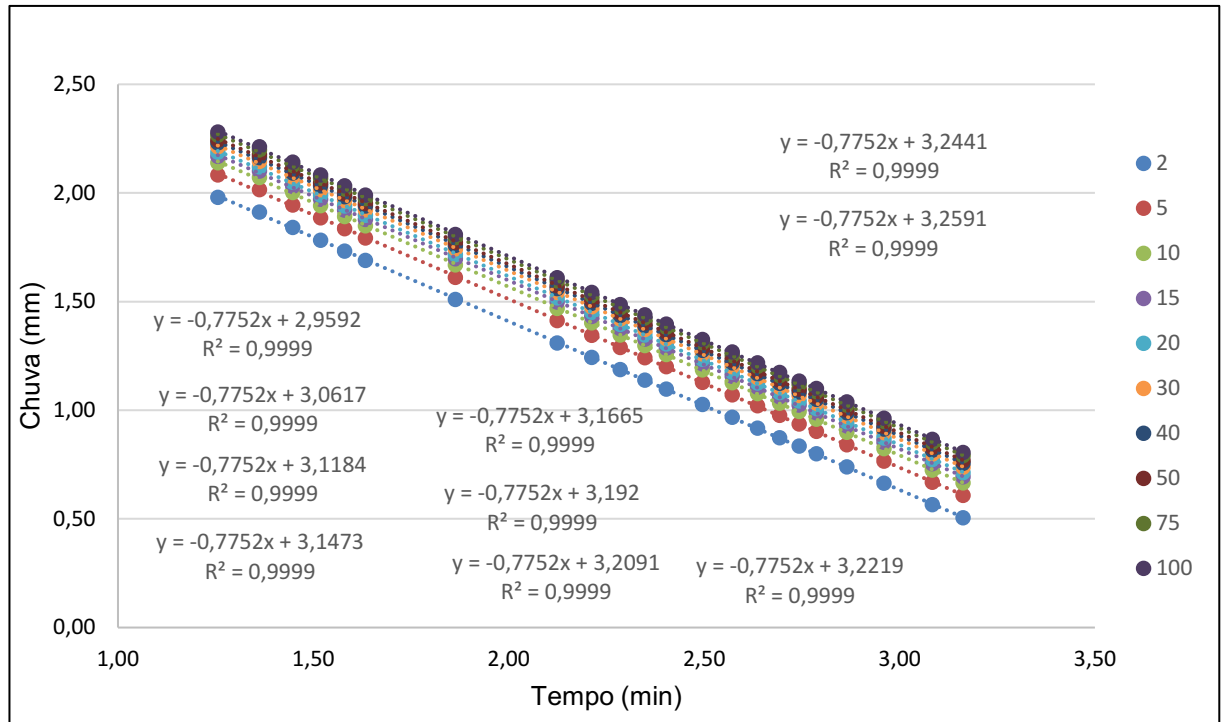
Tabela 15 - Intensidade de chuva - dados ANA

t (min)	2	5	10	15	20	30	40	50	75	100
5	95,54	121,00	137,85	147,36	154,01	163,31	169,87	174,94	184,12	190,62
10	81,75	103,53	117,95	126,08	131,78	139,73	145,34	149,68	157,54	163,10
15	69,51	88,03	100,29	107,21	112,05	118,82	123,59	127,27	133,95	138,68
20	60,66	76,82	87,52	93,55	97,78	103,68	107,84	111,06	116,89	121,02
25	54,05	68,45	77,98	83,36	87,12	92,38	96,09	98,96	104,15	107,83
30	48,92	61,95	70,58	75,45	78,86	83,62	86,98	89,57	94,27	97,60
60	32,31	40,91	46,61	49,83	52,08	55,22	57,44	59,15	62,26	64,45
120	20,42	25,86	29,47	31,50	32,92	34,91	36,31	37,40	39,36	40,75
150	17,49	22,16	25,24	26,98	28,20	29,90	31,10	32,03	33,71	34,90
180	15,38	19,48	22,19	23,72	24,80	26,29	27,35	28,16	29,64	30,69
210	13,78	17,45	19,88	21,25	22,21	23,55	24,49	25,22	26,55	27,48
240	12,51	15,84	18,05	19,29	20,16	21,38	22,24	22,90	24,10	24,95
300	10,62	13,45	15,33	16,39	17,13	18,16	18,89	19,45	20,47	21,20
360	9,28	11,75	13,39	14,31	14,96	15,86	16,50	16,99	17,89	18,52
420	8,27	10,47	11,93	12,75	13,33	14,14	14,70	15,14	15,94	16,50
480	7,48	9,47	10,79	11,53	12,05	12,78	13,29	13,69	14,41	14,92
540	6,84	8,66	9,87	10,55	11,02	11,69	12,16	12,52	13,18	13,64
600	6,31	7,99	9,10	9,73	10,17	10,78	11,22	11,55	12,16	12,59
720	5,48	6,94	7,91	8,46	8,84	9,37	9,75	10,04	10,57	10,94
900	4,61	5,84	6,65	7,11	7,43	7,88	8,20	8,44	8,89	9,20
1200	3,68	4,66	5,31	5,68	5,93	6,29	6,54	6,74	7,09	7,34
1440	3,20	4,06	4,62	4,94	5,17	5,48	5,70	5,87	6,18	6,39

Fonte: O autor (2023)

Quando aplicado logaritmo nos dados de intensidade, é necessário gerar um gráfico no Excel para obter as linhas de tendências e definir os parâmetros t_0 e n da equação da chuva. A Figura 17 apresenta as equações calculadas para cada período de retorno, onde o R^2 apresentou valor próximo de 1, caracterizando um bom ajuste e definindo o t_0 como 13. O módulo do coeficiente angular das equações com valor de 0,7752 represente o valor do parâmetro n .

Figura 17 - Gráfico da linearização da intensidade



Fonte: O autor (2023)

O próximo passo para a definição da equação da chuva é representar graficamente os dados da tabela 16. A coluna do log (C) são os valores do coeficiente linear das equações presente no gráfico da figura 18 e a coluna log (T) representa o logaritmo do período de retorno, TR.

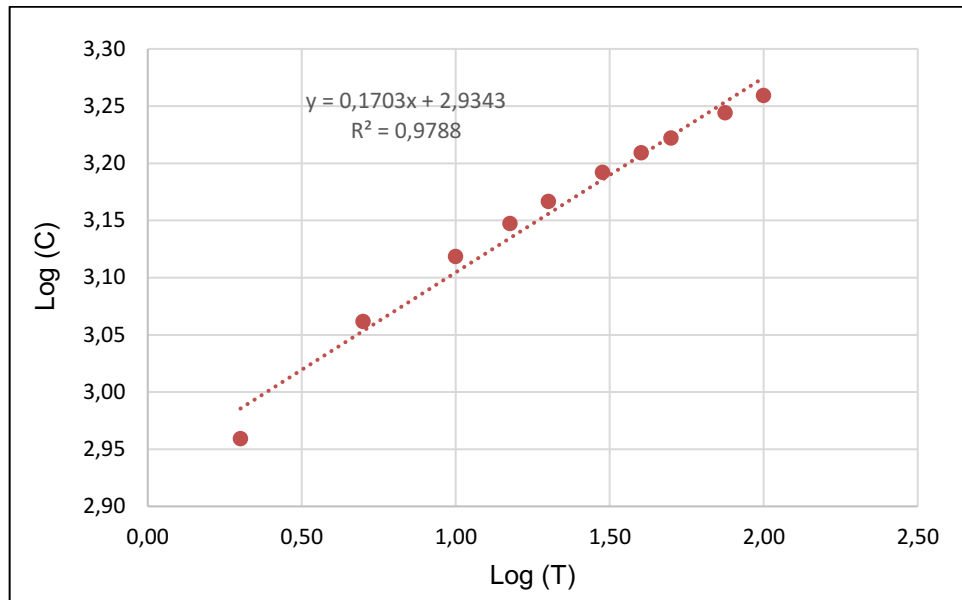
Tabela 16 - Log(T) x log(C) - dados ANA

TR	log (T)	log (C)
2	0,30	2,96
5	0,70	3,06
10	1,00	3,12
15	1,18	3,15
20	1,30	3,17
30	1,48	3,19
40	1,60	3,21
50	1,70	3,22
75	1,88	3,24
100	2	3,26

Fonte: O autor (2023)

O gráfico dos valores da tabela 16 está representado na Figura 18. A linha de tendência calculada também apresentou um coeficiente de determinação R^2 próximo de 1.

Figura 18 - Gráfico Log (T) x Log (C)



Fonte: O autor (2023)

A equação de regressão linear definida determina os dois últimos parâmetros da curva IDF para os dados da ANA, onde o coeficiente angular é o parâmetro m , ou seja, $m=0,1703$ e o inverso do coeficiente linear, a função exponencial, é o valor do parâmetro k , logo, $k=10^{2,9343}=859,6$. Dessa forma, a equação da chuva para cidade de Pombal que representa eventos anteriores as mudanças climáticas do século 21 está representada pela equação (37).

$$i_{ANA} = \frac{k \times T^m}{(t + t_0)^n} = \frac{859,6 \times T^{0,1703}}{(t + 13)^{0,7752}} \quad (37)$$

Todo o procedimento descrito nesse tópico foi repetido para a série histórica da AESA. A distribuição de Gumbel para os dados recentes está presente na tabela 17, a desagregação está na tabela 18, a intensidade na Tabela 19, o gráfico linearizado na Figura 19, os dados do Log (T) x log (C) está na Tabela 20 e o gráfico na Figura 20.

Tabela 17 - Distribuição de Gumbel - dados AESA

TR	Y	k	Chuva de 1 dia
2	0,37	-0,16	87,88
5	1,50	0,72	118,51
10	2,25	1,30	138,79
15	2,67	1,63	150,23
20	2,97	1,87	158,24
30	3,38	2,19	169,43
40	3,68	2,42	177,31
50	3,90	2,59	183,41
75	4,31	2,91	194,46
100	4,60	3,14	202,28

Fonte: O autor (2023)

Tabela 18 - Desagregação da chuva - dados AESA

D	2	5	10	15	20	30	40	50	75	100	C
5	10,4	14,0	16,4	17,7	18,7	20,0	20,9	21,6	22,9	23,9	0,10
10	17,7	23,9	28,0	30,3	32,0	34,2	35,8	37,0	39,3	40,9	0,18
15	22,6	30,5	35,7	38,7	40,8	43,6	45,7	47,2	50,1	52,1	0,23
20	26,3	35,5	41,6	45,0	47,4	50,8	53,1	55,0	58,3	60,6	0,26
25	29,3	39,6	46,3	50,1	52,8	56,6	59,2	61,2	64,9	67,5	0,29
30	31,9	43,0	50,3	54,5	57,4	61,4	64,3	66,5	70,5	73,3	0,32
60	42,1	56,7	66,5	71,9	75,8	81,1	84,9	87,8	93,1	96,9	0,42
120	53,2	71,8	84,0	91,0	95,8	102,6	107,4	111,0	117,7	122,5	0,53
150	57,0	76,8	90,0	97,4	102,6	109,8	114,9	118,9	126,1	131,1	0,57
180	60,1	81,1	94,9	102,8	108,2	115,9	121,3	125,5	133,0	138,4	0,60
210	62,8	84,7	99,2	107,4	113,1	121,1	126,7	131,1	139,0	144,6	0,63
240	65,2	87,9	102,9	111,4	117,3	125,6	131,5	136,0	144,2	150,0	0,65
300	69,2	93,3	109,3	118,3	124,6	133,4	139,6	144,4	153,1	159,3	0,69
360	72,5	97,8	114,6	124,0	130,6	139,8	146,4	151,4	160,5	167,0	0,72
420	75,4	101,7	119,1	128,9	135,8	145,4	152,1	157,4	166,9	173,6	0,75
480	77,9	105,1	123,1	133,2	140,3	150,2	157,2	162,6	172,4	179,3	0,78
540	80,2	108,1	126,6	137,0	144,3	154,5	161,7	167,3	177,4	184,5	0,80
600	82,2	110,8	129,8	140,5	148,0	158,4	165,8	171,5	181,8	189,2	0,82
720	85,7	115,6	135,4	146,5	154,3	165,3	173,0	178,9	189,7	197,3	0,86
900	90,1	121,5	142,3	154,0	162,3	173,7	181,8	188,1	199,4	207,4	0,90
1200	95,9	129,3	151,4	163,9	172,7	184,9	193,5	200,1	212,2	220,7	0,96
1440	100,2	135,1	158,2	171,3	180,4	193,1	202,1	209,1	221,7	230,6	1,14

