



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

JOSÉ MATHEUS ROCHA DA SILVA

ANÁLISE DE FREQUÊNCIA: COTAS E VAZÕES DO RIO SOLIMÕES, MÁXIMAS E
MÍNIMAS, NA ESTAÇÃO 14100000 - MANACAPURU

Manaus - AM
2023

JOSÉ MATHEUS ROCHA DA SILVA

ANÁLISE DE FREQUÊNCIA: COTAS E VAZÕES DO RIO SOLIMÕES, MÁXIMAS E
MÍNIMAS, NA ESTAÇÃO 14100000 - MANACAPURU

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil, da UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS, como requisito parcial para a Obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Me. Elias Simão Assayag

Manaus - AM
2023

JOSÉ MATHEUS ROCHA DA SILVA

ANÁLISE DE FREQUÊNCIA: COTAS E VAZÕES DO RIO SOLIMÕES, MÁXIMAS E
MÍNIMAS, NA ESTAÇÃO 14100000 - MANACAPURU

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil, da UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS, como requisito parcial para a Obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil

Manaus - AM, __ de _____ de ____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Elias Simão Assayag - UFAM
Orientador

Prof. Me. Paulo Rodrigues de Souza - UFAM
Avaliador

Prof. Me. Matheus de Oliveira Dutra - UFAM
Avaliador

Dedico este trabalho à Deus e a todos que sempre me incentivaram, sem exceções.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus primeiramente, por iluminar meu caminho e me sustentar em meio a tantos obstáculos até aqui. Agradeço à minha família pelo apoio incondicional, em especial aos meus pais José Rosário e Maria Eliane, que sempre me incentivaram e não mediram esforços para que eu pudesse me dedicar aos estudos na maior parte do meu tempo, agradeço também pelo carinho e pelos seus conselhos tão valiosos, estendo estes agradecimento também à minha irmã Deborah por me acolher e ajudar de diversas maneiras por variadas vezes. Agradeço também à Ana Anjos por toda sua ternura, ajuda, acolhimento e compreensão nesta minha etapa final da graduação, seus incentivos foram de extrema importância. Aos meus amigos de vida da "iniciativa evere", pelos incontáveis momentos de alegria e distração, com os quais tornaram a minha vida muito mais leve e alegre. Aos meus colegas de graduação pelo companheirismo e por todos os momentos de aprendizado compartilhado, que contribuíram de alguma forma para a minha graduação. Aos engenheiros civis Francis Trindade e Michelle Trindade que além de grandes amigos, foram também grandes incentivadores de minha formação acadêmica e espiritual desde que eu ainda estava na catequese e me tornei grande amigo de seu filho.

Agradeço ao professor, mestre e orientador Elias Simão Assayag, por toda a contribuição científica que me foi concedida, por todos os ensinamentos e conselhos, pelas oportunidades disponibilizadas durante a graduação e pela confiança em minha pessoas durante projetos e monitoria. Estendo estes agradecimentos aos demais professores da graduação e do Departamento de Engenharia Civil, através do qual pude aprender as premissas desta tão linda e importante profissão.

Por fim, agradeço aos membros da banca, o Prof.º Me. Paulo Souza e o Prof.º Me. Matheus Dutra pela disposição e por aceitarem o convite do TCC.

"Preocupado com uma única folha, você não verá a árvore. Preocupado com uma única árvore você não perceberá toda a floresta." (Takehiko Inoue)

"Milagres só acontecem com as pessoas que não desistem." (Emporio Ivankov)