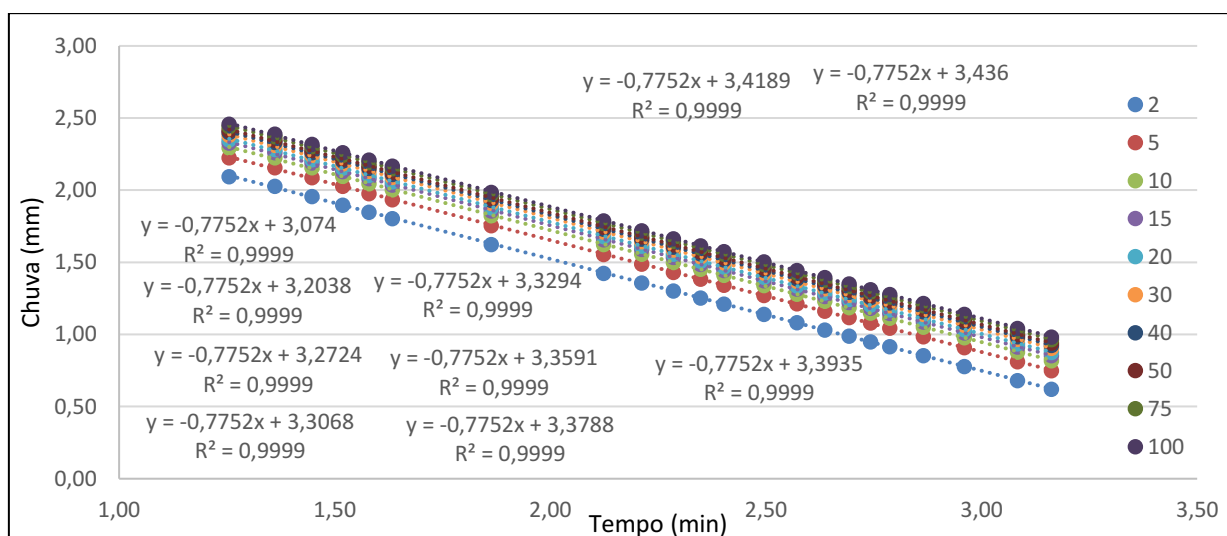
Fonte: O autor (2023)

Tabela 19 - Intensidades de chuva - dados AESA

t	2	5	10	15	20	30	40	50	75	100
5	124,46	167,83	196,54	212,75	224,09	239,93	251,11	259,74	275,39	286,46
10	106,49	143,60	168,17	182,03	191,74	205,29	214,85	222,24	235,63	245,10
15	90,55	122,10	142,99	154,78	163,03	174,56	182,69	188,97	200,35	208,41
20	79,01	106,55	124,78	135,07	142,27	152,33	159,42	164,90	174,83	181,86
25	70,40	94,94	111,18	120,35	126,76	135,73	142,05	146,93	155,78	162,05
30	63,73	85,93	100,63	108,93	114,74	122,85	128,57	132,99	141,00	146,67
60	42,08	56,75	66,46	71,94	75,77	81,13	84,91	87,83	93,12	96,86
120	26,61	35,88	42,01	45,48	47,90	51,29	53,68	55,52	58,87	61,24
150	22,79	30,73	35,99	38,96	41,03	43,93	45,98	47,56	50,43	52,45
180	20,04	27,02	31,64	34,25	36,08	38,63	40,43	41,82	44,34	46,12
210	17,94	24,20	28,34	30,67	32,31	34,59	36,21	37,45	39,71	41,30
240	16,29	21,97	25,73	27,85	29,34	31,41	32,87	34,00	36,05	37,50
300	13,84	18,66	21,85	23,66	24,92	26,68	27,92	28,88	30,62	31,85
360	12,09	16,30	19,09	20,67	21,77	23,31	24,39	25,23	26,75	27,83
420	10,77	14,53	17,01	18,41	19,40	20,77	21,73	22,48	23,84	24,79
480	9,74	13,13	15,38	16,65	17,54	18,78	19,65	20,33	21,55	22,42
540	8,91	12,01	14,07	15,23	16,04	17,17	17,97	18,59	19,71	20,50
600	8,22	11,08	12,98	14,05	14,80	15,84	16,58	17,15	18,18	18,92
720	7,14	9,63	11,28	12,21	12,86	13,77	14,41	14,91	15,81	16,44
900	6,01	8,10	9,49	10,27	10,82	11,58	12,12	12,54	13,29	13,83
1200	4,79	6,47	7,57	8,20	8,63	9,24	9,67	10,01	10,61	11,04
1440	4,17	5,63	6,59	7,14	7,52	8,05	8,42	8,71	9,24	9,61

Fonte: O autor (2023)

Figura 19 - Gráfico da intensidade linearizada - dados AESA



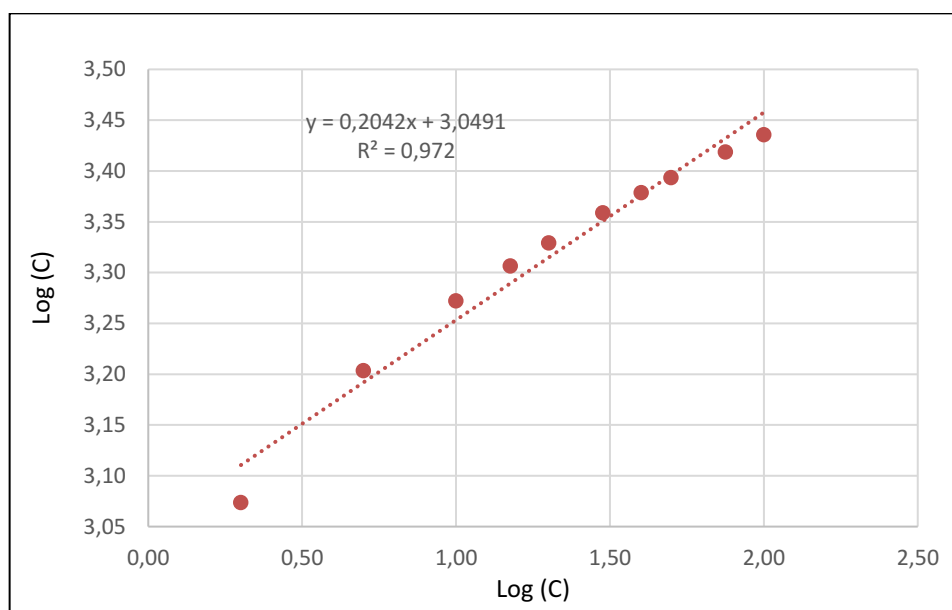
Fonte: O autor (2023)

Tabela 20 - Log(T) x log(C) - dados AESA

TR	log T	log C
2	0,30	3,07
5	0,70	3,20
10	1,00	3,27
15	1,18	3,31
20	1,30	3,33
30	1,48	3,36
40	1,60	3,38
50	1,70	3,39
75	1,88	3,42
100	2	3,436

Fonte: O autor (2023)

Figura 20 - Gráfico Log (T) x Log (C)



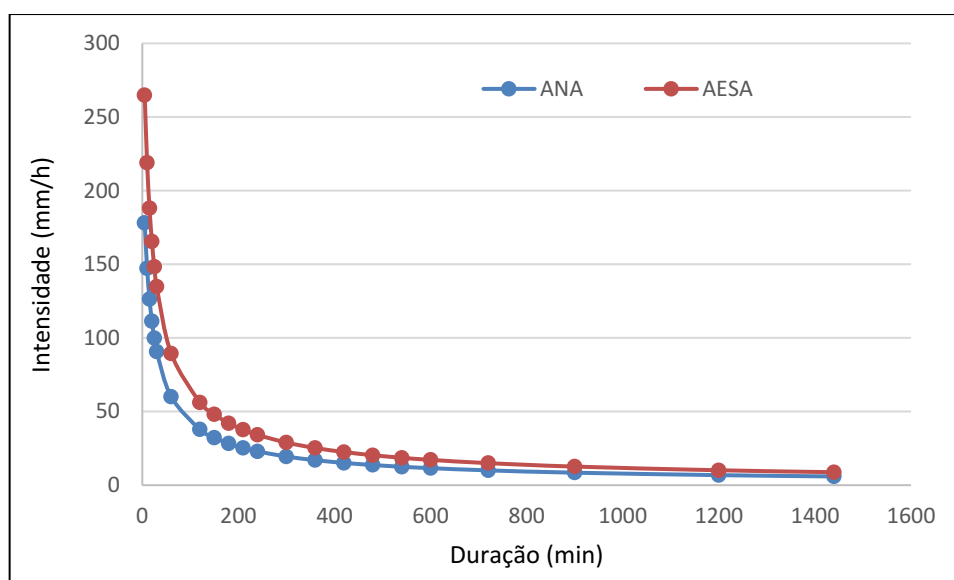
Fonte: O autor (2023)

A linearização dos dados apresentado pela figura 20 trouxe o mesmo valor do parâmetro n e mesmo t_0 . Contudo, a partir da figura 21 percebe-se que o valor de m e k irão mudar. Pois $m=0,2024$ e $k=10^{3,0491}=1119,7$. Portanto, a equação da chuva definida para a série histórica da AESA está representada pela equação (38).

$$i_{AESA} = \frac{1119,7 \times T^{0,2024}}{(t + 13)^{0,7752}} \quad (38)$$

A definição dessas equações mostrou que as alterações causadas nas precipitações por causa das mudanças climáticas a partir do ano 2000 resultou na alteração dos fatores que são diretamente proporcionais ao valor da intensidade, ou seja, se eles aumentam, a intensidade também aumenta. Além disso, também é notório a mudança que a chuva desagregada sofreu entre as séries, pois com os dados da AESA, mais da metade das precipitações possuíam valores acima de 100 mm, diferentemente da desagregação feita através dos dados da ANA. A Figura 21 apresentada a comparação entre as duas curvas IDF geradas para o período de retorno de 50 anos.

Figura 21 - Curvas IDF para TR=50 anos



Fonte: O autor (2023)

4.3. Chuva de Projeto

4.3.1. Tempo de Concentração

A área da bacia de 6,1 km², a área impermeável de 2,33 km², a declividade de 0,01 m/m e o comprimento de talvegue de 4,65 km são os dados de entrada para o cálculo do tempo de concentração pelas equações 33, 34, 35 e 36. A tabela 21 apresenta os resultados obtidos para cada equação e o valor médio adotado.

Tabela 21 - Tempo de Concentração Médio

Nome	T _c (h)
Kirpich I	1,41
Schaake	0,34
Desbordes	1,54
Carter	1,06
Tempo de Concentração Médio	1,08

Fonte: O autor (2023)

O valor do tempo transformado para minutos equivale a 65 min. Esse valor é constante para os dois cenários estudados, logo, a chuva terá a mesma duração e mesma discretização nos gráficos e cálculos em ambas situações.

4.3.2. Distribuição Temporal

No método dos blocos alternados, o primeiro dado a ser definido é o tempo de duração e a discretização. Como já citado o tempo de duração será de 65 minutos e a discretização será de 5 minutos. A tabela 22 apresenta a distribuição para os dados da ANA e a tabela 23 para os dados da AESA para o tempo de retorno de 50 anos.

Tabela 22 - Distribuição Temporal de Chuvas Intensas - Dados ANA

t (min)	i (mm/h)	H (mm)	Incremento de altura	Precipitação total
5	178,05	14,84	14,84	3,64
15	126,41	31,60	16,77	5,35
25	99,77	41,57	9,97	9,97
35	83,24	48,56	6,99	16,77
45	71,88	53,91	5,35	14,84
55	63,54	58,25	4,34	6,99
65	57,13	61,89	3,64	4,34

Fonte: O autor (2023)

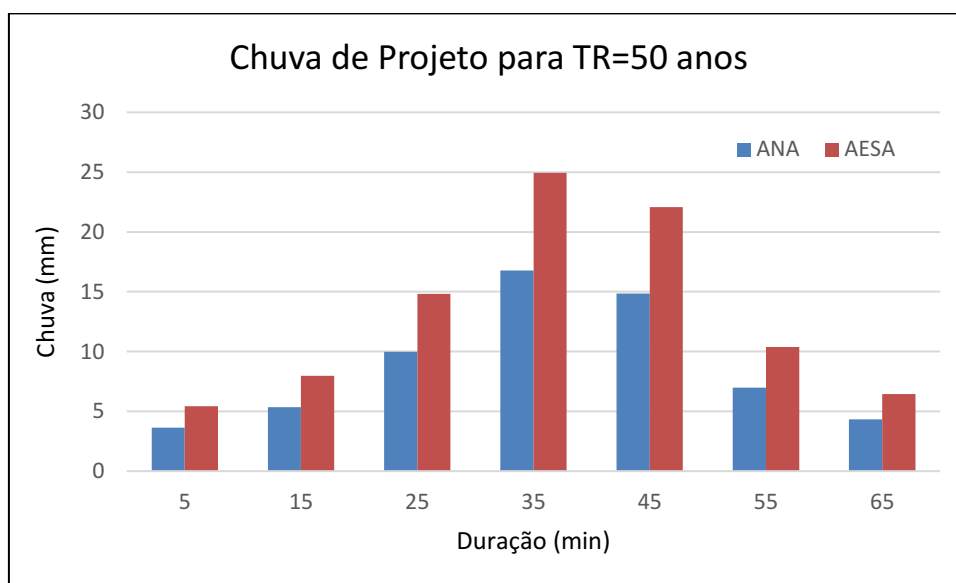
Tabela 23 - Distribuição Temporal de Chuvas Intensas - Dados AESA

t (min)	i (mm/h)	H (mm)	Incremento de altura	Precipitação total
5	264,81	22,07	22,07	5,42
15	188,02	47,00	24,94	7,96
25	148,38	61,83	14,82	14,82
35	123,80	72,22	10,39	24,94
45	106,91	80,18	7,96	22,07
55	94,51	86,63	6,45	10,39
65	84,97	92,05	5,42	6,45

Fonte: O autor (2023)

A Figura 22 apresenta a comparação entre os hietogramas gerados para cada série histórica a partir do tempo de retorno de 50 anos. As precipitações influenciadas pelas mudanças climáticas apresentaram valores acima daqueles gerados pelas medições antigas em todas as durações

Figura 22 - Distribuição Temporal de Chuvas Intensas para TR=50 anos



Fonte: O autor (2023)

As tabelas de hietogramas para os demais períodos de retorno estão presentes no apêndice da pesquisa.

4.4. Hidrograma de Projeto

4.4.1. Chuva efetiva

O ponto de partida para a aplicação do método CN do SCS é definir a curva número. Como citado no item 3.4.1, a condição de umidade adotada é a II e a tabela 8 pode ser utilizada para definir o valor do CN para cada tipo de uso e ocupação do solo.

O tipo de solo da bacia é o Luvissole e a classificação de Sartori (2004) indica que ele se encaixa no tipo de solo D. Dessa forma, os tipos de uso e ocupação definidos tiveram suas áreas extraídas e média ponderada calculada, conforme tabela 24.

Tabela 24 - Cálculo do CN Médio

Tipo de uso e ocupação	Área (km ²)	CN	% Área	CN x % Área
Rodovia	0,06	98	1%	0,9
Área natural	3,11	83	51%	42,3
Terrenos baldios	0,77	80	13%	10,0
Residências, comércios e indústrias	1,51	91	25%	22,4
Ruas (Paralelepípedos e Terra)	0,66	90	11%	9,7
TOTAL	6,1		CN Médio	85,42

Fonte: O autor (2023)

Substituindo o valor do CN na fórmula do S, encontra-se o valor de 43,4. As perdas iniciais, 20% de S, representa o valor de 8,67. Dessa forma, verifica-se se a precipitação acumulada é maior que 0,2S, caso não seja, a chuva efetiva acumulada será nula para aquele dado. A tabela 25 mostra os resultados da chuva excedente para o período de retorno de 50 anos calculado pelos dados da ANA e a tabela 26 para os dados da AESA. A comparação entre os hietogramas para os dois cenários está presente na Figura 23.

Tabela 25 - Chuva excedente TR=50 anos - dados ANA

P_{total}	P_{acm}	Ch Ex Ac	Ch EX
3,64	3,64	0	0
5,35	9,00	0,002	0,002
9,97	18,97	1,975	1,972
16,77	35,73	10,397	8,423
14,84	50,57	20,588	10,191
6,99	57,56	25,9	5,3
4,34	61,89	29,3	3,4

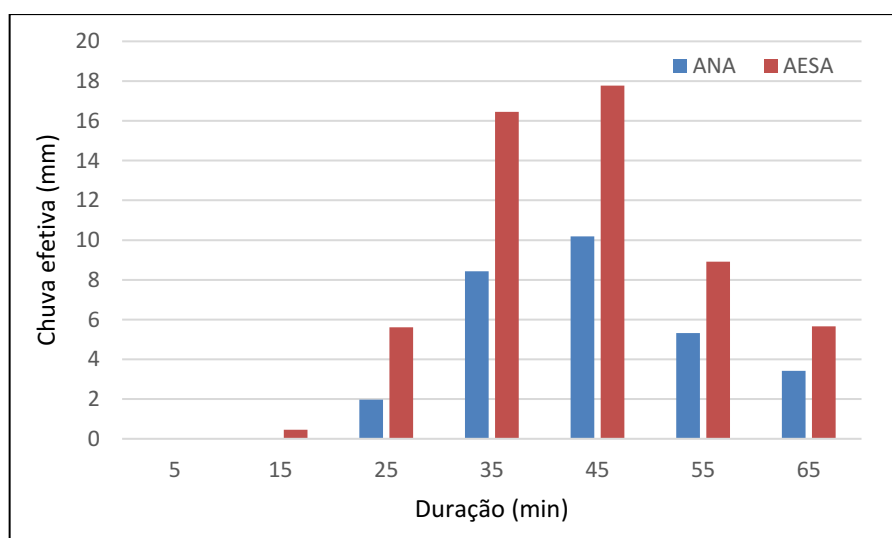
Fonte: O autor (2023)

Tabela 26 - Chuva excedente TR=50 anos - dados AESA

P_{total}	P_{acm}	Ch Ex Ac	Ch EX
5,42	5,42	0	0
7,96	13,39	0,5	0,5
14,82	28,21	6,1	5,6
24,94	53,14	22,5	16,4
22,07	75,21	40,3	17,8
10,39	85,60	49,2	8,9
6,45	92,05	54,9	5,7

Fonte: O autor (2023)

Figura 23 - Hietograma de chuva efetiva para TR=50 anos



Fonte: O autor (2023)

Os resultados para chuva efetiva foram semelhantes aos da chuva de projeto, pois, como esperado, os dados da AESA resultaram nas maiores lâminas.

4.4.2. Hidrogramas pelo Método Santa Bárbara

A aplicação do método Santa Bárbara, conforme citado por Tomaz (2002), foi desenvolvido no Excel. A ordem utilizada seguiu a descrição do item 2.4.2.6. Para o tempo de retorno de 50 anos, o procedimento feito está presente na tabela 27 e 28. A figura 25 apresenta a comparação entre os resultados para ambas séries históricas

Tabela 27 - Hidrograma de Projeto para TR=50 anos - dados ANA

t - min	t - h	P _{tot}	P _{exd}	I	I (AI)	I (AP)	I1	I2	Q1	Q2
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,1	3,6	0,0	3,6	43,7	0,0	27,0	27,0	0,0	1,0
15	0,3	5,4	0,0	5,4	32,1	0,0	19,9	46,9	1,0	2,7
25	0,4	10,0	2,0	8,0	59,8	11,8	49,7	69,6	2,7	5,0
35	0,6	16,8	8,4	8,3	100,6	50,5	116,6	166,3	5,0	10,8
45	0,8	14,8	10,2	4,6	89,0	61,1	120,9	237,5	10,8	18,8
55	0,9	7,0	5,3	1,7	41,9	31,9	60,3	181,1	18,8	24,1
65	1,1	4,3	3,4	0,9	26,0	20,5	38,2	98,5	24,1	26,0

Fonte: O autor (2023)

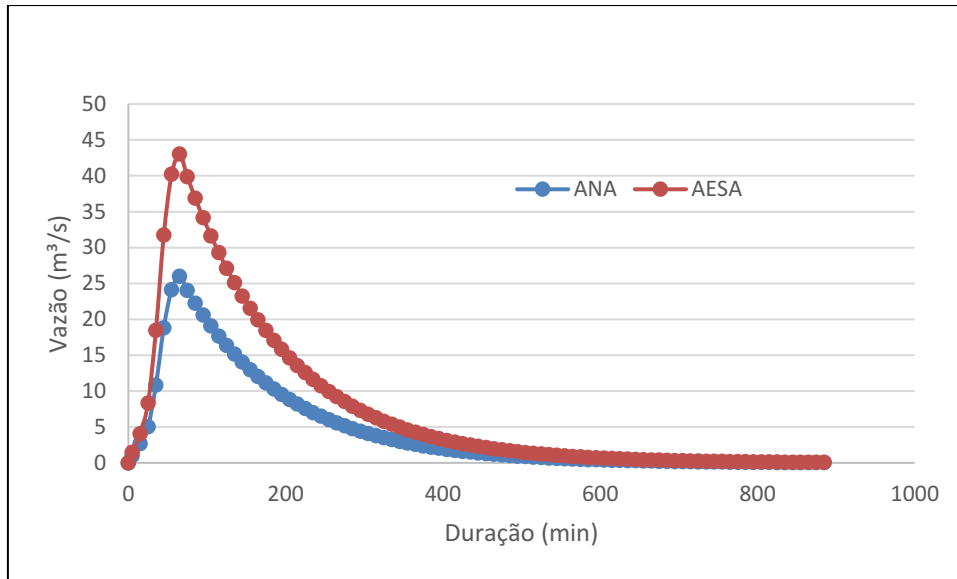
Tabela 28 - Hidrograma de Projeto para TR=50anos - dados AESA

t - min	t - h	P _{tot}	P _{exd}	I	I (AI)	I (AP)	I1	I2	Q1	Q2
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,1	5,4	0,0	5,4	65,1	0,0	40,2	40,2	0,0	1,5
15	0,3	8,0	0,5	7,5	47,8	2,8	32,5	72,7	1,5	4,1
25	0,4	14,8	5,6	9,2	88,9	33,6	91,2	123,7	4,1	8,4
35	0,6	24,9	16,4	8,5	149,6	98,7	198,7	289,9	8,4	18,5
45	0,8	22,1	17,8	4,3	132,4	106,6	196,6	395,4	18,5	31,7
55	0,9	10,4	8,9	1,5	62,4	53,5	96,1	292,8	31,7	40,2
65	1,1	6,4	5,7	0,8	38,7	33,9	60,4	156,6	40,2	43,1

Fonte: O autor (2023)

Analisando o gráfico da Figura 24, percebe-se que o pico do hidrograma apresentou valores de vazão cerca de 1,7 vezes maior para os dados recentes de precipitação.