RESUMO

A Amazônia se destaca não apenas pelo seu vasto e diversificado bioma, mas também pela sua complexa hidrografia. A região amazônica é caracterizada por sua pluviosidade intensa e sazonal, com chuvas frequentes e regimes de cheias e secas bem definidos. O rio principal é o Amazonas. O trecho superior do rio Amazonas recebe o nome de rio Solimões. A análise de frequência é uma ferramenta fundamental dentro da hidrologia estatística, que visa estudar a probabilidade de ocorrência de eventos hidrológicos extremos, como as cotas e as vazões máximas e mínimas. No caso do Rio Solimões, a análise de frequência é a base para gestão dos eventos extremos, como na estimativa do risco hidrológico de cheias e secas e no planejamento de infraestruturas e medidas de adaptação às mudanças climáticas. Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) tem como objetivo estudar e analisar as frequências de cotas máximas e cotas mínimas, vazões máximas e vazões mínimas do Rio Solimões na estação fluviométrica 14100000 - Manacapuru, organizando os dados hidrológicos disponíveis, aplicando métodos estatísticos, para, por fim, obter as análises. Os objetivos específicos do estudo incluem a aquisição dos dados fluviométricos, a elaboração das séries históricas de cotas e vazões máximas e mínimas, o teste do ajuste das séries às Funções de Distribuição de Probabilidade e a implementação da análise de frequência para as cotas e vazões máximas e mínimas prováveis. Os resultados da pesquisa oferecem aos profissionais de recursos hídricos uma ferramenta valiosa para determinar o período de retorno e o risco associado às cotas medidas no local. Por exemplo, no período de estiagem de 2023, a cota do Rio Solimões foi registrada em 3,61 metros, ultrapassando a mínima histórica de 2010, que foi de 3,92 metros. Com base nos resultados da análise de frequência, estima-se que o tempo de retorno para essa cota seja de aproximadamente 268 anos. Devido à constante evolução das séries históricas de dados, é essencial atualizar a análise de frequência regularmente, o que indica tendências no regime hidrológico dos rios. Concluindo, o estudo alcançou plenamente seu objetivo proposto, fornecendo uma base sólida de informações e ferramentas para a gestão dos recursos hídricos na região, considerando a complexa hidrografia e a importância do Rio Solimões.

Palavras-chave: Rio Solimões; hidrologia; estatística; análise de frequência.

ABSTRACT

The Amazon stands out not only for its vast and diverse biome, but also for its complex hydrography. The Amazon region is characterized by its intense and seasonal rainfall, with frequent rains and well-defined flood and drought regimes. The main river is the Amazon. The upper stretch of the Amazon River is called the Solimões River. Frequency analysis is a fundamental tool within statistical hydrology, which aims to study the probability of occurrence of extreme hydrological events, such as maximum and minimum flows. In the case of the Solimões River, frequency analysis is the basis for managing extreme events, such as estimating the hydrological risk of floods and droughts and planning infrastructure and measures to adapt to climate change. The aim of this Final Paper is to study and analyse the frequencies of maximum and minimum levels, maximum flows and minimum flows of the Solimões River at the fluviometric station 14100000 - Manacapuru, organizing the available hydrological data, applying statistical methods, and finally obtaining the analyses. The specific objectives of the study include acquiring the fluviometric data, preparing the historical series of maximum and minimum flows, testing the fit of the series to the Probability Distribution Functions and implementing the frequency analysis for the maximum and minimum probable flows. The results of the survey offer water resources professionals a valuable tool for determining the return period and the risk associated with the levels measured on site. For example, in the dry season of 2023, the Solimões River's level was recorded at 3.61 meters, surpassing the historic low of 2010, which was 3.92 meters. Based on the results of the frequency analysis, it is estimated that the return time for this level is approximately 268 years. Due to the constant evolution of the historical data series, it is essential to update the frequency analysis regularly, which indicates trends in the hydrological regime of the rivers. In conclusion, the study fully achieved its proposed objective, providing a solid base of information and tools for managing water resources in the region, considering the complex hydrography and importance of the Solimões River.