Figura 24 - Hidrograma de projeto para TR=50anos



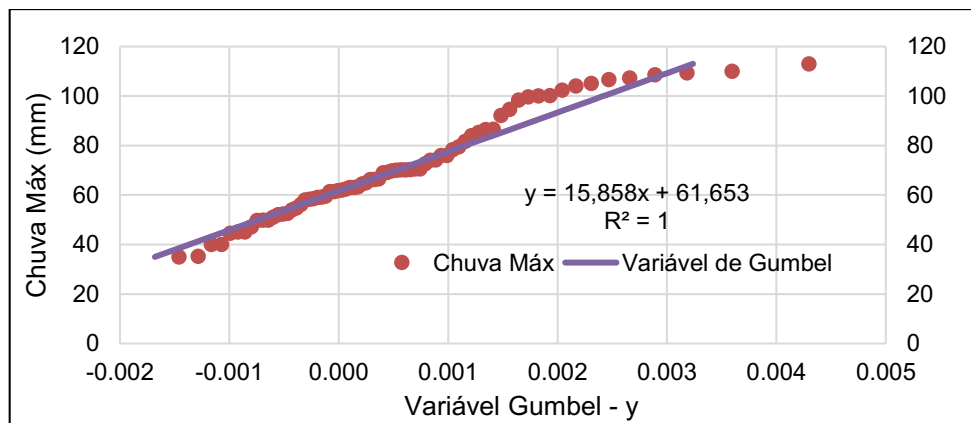
Fonte: O autor (2023)

4.5. Aplicação do Método Gradex

O primeiro passo para aplicação do Método Gradex é a definição do tempo de base (t_{base}) que, nessa pesquisa, foi adotado o mesmo valor do tempo de concentração ($t_{base} = 65\text{min}$), pois segundo Zuffo e Leme (2005) $t_c \leq t_{base} \leq 2 \cdot t_c$. O tempo adotado é maior que 1h e a área da bacia é inferior a 100 km^2 , necessitando apenas de 1 posto pluviométrico e atendendo aos requisitos da tabela 4.

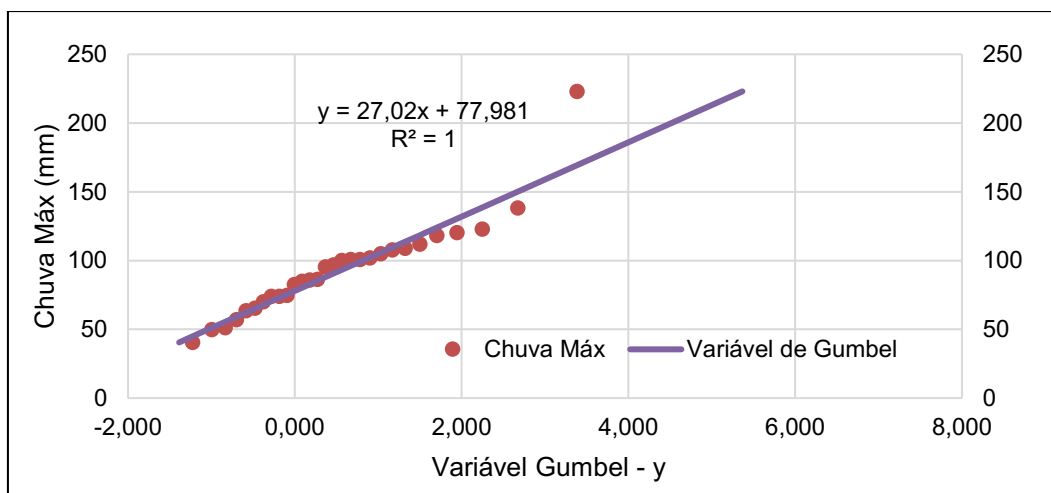
A segunda etapa consiste na distribuição de Gumbel a partir das chuvas máximas calculadas no item 4.2 para definir a equação da chuva. A distribuições de Gumbel para cada série de dados estão representadas graficamente nas Figuras 25 e 26.

Figura 25 - Distribuição de Gumbel - dados ANA



Fonte: O autor (2023)

Figura 26 - Distribuição de Gumbel - dados AESA



Fonte: O autor (2023)

O próximo passo é calcular as vazões máximas médias anuais pelo Método Santa Bárbara, mas já foram obtidas no item 4.4.2. Portanto, os resultados são transformados em lâminas e seus valores obtidos estão representados nas tabelas 29 e 30.

Tabela 29 - Aplicação do Método GRADEX - dados ANA

y	TR	Q _M	Q _P	Q _M (m ³ /s)	Q _P /Q _M
4,60	100	10,15	30,29	10,32	2,94
4,31	75	9,52	28,43	9,68	2,94
3,90	50	8,70	26,00	8,85	2,94
3,20	25	7,45	22,26	7,58	2,94
2,25	10	6,06	18,07	6,17	2,93
1,50	5	5,18	15,40	5,27	2,92
1,03	3,33	4,72	13,98	4,80	2,92
0,67	2,5	4,43	13,10	4,50	2,91
0,37	2	4,21	12,44	4,28	2,91
0,09	1,67	4,04	11,92	4,11	2,90
-0,18	1,43	3,90	11,49	3,97	2,90
-0,48	1,25	3,78	11,13	3,85	2,89
-0,84	1,11	3,68	10,83	3,75	2,89
				R _{med}	2,92

Fonte: O autor (2023)

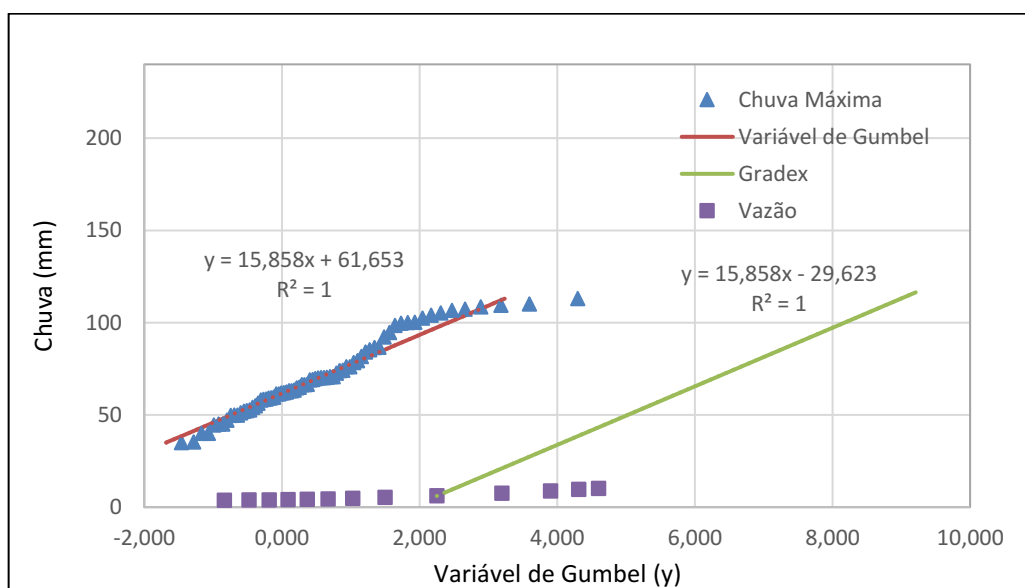
Tabela 30 - Aplicação do Método GRADEX - dados ANA

y	TR	Q _M	Q _P	Q _M (m ³ /s)	Q _P /Q _M
4,60	100	17,31	51,23	17,61	2,91
4,31	75	16,09	47,68	16,36	2,91
3,90	50	14,50	43,06	14,74	2,92
3,20	25	12,11	36,08	12,32	2,93
2,25	10	9,51	28,41	9,67	2,94
1,50	5	7,91	23,62	8,04	2,94
1,03	3,33	7,07	21,11	7,19	2,94
0,67	2,5	6,56	19,57	6,67	2,93
0,37	2	6,18	18,41	6,28	2,93
0,09	1,67	5,88	17,52	5,98	2,93
-0,18	1,43	5,64	16,79	5,73	2,93
-0,48	1,25	5,44	16,17	5,53	2,93
-0,84	1,11	5,26	15,65	5,35	2,92
				R _{med}	2,93

Fonte: O autor (2023)

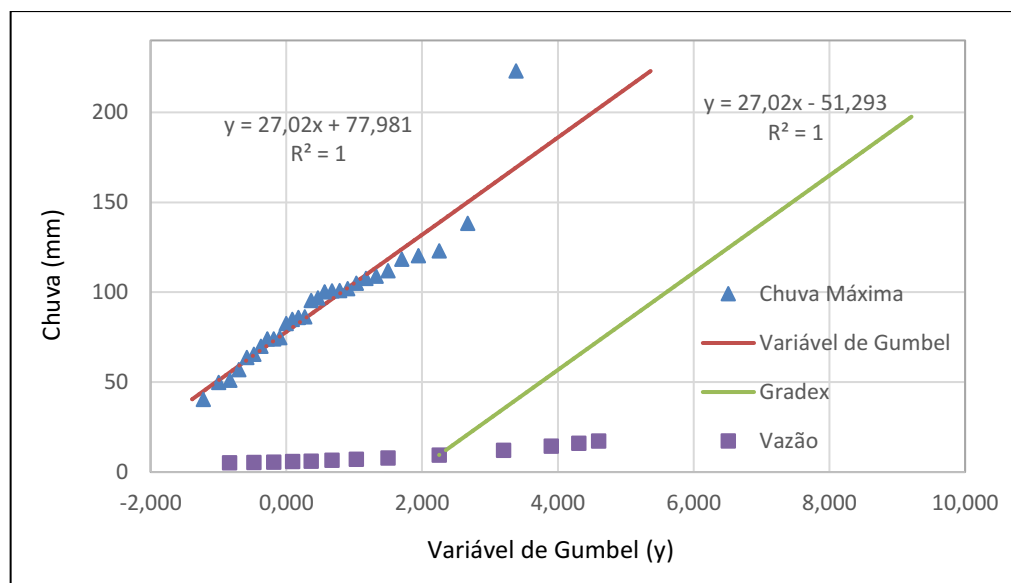
A coluna de y e Q_M são plotadas juntamente com a distribuição de Gumbel e uma reta é traçada a partir do período de retorno de 10 anos até o de 10000 anos com o mesmo coeficiente angular da distribuição, conforme as figuras 27 e 28.

Figura 27 - Gradex - dados ANA



Fonte: O autor (2023)

Figura 28 - Gradex - dados AESA



Fonte: O autor (2023)

Nas tabelas e nos gráficos do método Gradex percebe-se uma diferença nas vazões médias e máximas e nas equações geradas para cada séries de dados. O fator de pico é o único valor que não teve mudança relevante, mas os demais valores sofreram alterações conforme o tempo de retorno foi aumentado.

Para comparação de resultados, estima-se a vazão para o período de retorno de 50 anos que representa a variável reduzida $y=3,9019$ obtida pela equação (4). Substituindo esse valor na equação do gradex gerada pelo Excel, obtêm-se a vazão média ($\overline{Q_{TR}}$) $50,5 \text{ m}^3/\text{s}$ para os dados da ANA e $84,7 \text{ m}^3/\text{s}$ para os dados da AESA. Por outro lado, se multiplicado essas vazões pelo fator de pico, a vazão de pico (Q_{TR}) para as séries será de $147,2 \text{ m}^3/\text{s}$ e $248 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente, conforme a equação (7). Portanto, a atualização da equação da chuva gerou vazões de pico cerca de 1,7 vezes maior que a obtida através dos antigos dados.

4.6. Dimensionamento de Canais

A última etapa para analisar o impacto causado pelas mudanças climáticas no dimensionamento hidráulico está na definição de seções transversais de canais a partir das vazões estimadas pelo método GRADEX. Conforme citado no item 3.6, a forma da seção é a retangular com revestimento das paredes de pedra argamassada, cujo coeficiente de Manning será retirado da tabela 31 de Porto (2005).

Tabela 31 - Valores do coeficiente de rugosidade da fórmula de Manning

Natureza das Paredes	Condições			
	Muito Boas	Boas	Regulares	Más
Tubos de ferro fundido sem revestimento	0,012	0,013	0,014	0,015
Idem, com revestimento de alcatrão	0,011	0,012	0,013	
Tubos de ferro galvanizado	0,013	0,014	0,015	0,017
Tubos de bronze ou de vidro	0,009	0,01	0,011	0,013
Condutos de barro vitrificado, de esgotos	0,011	0,013	0,015	0,017
Condutos de barro, de drenagem	0,011	0,012	0,014	0,017
Alvenaria de tijolos com argamassa de cimento: condutos de esgoto, de tijolos	0,012	0,013	0,015	0,017
Superfícies de cimento alisado	0,010	0,011	0,012	0,013
Superfícies de argamassa de cimento	0,011	0,012	0,013	0,015
Tubos de concreto	0,012	0,013	0,015	0,016
Condutos e aduelas de madeira	0,010	0,011	0,012	0,013
Calhas de prancha de madeira aplainada	0,010	0,012	0,013	0,014
Idem, não aplainada	0,011	0,013	0,014	0,015
Idem, com pranchões	0,012	0,015	0,016	
Canais com revestimento de concreto	0,012	0,014	0,016	0,018
Alvenaria de pedra argamassa	0,017	0,020	0,025	0,035
Alvenaria de pedra seca	0,025	0,033	0,033	0,035
Alvenaria de pedra aparelhada	0,013	0,014	0,015	0,017
Calhas metálicas lisas (semicirculares)	0,011	0,012	0,013	0,015
Idem, corrugadas	0,023	0,025	0,028	0,030
Canais de terra, retilíneos e uniformes	0,017	0,020	0,023	0,025
Canais abertos em rocha, lisos e uniformes	0,025	0,030	0,033	0,035
Canais abertos em rochas, irregulares, ou de paredes de pedra irregulares de mal-arrumadas	0,035	0,040	0,045	
Canais dragados	0,025	0,028	0,030	0,033
Canais curvilíneos e lamosos	0,023	0,025	0,028	0,030
Canais com leito pedregoso e vegetação aos taludes	0,025	0,030	0,035	0,040
Canais com fundo de terra e taludes empedrados	0,028	0,030	0,033	0,035
ARROIOS E RIOS				
Limpos, retilíneos e uniformes	0,025	0,028	0,030	0,033
Idem, com vegetação e pedras	0,030	0,033	0,035	0,040
Com meandros, bancos e poços pouco profundos, limpos	0,035	0,040	0,045	0,050
Idem, com águas baixas, declividade fraca	0,040	0,045	0,050	0,055
Idem, com vegetação e pedras	0,033	0,035	0,040	0,045
Idem, com pedras	0,045	0,050	0,055	0,060
Com margens espraçadas, pouca vegetação	0,050	0,060	0,070	0,080
Com margens espraçadas, muita vegetação	0,075	0,100	0,125	0,150

Fonte: Modificado de Porto (2005)

Para o revestimento escolhido, o coeficiente de rugosidade para canais em boas condições é de 0,020. Com a vazão, esse coeficiente e considerando a inclinação de fundo a mesma do talvegue ($i=0,01$), o coeficiente dinâmico calculado a partir da equação (30) para a série da ANA foi de 3,55.

Para definir o coeficiente de forma k , adota-se a razão de aspecto ($m=b/y_0$) igual a 2, pois segundo Porto (2005), permite que a seção retangular tenha o mínimo

perímetro molhado. Para localizar o valor na tabela, o valor de z equivalente a uma seção retangular é zero, pois ele é o parâmetro que define a inclinação do talude. A Figura 29 apresenta a faixa da tabela de porto (2005) que corresponde ao valor de K a ser utilizado no dimensionamento.

Figura 29 - Fator de forma K utilizado no dimensionamento

$m = b/y_0$	$Z = 0,0$	$Z = 0,50$	$Z = 1,0$	$Z = 1,25$	$Z = 1,5$	$Z = 1,75$	$Z = 2,0$
0	0,000	0,530	0,771	0,859	0,935	1,001	1,061
0,2	0,300	0,640	0,850	0,929	0,998	1,058	1,113
0,4	0,453	0,735	0,921	0,993	1,056	1,112	1,163
0,6	0,572	0,818	0,986	1,052	1,110	1,163	1,211
0,8	0,672	0,893	1,046	1,107	1,162	1,211	1,256
1	0,760	0,961	1,103	1,159	1,210	1,257	1,299
1,2	0,838	1,023	1,155	1,209	1,257	1,300	1,341
1,4	0,909	1,082	1,205	1,255	1,301	1,342	1,380
1,6	0,974	1,136	1,253	1,300	1,343	1,382	1,419
1,8	1,034	1,187	1,298	1,342	1,383	1,421	1,455
2	1,091	1,236	1,340	1,383	1,422	1,458	1,491
2,2	1,143	1,282	1,382	1,422	1,459	1,494	1,526

Fonte: Porto (2005)

Dessa forma, substituindo os valores de M e K na equação (29), encontra-se $y_0 = 3,26$ m que, substituído na equação da razão de aspecto, determina $b = 6,52$ m. Já para a vazão estimada para os dados da AESA, mantendo a mesma razão de aspecto, os resultados encontrados foram: coeficiente dinâmico igual a $M = 4,32$, $y_0 = 3,96$ m e $b = 7,93$ m. Contudo, essas seções calculadas não atendem a velocidade máxima no canal, pois para rochas compactadas esse valor só pode ir até 4 m/s, conforme tabela 10, visto precisa ser retirado 10% do valor de y_0 para ser a borda livre do canal. Portanto, as seções foram ajustadas de forma que atendessem a velocidade, mas que deixaram de respeitar o mínimo perímetro molhado. Logo, para os dados da ANA a seção ficou $y_0 = 3,9$ m e $b = 11$ m, já para a AESA $y_0 = 4$ m e $b = 17,3$ m.

A partir de todas as informações obtidas, observa-se que a influência das mudanças climáticas no volume de água precipitada resultou um aumento de 70% nos fatores utilizados no dimensionamento hidráulico. Portanto, os resultados confirmam a necessidade da atualização da base de dados das relações IDF, além de ressaltar a importância de extensas séries de dados, pois caso a série mais recente for maior, as mudanças sobre os resultados serão reduzidas ou aumentadas.

5. CONCLUSÕES

A pesquisa foi realizada com o intuito de analisar como as mudanças climáticas impactam no dimensionamento hidráulico sobre uma bacia hidrográfica urbana com 64% de sua área permeável localizada sobre solo impermeável (argiloso), com formato alongado e não propenso a formação de cheias, onde o fato de a cidade não possuir um sistema de drenagem eficiente contribui para ocorrências de enxurradas e alagamentos em períodos chuvosos.

A análise das equações da chuva calculadas a partir de duas séries históricas com períodos de medição diferentes comprovou que as mudanças climáticas é um fator que deve ser levado em conta no dimensionamento hidráulico por gerarem intensidades de chuva de grande relevância no aumento do pico dos hidrogramas, pois os parâmetros que são diretamente proporcionais ao valor da intensidade sofreram um crescimento de cerca de 30% e resultou no aumento dos picos dos hietogramas de chuva de projeto, chuva efetiva e hidrogramas de projeto.

O segundo cenário estudado, os dados mais recentes da AESA, apresentou maiores picos nos hietogramas de projetos gerados pelo método dos blocos alternados quando comparado com aquele gerado pela série histórica de dados antigos. Esses resultados se tornaram padrão nos demais cálculos realizados, ou seja, os picos para o segundo cenário foram consideravelmente maiores nos hietogramas de chuva efetiva e nos hidrogramas de projeto do método Santa Bárbara, chegando a ser quase o dobro do valor.

Os hidrogramas de Santa Bárbaras se mantiveram conservadores e não subestimaram os picos, assim como as vazões estimadas pelo método Gradex que, por sua vez, teve seus valores superiores aos obtidos pelos hidrogramas. Essa diferença já era esperada. visto que a falta de séries fluviométricas requer o uso de modelos que gerem hidrogramas para só assim proceder na utilização do método.

A vazão estimada pelo método Gradex para o segundo cenário foi 1,7 vezes maior do que a estimada para o primeiro. O aumento nas vazões gerou um crescimento de 60% nas seções transversais dos canais definidas para resistir a uma velocidade escoamento de 4 m/s, pois a largura da superfície aumentou de 11 para 17,3.

Caso essa vazão fosse avaliada em um canal existente, provavelmente ele iria romper para o período de retorno de 50 anos. Nesse caso medidas de controle estruturais ou não estruturais precisariam ser adotadas com urgência.

O método Gradex mostrou ser uma excelente ferramenta a ser utilizada na estimativa de vazões de pico, pois, para essa pesquisa, sua aplicação não foi complicada, permitiu extrapolar os valores e resultou em valores conservadores. Além disso, o fato do método ter a capacidade de detectar a tendência de ciclos hidrológicos permitiria sua aplicação sobre as séries utilizadas de forma unida, ou seja, juntando as duas séries históricas trabalhadas na pesquisa (total de 103 anos de extensão), obter a vazão de pico e comparar com os resultados obtidos com as séries separadas.

Essa pesquisa apresentou resultados de grande importância para a cidade de Pombal – PB, pois caso órgãos municipais ou profissionais estiverem na procura de informações a respeito de equação de chuva, podem utilizar as desenvolvidas pelo autor nas suas pesquisas ou até em análises reais de dimensionamento hidráulico do sistema de drenagem urbana da cidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, F. G.; SOBRINHA, L. A., BRANDÃO, J. L. B. Análise da distribuição temporal das chuvas em eventos hidrológicos extremos. Eng Sanit Ambient, v.22, n.2, p. 239-250, 2017.

ARAUJO, D. K. L. Avaliação Hidrológica E Estimativa De Vazão De Projeto Para Macrodrenagem Urbana. Universidade Federal De Campina Grande – UFCG. TCC – Pombal/PB, 2021.

BEMFICA, D. Análise da Aplicabilidade de Padrões de Chuva de Projeto a Porto Alegre. 1999. 135 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

DAEE. Plano Estadual de Recursos Hídricos: Primeiro Plano do Estado de São Paulo. São Paulo, DAEE, 1990.

CAMPOS H. B; Utilização do Método Gradex para Detecção de Mudanças de Tendência Hidrológica, Considerando a Ciclicidade e Manutenção de Eventos. 2018. 286 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2018.

CANHOLI, A. P. Drenagem urbana e controle de enchentes. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

CANHOLI, A. P. Drenagem urbana e controle de enchentes. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

CARNEIRO, B. L. D. S.; SOUZA FILHO, F. A.; RAULINO, J. B. S. Impacto das Mudanças Climáticas na Segurança de Barragens: Estudo de Caso do Açude Araras. In: SOUZA FILHO, F. A.; REIS JÚNIOR, D. S.; GALVÃO, C. O. (organizadores). Secas e Cheias: Modelagem e Adaptação aos extremos hidrológicos no contexto da variabilidade e mudança do clima. Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2022.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Drenagem Urbana: manual de projeto. 3ª Edição. São Paulo, 1986.

CPRM. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do município de Pombal, estado da Paraíba. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais. Porto Alegre: ABRH, 2013.

CUNHA, S. F.; SILVA, F. E. O.; MOTA, T. U.; PINHEIRO, M. C. Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia. Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH, Porto Alegre, vol. 20, n. 4, p. 837 - 848, 2015.

DERICKE, P. H. La croissance urbaine. In: Université de Grenoble, Aénagement du territoire et développement régional: les faits, les idées, les institutions. Vol. 4. 1976.

GOÉS, V. C. Simulação Hidrológico-Hidrodinâmica Integrada ao Geoprocessamento para Avaliação de Macrodrenagem em Centros Urbanos. 2009. 170 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Programa de pós graduação em engenharia civil, UFPE, Recife, 2009.

GUMBEL, E.J. Méthods graphiques pour l'analyse des débits de creu. La Houille Blanche, p.709-717, 1956.

HAWKINS, R. H., Hjelmfelt, A. T., and Zevenbergen, A. W. (1985). "Runoff probability, storm depth, and curve numbers." J. Irrig. Drain. Eng., 111(4), 330–340.

HENRIQUES, J. A.; OLIVEIRA, O.; COURA, M. A.; LIBÂNIO, M., BAPTISTA, M. B. Água de drenagem ou esgoto sanitário? Uma análise do sistema de macrodrenagem em cidade de médio porte na Região Nordeste. Eng Sanit Ambient, v.26, n.5, p. 935-943, 2021.

IBGE. Cidades e Estados. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pb/pombal.html> > Acesso em: 10/01/2023.

JATON, J. F. (1984) Modelisation des Relations Pluies-Débits- Etude de la Pluie de Projet. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Institut de Génie Rural.

ZAHED F. O., K.; MARCELLINI, S. S. (1995) Precipitações Máximas. In: Tucci, C. E. M.; Porto, R. L.; Barros, M. T. (organizadores). Drenagem Urbana. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, 1995.