Keywords: Solimões river; hydrology; statistic; frequency analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	— Exemplo de Seção Transversal	22
Figura 2	— Exemplo perfil longitudinal de um rio	23
Figura 3	— Propriedades geométricas de um meandro	24
Figura 4	— Desenvolvimento de uma camada limite em um canal	25
Figura 5	— Isolinhas de velocidades na seção de Manacapuru	26
Figura 6	— Representação gráfica da solução das equações de Saint-Venant	34
Figura 7	— Perfil de superfície livre no instante t (Plano Z,x)	34
Figura 8	— Cotagrama em uma seção x (Plano Z,t)	35
Figura 9	— Ciclo Hidrológico	37
Figura 10	— Estação 14100000 - Manacapuru	38
Figura 11	— Régua Linimétrica	39
Figura 12	— Molinete Fluviométrico	42
Figura 13	— Vista dos três transdutores do ADP (esquerda) e dos quatro transdutores do ADCP (direita)	43
Figura 14	— Valores Críticos Para o Teste de Aderência de KS	47
Figura 15	— Representação Gráfica da Distribuição Normal	49
Figura 16	— Fluxograma da Metodologia	53
Figura 17	— Localização da Estação Fluviométrica 14100000 - Manacapuru	55
Figura 18	— Cotagrama Estação 14100000 - Manacapuru	56
Figura 19	— Médias mensais de precipitação e temperatura em Manacapuru	57
Figura 20	— Regime hidrológico do rio Solimões (1992-2019)	59
Figura 21	— Interface do Sítio HidroWeb para Acesso aos Dados de Séries Históricas	60
Figura 22	— Formulário para Pesquisa de dados hidrológicos	60
Figura 23	— Resultados da pesquisa no HidroWeb	61
Figura 24	— Cotas Máximas Anuais, estação 14100000 - Manacapuru	66
Figura 25	— Cotas Mínimas Anuais, estação 14100000 - Manacapuru	66
Figura 26	— Vazões Máximas Anuais, estação 14100000 - Manacapuru	67
Figura 27	— Vazões Mínimas Anuais, estação 14100000 - Manacapuru	67
Figura 28	— Coeficiente R-quadrado Cotas Máximas	68
Figura 29	— Coeficiente R-quadrado Cotas Mínimas	69
Figura 30	— Coeficiente R-quadrado Vazões Máximas	69
Figura 31	— Coeficiente R-quadrado Vazões Mínimas	70
Figura 32	— Tr x Cota Máxima Provável	71
Figura 33	— Tr x Cota Mínima Provável	72
Figura 34	— Tr x Vazão Máxima Provável	73
Figura 35	— Tr x Vazão Mínima Provável	75

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	—	.....	18
Equação 2	—	.....	19
Equação 3	—	.....	22
Equação 4	—	.....	23
Equação 5	—	.....	27
Equação 6	—	.....	28
Equação 7	—	.....	28
Equação 8	—	.....	30
Equação 9	—	.....	30
Equação 10	—	.....	30
Equação 11	—	.....	33
Equação 12	—	.....	45
Equação 13	—	.....	45
Equação 14	—	.....	45
Equação 15	—	.....	46
Equação 16	—	.....	46
Equação 17	—	.....	48
Equação 18	—	.....	48
Equação 19	—	.....	51

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 — Parâmetros Estatísticos: média e desvio padrão das cotas	65
Quadro 2 — Parâmetros Estatísticos: média e desvio padrão das vazões	65
Quadro 3 — Teste de Aderência de KS	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Características hidráulicas, hidroquímicas e sedimentológicas dos rios Solimões e Negro na altura do encontro das águas	58
Tabela 2 — Série Histórica das Cotas Máximas e Cotas Mínimas	62
Tabela 3 — Série Histórica das Vazões Máximas e Vazões Mínimas	63
Tabela 4 — Análise de Frequência - Cotas Máximas	70
Tabela 5 — Análise de Frequência - Cotas Mínimas	71
Tabela 6 — Análise de Frequência - Vazões Máximas	73
Tabela 7 — Análise de Frequência - Vazões Mínimas	74

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVO	16
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1	HIDROSTÁTICA	17
3.2	HIDRODINÂMICA E HIDROCINEMÁTICA	17
3.3	HIDRÁULICA FLUVIAL	19
3.3.1	Propriedades básicas dos Cursos D'água e dos Escoamentos Fluviais.	20
3.3.1.1	Propriedades Geométricas dos Cursos D'água	20
3.3.1.1.1	<i>Seção Transversal</i>	20
3.3.1.1.2	<i>Propriedades Longitudinais dos cursos d'água</i>	22
3.3.1.1.3	<i>Aspecto em Planta de Um Rio</i>	23
3.3.1.2	Distribuição de velocidades em uma seção transversal	24
3.3.2	Equações fundamentais da hidráulica fluvial	26
3.3.2.1	Equação de conservação de energia de Bernoulli	27
3.3.2.2	Equação da conservação de massa da continuidade	27
3.3.2.3	Equação dinâmica da quantidade de movimento	28
3.3.3	Resistência ao Escoamento e Perda de Carga em Rios	29
3.3.3.1	Fórmulas de perda de carga	29
3.3.3.1.1	<i>Fórmula de Chèzy</i>	29
3.3.3.1.2	<i>Fórmula de Manning</i>	30
3.3.3.2	Fatores que afetam o coeficiente de Manning	31
3.3.3.2.1	<i>Perdas de carga distribuída</i>	31
3.3.3.2.2	<i>Perdas de carga localizadas</i>	31
3.3.4	Escoamentos permanentes gradualmente variados	32
3.3.5	Escoamentos Não Permanentes Gradualmente Variados	33
3.4	HIDROMÉTRIA APLICADA EM ESCOAMENTO FLUVIAL: MEDIÇÕES DE COTAS (NÍVEL) E VAZÕES.	36
3.4.1	Ciclo Hidrológico	36
3.4.2	Estação Fluviométrica	38
3.4.3	Medição de Cota	38
3.4.4	Medição de Vazão	40
3.4.4.1	Medição de Vazão em Grandes Rios	42
3.5	ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DE MÁXIMAS E MÍNIMAS DO ESCOAMENTO FLUVIAL	44
3.5.1	Parâmetros Estatísticos de Séries Históricas	44