LIRA, A. M. Avaliação das Condições do Sistema de Macrodrenagem da Cidade de São Paulo – SP. 2003. 206 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; REZENDE, O. M. Drenagem Urbana – Do projeto tradicional à sustentabilidade. Elsevier, Rio de Janeiro. 2016.

MOCKUS, V. Hydrologic soil groups. In: NATIONAL Engineering Handbook. Washington, DC: USDA, 1972. Part 630 Hydrology, section 4, chapter 7. Disponível em: <<http://directives.sc.egov.usda.gov/22526.wba>>. Acesso em: 02 jan. 2023.

MONTEIRO, J. C. P. Dimensionamento de Canais. Revista Tecnologia, 1984.

NETO, J. M. A.; FERNÁNDEZ, M. F. Manual de Hidráulica. 9ª ed. São Paulo: Blucher, 2018.

PORTO, R. L. (1995) Escoamento Superficial Direto. In: Tucci, C. E. M., Porto, R. L.; Barros, M. T. (organizadores); Drenagem Urbana, Coleção ABRH de Recursos Hídricos, volume 5, Editora da Universidade, Porto Alegre.

QUEIROZ, M. S.; ALVES, N. S. Aplicação de Diferentes Fórmulas de Tempo de Concentração para uma Bacia Hidrográfica Urbana. Revista Tocantinense De Geografia. v. 09, n. 18, p. 219-230, Araguaína, 2020.

SARTORI, A. Avaliação da classificação hidrológica do solo para a determinação do excesso de chuva do método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos. 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

SILVA, A. P. G. Influência das Mudanças Climáticas na Determinação da Equação da Chuva para a Cidade De Pombal-PB. In: XVI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste e 15º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa, 2022, Caruaru. Anais... Caruaru: ABRHidro, 2022.

SILVA, J. J. R. Avaliação dos impactos das mudanças climáticas no sistema de drenagem urbana do município de João Monlevade/MG. 2021. 164 f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) - Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA), Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2021.

SILVA, M. E. S.; GUETTER, A. K. Mudanças climáticas regionais observadas no estado do Paraná. Terra Livre, São Paulo, vol I, n. 20, p. 111-126, 2003.

SILVEIRA, A. L. L. Equação para os Coeficientes de Desagregação de Chuva. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Rio Grande do Sul, vol. 5, n. 4, 2000.

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Rio Grande do Sul, vol. 10, n. 1, 2005.

SILVA, B. M. Chuvas intensas em localidades do estado do Pernambuco. 2009. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pernambuco, CTG, Recife, 2009.

SMDU - Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: aspectos tecnológicos; fundamentos. São Paulo: SMDU, 2012.

SMMA. Plano Diretor de Drenagem Urbana de Curitiba Volume IV - Manual de Drenagem. 2002.

SNIS. Municípios e Saneamento. Instituto Água e Saneamento. Disponível em: < O saneamento em POMBAL | PB | Municípios e Saneamento | Instituto Água e Saneamento (aguaesaneamento.org.br)>. Acessado em: 20 jan. 2023.

SOUZA, J. C. B. A influência do método de escolha do parâmetro “c” na determinação de equações de chuvas intensas. 2014. 233 f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

SUDERSHA. Manual de Drenagem Urbana: Região Metropolitana de Curitiba-PR. Versão 1.0, dez, 2002.

TOMAZ, P. Cálculos hidrológicos e hidráulicos para obras municipais. cap. 1, 2002.

TUCCI, C. E. M. Impactos da variabilidade climática e do uso do solo nos recursos hídricos. Agência Nacional das Águas. 2002.

TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L.; BARROS, M. T. Drenagem Urbana. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, 1995.

TUCCI, C.E.M. (1995) Inundações urbanas. In: TUCCI, C.E.M; PORTO, R.L.L.; BARROS, M.T. Drenagem urbana: Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS/ABRH. 1 ed. Cap. 1, p. 15-36.

TUCCI, C. E. M. Gestão de Águas Pluviais Urbanas. Brasília: Ministério das Cidades – Global Water Partnership – World Bank – Unesco, 2005. 192 p.

VIOLA, H. Gestão de águas pluviais em áreas urbanas – o estudo de caso da cidade do samba. 2008. 398 f. Dissertação (Mestrado em ciências em planejamento energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2008.

WANIELISTA, M.P., YOUSEF, Y.A. Stormwater management. Jonh Wiley & Sons, Inc., 1987.

ZUFFO, A. C. Relações estatísticas entre precipitações intensas e vazões máximas: Método GRADEX. 1993. 261 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

ZUFFO, A. C.; LEME, P. E. GRADEX e Santa Barbara: método híbrido para cálculo de vazão de projeto para macrodrenagem urbana. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16. João Pessoa, 2005. Anais... João Pessoa, 2005.

APÊNDICE A – MEMÓRIA DE CÁLCULO DA DISTRIBUIÇÃO DE GUMBEL

Tabela 32 - Média e desvio padrão - série ANA

Média (μ)	70,81
Desvio Padrão (σ)	20,34

Fonte: O autor (2023)

Tabela 33 - Distribuição de Gumbel - série ANA

Ano	P _{máx}	Ordem	P	TR	y _{obs}	k _t	P _{obs}	y _{teórica}	P _{teórico}
1979	113	1	0,014	74,00	4,297	2,901	129,80	3,238	112,898
1966	110	2	0,027	37,00	3,597	2,355	118,70	3,049	109,898
1974	109,4	3	0,041	24,67	3,185	2,033	112,16	3,011	109,298
1914	108,5	4	0,054	18,50	2,890	1,803	107,48	2,954	108,398
1956	107,3	5	0,068	14,80	2,660	1,624	103,83	2,879	107,198
1938	106,6	6	0,081	12,33	2,470	1,476	100,83	2,834	106,498
1959	105,1	7	0,095	10,57	2,309	1,350	98,27	2,740	104,998
1975	104	8	0,108	9,25	2,168	1,240	96,03	2,670	103,898
1953	102,4	9	0,122	8,22	2,043	1,143	94,05	2,570	102,298
1968	100,2	10	0,135	7,40	1,930	1,055	92,25	2,431	100,098
1946	100	11	0,149	6,73	1,827	0,974	90,62	2,418	99,898
1964	99,6	12	0,162	6,17	1,732	0,900	89,12	2,393	99,498
1958	98,4	13	0,176	5,69	1,644	0,832	87,72	2,317	98,298
1976	94,6	14	0,189	5,29	1,562	0,768	86,42	2,078	94,498
1977	92,2	15	0,203	4,93	1,485	0,708	85,20	1,926	92,098
1971	86,6	16	0,216	4,63	1,412	0,651	84,05	1,573	86,498
1912	86,5	17	0,230	4,35	1,343	0,597	82,95	1,567	86,398
1972	85,3	18	0,243	4,11	1,278	0,546	81,91	1,491	85,198
1965	84	19	0,257	3,89	1,215	0,497	80,92	1,409	83,898
1918	81,6	20	0,270	3,70	1,155	0,450	79,97	1,258	81,498
1936	79,4	21	0,284	3,52	1,097	0,406	79,05	1,119	79,298
1947	78,3	22	0,297	3,36	1,042	0,362	78,17	1,050	78,198
1981	76	23	0,311	3,22	0,988	0,321	77,32	0,905	75,898
1922	76	24	0,324	3,08	0,936	0,280	76,50	0,905	75,898
1923	74,1	25	0,338	2,96	0,886	0,241	75,71	0,785	73,998
1939	74	26	0,351	2,85	0,837	0,203	74,93	0,779	73,898
1954	72,6	27	0,365	2,74	0,790	0,166	74,18	0,690	72,498
1970	70,6	28	0,378	2,64	0,744	0,130	73,44	0,564	70,498
1951	70,6	29	0,392	2,55	0,698	0,095	72,73	0,564	70,498
1957	70,3	30	0,405	2,47	0,654	0,060	72,03	0,545	70,198

1950	70,2	31	0,419	2,39	0,611	0,026	71,34	0,539	70,098
1941	70,2	32	0,432	2,31	0,568	-0,007	70,67	0,539	70,098
1980	70	33	0,446	2,24	0,527	-0,039	70,01	0,526	69,898
1935	69,7	34	0,459	2,18	0,486	-0,071	69,36	0,507	69,598
1978	69,1	35	0,473	2,11	0,446	-0,103	68,72	0,470	68,998
1926	69	36	0,486	2,06	0,406	-0,134	68,09	0,463	68,898
1916	66,5	37	0,500	2,00	0,367	-0,164	67,47	0,306	66,398
1928	66,3	38	0,514	1,95	0,328	-0,194	66,85	0,293	66,198
1925	66,3	39	0,527	1,90	0,289	-0,224	66,24	0,293	66,198
1929	65	40	0,541	1,85	0,251	-0,254	65,64	0,211	64,898
1911	64,5	41	0,554	1,80	0,214	-0,283	65,04	0,180	64,398
1955	63,3	42	0,568	1,76	0,176	-0,313	64,45	0,104	63,198
1949	63	43	0,581	1,72	0,139	-0,341	63,86	0,085	62,898
1932	63	44	0,595	1,68	0,102	-0,370	63,27	0,085	62,898
1942	62,4	45	0,608	1,64	0,065	-0,399	62,69	0,047	62,298
1967	62	46	0,622	1,61	0,029	-0,428	62,11	0,022	61,898
1931	61,8	47	0,635	1,57	-0,008	-0,456	61,52	0,009	61,698
1963	61,3	48	0,649	1,54	-0,045	-0,485	60,94	-0,022	61,198
1945	61,3	49	0,662	1,51	-0,082	-0,514	60,36	-0,022	61,198
1933	59,6	50	0,676	1,48	-0,119	-0,543	59,77	-0,129	59,498
1969	59,2	51	0,689	1,45	-0,156	-0,571	59,18	-0,155	59,098
1915	59	52	0,703	1,42	-0,193	-0,601	58,59	-0,167	58,898
1952	58,5	53	0,716	1,40	-0,231	-0,630	57,99	-0,199	58,398
1962	58,3	54	0,730	1,37	-0,269	-0,660	57,39	-0,211	58,198
1982	58	55	0,743	1,35	-0,307	-0,690	56,78	-0,230	57,898
1934	56,2	56	0,757	1,32	-0,346	-0,720	56,16	-0,344	56,098
1913	54,8	57	0,770	1,30	-0,386	-0,751	55,53	-0,432	54,698
1920	54	58	0,784	1,28	-0,426	-0,782	54,89	-0,483	53,898
1948	52,6	59	0,797	1,25	-0,468	-0,815	54,24	-0,571	52,498
1960	52,3	60	0,811	1,23	-0,510	-0,848	53,57	-0,590	52,198
1944	52	61	0,824	1,21	-0,553	-0,881	52,88	-0,609	51,898
1973	51	62	0,838	1,19	-0,598	-0,917	52,16	-0,672	50,898
1940	49,9	63	0,851	1,17	-0,645	-0,953	51,42	-0,741	49,798
1937	49,8	64	0,865	1,16	-0,694	-0,991	50,65	-0,747	49,698
1961	49,7	65	0,878	1,14	-0,745	-1,031	49,84	-0,754	49,598
1921	47,1	66	0,892	1,12	-0,800	-1,073	48,97	-0,918	46,998
1983	45	67	0,905	1,10	-0,858	-1,119	48,05	-1,050	44,898
1943	45	68	0,919	1,09	-0,921	-1,168	47,05	-1,050	44,898
1930	44,5	69	0,932	1,07	-0,991	-1,223	45,93	-1,082	44,398
1927	40	70	0,946	1,06	-1,071	-1,285	44,67	-1,365	39,898

1919	40	71	0,959	1,04	-1,165	-1,358	43,18	-1,365	39,898
1924	35,2	72	0,973	1,03	-1,284	-1,451	41,29	-1,668	35,098
1917	35	73	0,986	1,01	-1,460	-1,588	38,51	-1,681	34,898

Fonte: O autor (2023)

Tabela 34 - Média e desvio padrão - série AESA

Média (μ)	93,58
Desvio Padrão (σ)	34,65

Fonte: O autor (2023)

Tabela 35 - Distribuição de Gumbel - série AESA

Ano	P _{máx}	Ordem	P	TR	y _{obs}	k _t	P _{obs}	y _{teórica}	P _{teórico}
2004	223	1	0,033	30,00	3,384	2,189	169,43	5,367	222,827
2000	138,4	2	0,067	15,00	2,674	1,635	150,23	2,236	138,227
2007	123	3	0,100	10,00	2,250	1,305	138,79	1,666	122,827
2010	120,4	4	0,133	7,50	1,944	1,066	130,51	1,570	120,227
1995	118,4	5	0,167	6,00	1,702	0,877	123,97	1,496	118,227
2006	112	6	0,200	5,00	1,500	0,720	118,51	1,259	111,827
2014	109	7	0,233	4,29	1,325	0,583	113,79	1,148	108,827
2020	107,8	8	0,267	3,75	1,171	0,463	109,61	1,104	107,627
2008	105	9	0,300	3,33	1,031	0,354	105,84	1,000	104,827
2009	102	10	0,333	3,00	0,903	0,254	102,37	0,889	101,827
2021	100,9	11	0,367	2,73	0,784	0,161	99,15	0,848	100,727
2011	100,8	12	0,400	2,50	0,672	0,074	96,13	0,845	100,627
1996	100,2	13	0,433	2,31	0,566	-0,009	93,27	0,822	100,027
2016	96,8	14	0,467	2,14	0,464	-0,088	90,53	0,696	96,627
2002	95,4	15	0,500	2,00	0,367	-0,164	87,88	0,645	95,227
2013	86,3	16	0,533	1,88	0,272	-0,238	85,32	0,308	86,127
1997	86	17	0,567	1,76	0,179	-0,311	82,81	0,297	85,827
1998	85	18	0,600	1,67	0,087	-0,382	80,34	0,260	84,827
2017	82,7	19	0,633	1,58	-0,003	-0,453	77,89	0,175	82,527
2005	74,8	20	0,667	1,50	-0,094	-0,523	75,44	-0,118	74,627
2015	74,1	21	0,700	1,43	-0,186	-0,595	72,97	-0,144	73,927
2003	74	22	0,733	1,36	-0,279	-0,668	70,44	-0,147	73,827
1999	70	23	0,767	1,30	-0,375	-0,743	67,84	-0,295	69,827
2022	65,5	24	0,800	1,25	-0,476	-0,821	65,12	-0,462	65,327
2019	63,7	25	0,833	1,20	-0,583	-0,905	62,22	-0,529	63,527
1994	57	26	0,867	1,15	-0,701	-0,996	59,05	-0,776	56,827
2001	51,2	27	0,900	1,11	-0,834	-1,100	55,45	-0,991	51,027
2018	49,8	28	0,933	1,07	-0,996	-1,227	51,06	-1,043	49,627

2012	40,5	29	0,967	1,03	-1,224	-1,404	44,90	-1,387	40,327
-------------	------	----	-------	------	--------	--------	-------	--------	--------

Fonte: O autor (2023)

APÊNDICE B – MEMÓRIA DE CÁLCULO DA DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DE CHUVAS INTENSAS

Tabela 36 - Distribuição Temporal da chuva - série ANA

t - min	100	75	50	25	10	5	3,33	2,5	2	1,67	1,43	1,25	1,11
5	4,1	3,9	3,6	3,2	2,8	2,5	2,3	2,2	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9
15	6,0	5,7	5,4	4,8	4,1	3,6	3,4	3,2	3,1	3,0	2,9	2,9	2,8
25	11,2	10,7	10,0	8,9	7,6	6,7	6,3	6,0	5,8	5,6	5,4	5,3	5,2
35	18,9	18,0	16,8	14,9	12,7	11,3	10,6	10,1	9,7	9,4	9,2	8,9	8,8
45	16,7	15,9	14,8	13,2	11,3	10,0	9,4	8,9	8,6	8,3	8,1	7,9	7,8
55	7,9	7,5	7,0	6,2	5,3	4,7	4,4	4,2	4,0	3,9	3,8	3,7	3,7
65	4,9	4,6	4,3	3,9	3,3	2,9	2,7	2,6	2,5	2,4	2,4	2,3	2,3

Fonte: O autor (2023)

Tabela 37 - Distribuição Temporal da chuva - série ANA

t (min)	100	75	50	25	10	5	3,33	2,5	2	1,67	1,43	1,25	1,11
5	6,2	5,9	5,4	4,7	3,9	3,4	3,1	2,9	2,8	2,7	2,6	2,6	2,5
15	9,2	8,7	8,0	6,9	5,7	5,0	4,6	4,3	4,1	4,0	3,9	3,7	3,7
25	17,1	16,1	14,8	12,9	10,7	9,3	8,5	8,0	7,7	7,4	7,2	7,0	6,8
35	28,7	27,1	24,9	21,6	18,0	15,6	14,3	13,5	12,9	12,5	12,1	11,7	11,5
45	25,4	24,0	22,1	19,2	15,9	13,8	12,7	12,0	11,4	11,0	10,7	10,4	10,1
55	12,0	11,3	10,4	9,0	7,5	6,5	6,0	5,6	5,4	5,2	5,0	4,9	4,8
65	7,4	7,0	6,4	5,6	4,6	4,0	3,7	3,5	3,3	3,2	3,1	3,0	3,0

Fonte: O autor (2023)

APÊNDICE C – MEMÓRIA DE CÁLCULO DA GERAÇÃO DE HIDROGRAMAS PELO MÉTODO SANTA BÁRBARA

Tabela 38 - Valores de vazão - série ANA

t (min)	100	75	50	25	10	5	3,33	2,5	2	1,67	1,43	1,25	1,11
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1,1	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5
15	3,0	2,9	2,7	2,4	2,0	1,8	1,7	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
25	5,8	5,5	5,0	4,4	3,6	3,2	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,4
35	12,7	11,9	10,8	9,2	7,5	6,4	5,8	5,5	5,2	5,0	4,8	4,7	4,6
45	22,0	20,6	18,8	16,0	13,0	11,0	10,0	9,4	8,9	8,5	8,2	8,0	7,7
55	28,2	26,4	24,1	20,6	16,7	14,2	12,9	12,1	11,5	11,0	10,6	10,3	10,0
65	30,3	28,4	26,0	22,3	18,1	15,4	14,0	13,1	12,4	11,9	11,5	11,1	10,8
75	28,0	26,3	24,1	20,6	16,7	14,3	13,0	12,1	11,5	11,0	10,6	10,3	10,0
85	26,0	24,4	22,3	19,1	15,5	13,2	12,0	11,2	10,7	10,2	9,9	9,5	9,3
95	24,0	22,6	20,6	17,7	14,3	12,2	11,1	10,4	9,9	9,5	9,1	8,8	8,6
105	22,3	20,9	19,1	16,4	13,3	11,3	10,3	9,6	9,1	8,8	8,4	8,2	8,0
115	20,6	19,4	17,7	15,1	12,3	10,5	9,5	8,9	8,5	8,1	7,8	7,6	7,4
125	19,1	17,9	16,4	14,0	11,4	9,7	8,8	8,3	7,8	7,5	7,2	7,0	6,8
135	17,7	16,6	15,2	13,0	10,5	9,0	8,2	7,6	7,3	7,0	6,7	6,5	6,3
145	16,4	15,4	14,0	12,0	9,8	8,3	7,6	7,1	6,7	6,4	6,2	6,0	5,8
155	15,2	14,2	13,0	11,1	9,0	7,7	7,0	6,6	6,2	6,0	5,7	5,6	5,4
165	14,0	13,2	12,0	10,3	8,4	7,1	6,5	6,1	5,8	5,5	5,3	5,2	5,0

175	13,0	12,2	11,1	9,5	7,8	6,6	6,0	5,6	5,3	5,1	4,9	4,8	4,6
185	12,0	11,3	10,3	8,8	7,2	6,1	5,6	5,2	4,9	4,7	4,6	4,4	4,3
195	11,1	10,5	9,6	8,2	6,6	5,7	5,2	4,8	4,6	4,4	4,2	4,1	4,0
205	10,3	9,7	8,9	7,6	6,2	5,2	4,8	4,5	4,2	4,1	3,9	3,8	3,7
215	9,5	9,0	8,2	7,0	5,7	4,9	4,4	4,1	3,9	3,8	3,6	3,5	3,4
225	8,8	8,3	7,6	6,5	5,3	4,5	4,1	3,8	3,6	3,5	3,4	3,2	3,2
235	8,2	7,7	7,0	6,0	4,9	4,2	3,8	3,5	3,4	3,2	3,1	3,0	2,9
245	7,6	7,1	6,5	5,6	4,5	3,9	3,5	3,3	3,1	3,0	2,9	2,8	2,7
255	7,0	6,6	6,0	5,2	4,2	3,6	3,2	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5
265	6,5	6,1	5,6	4,8	3,9	3,3	3,0	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3
275	6,0	5,6	5,2	4,4	3,6	3,1	2,8	2,6	2,5	2,4	2,3	2,2	2,2
285	5,6	5,2	4,8	4,1	3,3	2,8	2,6	2,4	2,3	2,2	2,1	2,0	2,0
295	5,2	4,8	4,4	3,8	3,1	2,6	2,4	2,2	2,1	2,0	2,0	1,9	1,8
305	4,8	4,5	4,1	3,5	2,9	2,4	2,2	2,1	2,0	1,9	1,8	1,8	1,7
315	4,4	4,2	3,8	3,3	2,6	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6
325	4,1	3,8	3,5	3,0	2,4	2,1	1,9	1,8	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5
335	3,8	3,6	3,3	2,8	2,3	1,9	1,8	1,6	1,6	1,5	1,4	1,4	1,4
345	3,5	3,3	3,0	2,6	2,1	1,8	1,6	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3
355	3,3	3,1	2,8	2,4	1,9	1,7	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2
365	3,0	2,8	2,6	2,2	1,8	1,5	1,4	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1
375	2,8	2,6	2,4	2,0	1,7	1,4	1,3	1,2	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0
385	2,6	2,4	2,2	1,9	1,5	1,3	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9

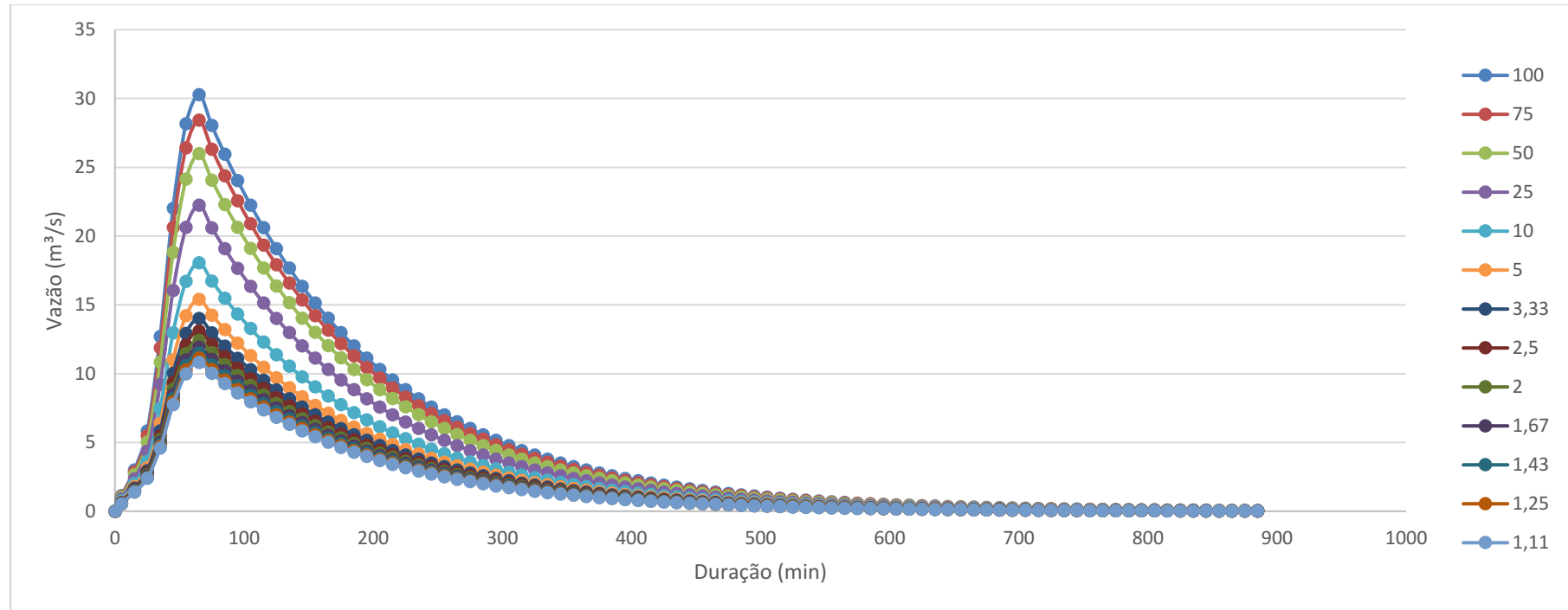
395	2,4	2,2	2,1	1,8	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9
405	2,2	2,1	1,9	1,6	1,3	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8
415	2,0	1,9	1,8	1,5	1,2	1,0	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7
425	1,9	1,8	1,6	1,4	1,1	1,0	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7
435	1,8	1,6	1,5	1,3	1,0	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6
445	1,6	1,5	1,4	1,2	1,0	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6
455	1,5	1,4	1,3	1,1	0,9	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
465	1,4	1,3	1,2	1,0	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5
475	1,3	1,2	1,1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
485	1,2	1,1	1,0	0,9	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4
495	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4
505	1,0	1,0	0,9	0,8	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
515	0,9	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3
525	0,9	0,8	0,8	0,6	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3
535	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
545	0,8	0,7	0,6	0,6	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
555	0,7	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2
565	0,6	0,6	0,6	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
575	0,6	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
585	0,6	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
595	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
605	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