3.5.1.1	População e Amostra	44
3.5.1.2	Medidas de Tendência Central	45
3.5.1.3	Medidas de Dispersão	46
3.5.2	Teste de Hipótese de Kolmogorov-Smirnov	46
3.5.3	Período de Retorno	47
3.5.4	Função Densidade de Probabilidade da Distribuição Normal	48
3.5.5	Modelos Estocásticos	49
3.6	SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE RECURSOS HIDRÍCOS	50
3.7	RISCO HIDROLÓGICO	51
4	METODOLOGIA	52
5	RESULTADOS	55
5.1	LOCAL DO ESTUDO	55
5.2	CARACTERÍSTICAS FLUVIAIS E CLIMÁTICAS	56
5.3	REGIME DE ESCOAMENTO E SAZONALIDADE	58
5.4	DADOS ADQUIRIDOS	59
5.5	TRATAMENTO DE DADOS	61
5.5.1	Séries históricas	61
5.5.2	Média e desvio padrão	65
5.5.3	Teste de aderência à distribuição de probabilidade normal	67
5.6	ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DAS COTAS MÁXIMAS E RISCO HIDROLÓGICO	70
5.7	ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DAS COTAS MÍNIMAS E RISCO HIDROLÓGICO	71
5.8	ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DAS VAZÕES MÁXIMAS E RISCO HIDROLÓGICO	72
5.9	ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DAS VAZÕES MÍNIMAS E RISCO HIDROLÓGICO	74
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

A Amazônia se destaca não apenas pelo seu vasto e diversificado bioma, mas também pela sua complexa hidrografia. A região amazônica é caracterizada por sua pluviosidade intensa e sazonal, com chuvas frequentes e regimes de cheias e secas bem definidos. O rio principal é o Amazonas. O trecho superior do rio Amazonas recebe o nome de rio Solimões.

Segundo Nobre *et al.* (2009), a temperatura média não apresenta grande variação na maior parte da região, isto acontece devido a alta incidência de radiação solar ao longo do ano, juntamente com a intensa pluviosidade, traduz-se no clima predominantemente quente e úmido.

A variabilidade hidrológica exerce uma influência significativa sobre a ecologia, economia e qualidade de vida das comunidades que dependem das águas amazônicas. Nesse contexto, a análise estatística desempenha um papel fundamental ao permitir a compreensão do comportamento das cotas e vazões dos rios da bacia hidrográfica.

A análise de frequência é uma ferramenta fundamental dentro da hidrologia estatística, que visa estudar a probabilidade de ocorrência de eventos hidrológicos extremos, como as cotas e as vazões máximas e mínimas. No caso do Rio Solimões, a análise de frequência é a base para gestão dos eventos extremos, como na estimativa do risco hidrológico de cheias e secas e no planejamento de infraestruturas e medidas de adaptação às mudanças climáticas.

Segundo o IBGE (2022) o município de Manacapuru, situado na margem esquerda do rio Solimões, possui uma população de 101.883 habitantes. Sua localização faz de Manacapuru uma área relevante em termos de recursos hídricos, economia e biodiversidade. Além disso, a comunidade local depende fortemente do rio Solimões para atividades como pesca, transporte e agricultura.

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) tem como objetivo estudar e analisar as frequências de cotas máximas e cotas mínimas, vazões máximas e vazões mínimas do Rio Solimões na estação fluviométrica 14100000 - Manacapuru, organizando os dados hidrológicos disponíveis, aplicando métodos estatísticos, para, por fim, obter as análises.

São objetivos específicos do trabalho:

- Implementar a Análise de frequência para as cotas máximas prováveis e mínimas prováveis;
- Implementar a Análise de frequência para as vazões máximas prováveis e mínimas prováveis;

Este trabalho está dividido em cinco partes principais: Introdução, onde são

contextualizadas as informações para a composição de uma justificativa e apresentação dos objetivos. Após, segue-se a fundamentação teórica onde são expostas as informações necessárias para a aplicação das técnicas visando a obtenção dos resultados. Em seguida são apresentados os métodos empregados. Uma vez obtidos os resultados, esses são apresentados para livre utilização na gestão de recursos hídricos no local.

2 OBJETIVO

O objetivo da análise de frequência das variáveis hidrológicas do presente trabalho foi relacionar a magnitude dos eventos de cotas e vazões, máximas e mínimas, com as respectivas frequências de ocorrência por meio do uso de um modelo de distribuição de probabilidade e determinar de forma confiável o risco hidrológico e valores para eventos futuros, na seção do Rio Solimões onde se encontra instalada a estação 14100000 – Manacapuru.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 HIDROSTÁTICA

A hidrostática é um ramo fundamental da mecânica dos fluidos responsável por estudar os fluidos em repouso e as forças atuantes sobre ele. É um campo de estudo com extrema importância para a Engenharia Civil e para a Hidrologia.

A hidrostática baseia-se em um princípio central conhecido como princípio de Pascal que diz que “uma variação da pressão aplicada a um fluido incompressível contido em um recipiente é transmitida integralmente a todas as partes do fluido e às paredes do recipiente” (Halliday; Resnick; Walker, 2015, p. 64).

Pressão é uma grandeza fundamental no estudo da hidrostática e é definida como a razão entre a força aplicada perpendicularmente a uma superfície e a área dessa superfície. A unidade de pressão mais comum é o Pascal (Pa), equivalente a 1 N/m^2 (Newton por metro quadrado).

A lei que governa a variação de pressão com a profundidade, chamada de Lei fundamental da Hidrostática ou Lei de Kevin propõe que a pressão no interior de um fluido incompressível e estático aumenta de acordo com a profundidade. Assim “a diferença de pressão entre dois pontos quaisquer dum líquido em repouso apenas depende da diferença de cotas entre os pontos e do peso específico do líquido”(Lencastre, 1983, p. 94).

3.2 HIDRODINÂMICA E HIDROKINEMÁTICA

A hidrodinâmica estuda a dinâmica dos fluidos, na hidrodinâmica os fluidos estão submetidos a esforços, e quando esses esforços resultam em movimentos nos fluidos, estes são chamados hidrocinemáticos. A hidrocinemática concentra-se em estudar o movimento dos fluidos, particularmente em corpos d’água como rios e lagos, é uma área essencial para que se entenda os padrões de movimento das águas, assim como para que se possa analisar os fenômenos ocorridos em ambientes aquáticos tornando-se crucial para a hidrologia.

Quando um líquido escoar em contato com a atmosfera, é dito ser um escoamento com superfície livre, como acontece em canais, todavia, se o escoamento ocorre em um tubo fechado em que o fluido ocupa toda a seção do tubo, e em geral com pressões distintas da pressão atmosférica, chama-se escoamento forçado, é o caso de escoamento por meio de condutos.

Existem, portanto, dois regimes de escoamento do fluido: “Com o regime laminar, as trajetórias das partículas em movimento são bem definidas e não se

cruzam. O regime turbulento caracteriza-se pelo movimento desordenado das partículas” (Netto; Y Fernández, 2018, p. 60). A turbulência é causada basicamente pela viscosidade, dessarte, o número de Reynolds (Re) é utilizado como parâmetro, valores baixos significam regimes de escoamento laminar, e valores altos representam regimes de escoamento turbulento, há ainda na literatura o chamado regime de transição, que se situa justamente entre o laminar e o turbulento.

No estudo do movimento de fluidos consideramos como princípios fundamentais: o princípio da conservação de massa expresso por meio da equação da continuidade e o princípio da conservação de energia descrito por meio da Equação de Bernoulli.

A equação da continuidade descreve a propriedade da conservação de massa, significa que a massa que entra em um conduto, seja forçado ou livre, deve ser a mesma massa que sai, em outros termos, a equação da continuidade compara a vazão entre duas áreas de seções transversais, e de acordo com a equação, a vazão que passa em uma área é a mesma que passa na outra, sabendo que a vazão é igual a velocidade multiplicada pela área da seção transversal. A equação pode ser matematicamente expressa como:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad (1)$$

Onde:

A_1 é a área da seção transversal na posição inicial,

v_1 é a velocidade do fluido na posição inicial,

A_2 é a área da seção transversal na posição final,

v_2 é a velocidade do fluido na posição final.