615	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
625	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1
635	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
645	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
655	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
665	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
675	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
685	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
695	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
705	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
715	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
725	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
735	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
745	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
755	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
765	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
775	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
785	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
795	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
805	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
815	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
825	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

835	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
845	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
855	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
865	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
875	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
885	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: O autor (2023)

Figura 30 - Hidrogramas de projeto - série ANA



Fonte: O autor (2023)

Tabela 39 – Valores de vazões - séries AESA

t (min)	100	75	50	25	10	5	3,33	2,5	2	1,67	1,43	1,25	1,11
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1,7	1,6	1,5	1,3	1,1	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7
15	4,8	4,5	4,1	3,5	2,9	2,5	2,3	2,1	2,1	2,0	1,9	1,9	1,8
25	10,1	9,3	8,4	7,0	5,5	4,6	4,2	3,9	3,7	3,5	3,4	3,3	3,2

35	22,3	20,6	18,5	15,3	11,9	9,8	8,8	8,1	7,6	7,3	7,0	6,7	6,5
45	38,0	35,3	31,7	26,4	20,6	17,1	15,2	14,1	13,2	12,6	12,0	11,6	11,2
55	48,0	44,6	40,2	33,6	26,4	21,9	19,6	18,1	17,0	16,2	15,5	14,9	14,5
65	51,2	47,7	43,1	36,1	28,4	23,6	21,2	19,6	18,4	17,5	16,8	16,2	15,6
75	47,4	44,1	39,9	33,4	26,3	21,9	19,6	18,1	17,0	16,2	15,5	15,0	14,5
85	43,9	40,9	36,9	30,9	24,4	20,2	18,1	16,8	15,8	15,0	14,4	13,9	13,4
95	40,7	37,9	34,2	28,6	22,6	18,7	16,8	15,5	14,6	13,9	13,3	12,8	12,4
105	37,7	35,0	31,6	26,5	20,9	17,4	15,6	14,4	13,5	12,9	12,3	11,9	11,5
115	34,9	32,5	29,3	24,6	19,3	16,1	14,4	13,3	12,5	11,9	11,4	11,0	10,6
125	32,3	30,0	27,1	22,7	17,9	14,9	13,3	12,3	11,6	11,0	10,6	10,2	9,9
135	29,9	27,8	25,1	21,1	16,6	13,8	12,3	11,4	10,7	10,2	9,8	9,4	9,1
145	27,7	25,8	23,3	19,5	15,3	12,8	11,4	10,6	9,9	9,5	9,1	8,7	8,5
155	25,6	23,9	21,5	18,0	14,2	11,8	10,6	9,8	9,2	8,8	8,4	8,1	7,8
165	23,7	22,1	19,9	16,7	13,2	10,9	9,8	9,1	8,5	8,1	7,8	7,5	7,2
175	22,0	20,4	18,5	15,5	12,2	10,1	9,1	8,4	7,9	7,5	7,2	6,9	6,7
185	20,3	18,9	17,1	14,3	11,3	9,4	8,4	7,8	7,3	7,0	6,7	6,4	6,2
195	18,8	17,5	15,8	13,3	10,4	8,7	7,8	7,2	6,8	6,4	6,2	5,9	5,8
205	17,4	16,2	14,7	12,3	9,7	8,0	7,2	6,7	6,3	6,0	5,7	5,5	5,3
215	16,1	15,0	13,6	11,4	9,0	7,4	6,7	6,2	5,8	5,5	5,3	5,1	4,9
225	15,0	13,9	12,6	10,5	8,3	6,9	6,2	5,7	5,4	5,1	4,9	4,7	4,6
235	13,8	12,9	11,6	9,8	7,7	6,4	5,7	5,3	5,0	4,7	4,5	4,4	4,2
245	12,8	11,9	10,8	9,0	7,1	5,9	5,3	4,9	4,6	4,4	4,2	4,0	3,9

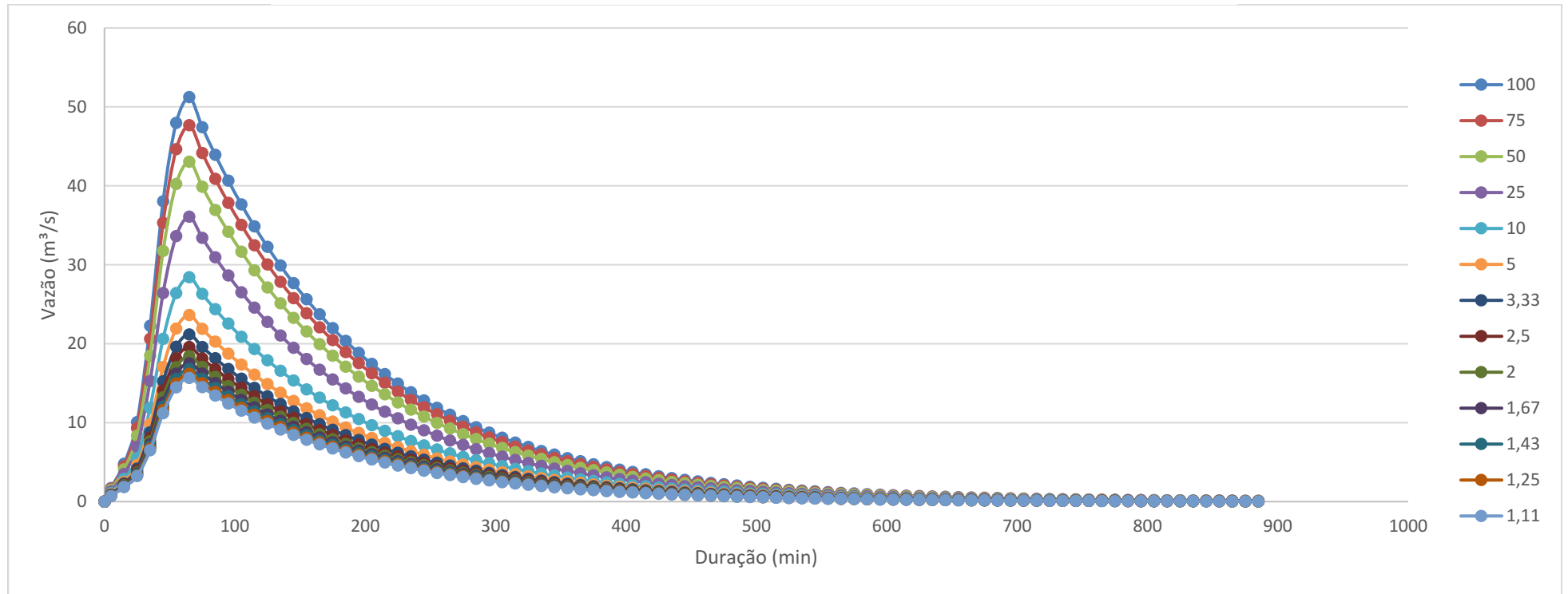
255	11,9	11,0	10,0	8,4	6,6	5,5	4,9	4,5	4,3	4,1	3,9	3,7	3,6
265	11,0	10,2	9,2	7,7	6,1	5,1	4,5	4,2	4,0	3,8	3,6	3,5	3,4
275	10,2	9,5	8,6	7,2	5,6	4,7	4,2	3,9	3,7	3,5	3,3	3,2	3,1
285	9,4	8,8	7,9	6,6	5,2	4,3	3,9	3,6	3,4	3,2	3,1	3,0	2,9
295	8,7	8,1	7,3	6,1	4,8	4,0	3,6	3,3	3,1	3,0	2,9	2,8	2,7
305	8,1	7,5	6,8	5,7	4,5	3,7	3,3	3,1	2,9	2,8	2,6	2,6	2,5
315	7,5	7,0	6,3	5,3	4,1	3,4	3,1	2,9	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3
325	6,9	6,4	5,8	4,9	3,8	3,2	2,9	2,6	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1
335	6,4	6,0	5,4	4,5	3,6	3,0	2,6	2,5	2,3	2,2	2,1	2,0	2,0
345	5,9	5,5	5,0	4,2	3,3	2,7	2,5	2,3	2,1	2,0	1,9	1,9	1,8
355	5,5	5,1	4,6	3,9	3,0	2,5	2,3	2,1	2,0	1,9	1,8	1,7	1,7
365	5,1	4,7	4,3	3,6	2,8	2,3	2,1	1,9	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6
375	4,7	4,4	4,0	3,3	2,6	2,2	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,5	1,4
385	4,4	4,1	3,7	3,1	2,4	2,0	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,4	1,3
395	4,0	3,8	3,4	2,8	2,2	1,9	1,7	1,5	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2
405	3,7	3,5	3,1	2,6	2,1	1,7	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1
415	3,5	3,2	2,9	2,4	1,9	1,6	1,4	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1
425	3,2	3,0	2,7	2,3	1,8	1,5	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0
435	3,0	2,8	2,5	2,1	1,6	1,4	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9
445	2,8	2,6	2,3	1,9	1,5	1,3	1,1	1,1	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8
455	2,5	2,4	2,1	1,8	1,4	1,2	1,1	1,0	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8
465	2,4	2,2	2,0	1,7	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7

475	2,2	2,0	1,8	1,5	1,2	1,0	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7
485	2,0	1,9	1,7	1,4	1,1	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6
495	1,9	1,7	1,6	1,3	1,0	0,9	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6
505	1,7	1,6	1,5	1,2	1,0	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5
515	1,6	1,5	1,3	1,1	0,9	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5
525	1,5	1,4	1,2	1,0	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
535	1,4	1,3	1,2	1,0	0,8	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4
545	1,3	1,2	1,1	0,9	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4
555	1,2	1,1	1,0	0,8	0,7	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
565	1,1	1,0	0,9	0,8	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3
575	1,0	0,9	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3
585	0,9	0,9	0,8	0,7	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
595	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
605	0,8	0,7	0,7	0,6	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2
615	0,7	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
625	0,7	0,6	0,6	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
635	0,6	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
645	0,6	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
655	0,5	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
665	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
675	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1
685	0,4	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1

695	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
705	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
715	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
725	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
735	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
745	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
755	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
765	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
775	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
785	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
795	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
805	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
815	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
825	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
835	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
845	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
855	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
865	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
875	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
885	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: O autor (2023)

Figura 31 - Hidrogramas de Santa Bárbara - série AESA



Fonte: O autor (2023)