Basicamente a equação “nos diz que a velocidade do escoamento aumenta quando a área da seção reta através da qual o fluido escoar é reduzida”(Halliday; Resnick; Walker, 2015, p. 71).

A equação de Bernoulli expressa a conservação de energia ao longo do escoamento de um fluido viscoso e incompressível, foi estabelecida por Daniel Bernoulli por meio de experimentos sobre escoamentos dos fluidos, a equação relaciona a pressão, a velocidade e a altura em pontos de uma linha de corrente, de acordo com a equação, a soma da pressão estática, da pressão dinâmica (associada à velocidade) e da energia potencial gravitacional por unidade de volume de fluido permanece constante ao longo de uma linha de corrente. A equação de Bernoulli é dada pela fórmula:

$$p + \frac{1}{2}\rho v + \rho gh = \text{constante} \quad (2)$$

Onde:

p é a pressão estática do fluido,

ρ é a densidade do fluido,

v é a velocidade do fluido em um ponto específico,

g é a aceleração da gravidade,

h é a altura potencial do fluido acima de um ponto de referência.

Resumidamente, em casos de fluidos incompressíveis em regime permanente, desprezando-se o atrito e as perdas de energia, a carga total de uma partícula é mantida ao longo da sua trajetória, logo, o teorema de Bernoulli “resulta diretamente do princípio da conservação de energia: se não há atritos, a partícula desloca-se sem perda de energia.”(Lencastre, 1983, p. 51). Dito isto, é perceptível que a equação de Bernoulli tem suas limitações inerentes ao escoamento de fluidos viscosos e compressíveis, sendo assim, outras equações mais complexas como a de Navier-Stokes são necessárias para uma análise mais assertiva.

3.3 HIDRÁULICA FLUVIAL

A hidráulica fluvial estuda o comportamento da água em sistemas fluviais, ou seja, em rios, córregos, riachos e outros cursos d'água naturais. Ela se concentra em analisar e compreender os processos hidrodinâmicos que ocorrem nesses ambientes, bem como a interação entre a água e o leito do curso d'água, as margens e a vegetação ribeirinha.

Os principais objetivos da hidráulica fluvial são o entendimento da dinâmica da água nesses sistemas e a avaliação de como as características do leito, como a geometria, a declividade e a rugosidade, afetam o comportamento do fluxo de água. Além disso, a hidráulica fluvial busca analisar os processos de transporte de sedimentos, a erosão e a sedimentação nos cursos d'água.

Na Engenharia Civil a análise da hidráulica fluvial é importante para diversos propósitos: projeto e dimensionamento de obras hidráulicas, como pontes, diques, barragens, canais, entre outros. Entender as características hidráulicas é crucial para garantir segurança e eficiência desse tipo de estrutura. Além disso, a hidráulica fluvial vem a ser ferramenta essencial “para os processos de decisão sobre a exploração racional dos benefícios potenciais dos rios, como aproveitamento energético, irrigação, navegação”(Silva; Mascarenhas; Miguez, 2003, p. 19) também tem papel no zoneamento das bacias e prevenção e segurança das populações

ribeirinhas em casos de inundações.

3.3.1 Propriedades básicas dos Cursos D'água e dos Escoamentos Fluviais.

Tratando-se de hidráulica fluvial, os rios e canais são cursos d'água por definição: "Um curso de água (curso d'água ou fluxo de água) é qualquer corpo de água fluente, como rios, córregos, riachos, regatos, ribeiros etc."(ANA, 2019).

Para adentrar no estudo da hidráulica fluvial, é importante conhecer as principais propriedades básicas que definem o comportamento dos sistemas aquáticos, já que essas propriedades desempenham papel importante na modelagem, planejamento e no manejo de cursos d'água, pois são influenciadores diretos em fatores que vão desde a erosão das margens até o transporte de sedimentos.

Uma das características dos cursos d'água naturais é sua forma geométrica que se apresenta de forma bastante irregular já que o curso d'água está sempre se adaptando à topografia da bacia local procurando a trajetória mais eficiente no sentido da conservação e menor gasto de energia:

As propriedades hidráulicas dos canais naturais são geralmente muito irregulares. Em alguns casos, suposições empíricas razoavelmente consistentes com observações e experiências reais podem ser feitas de modo que as condições de escoamento nesses canais se tornem passíveis de tratamento analítico da hidráulica teórica (Chow, 1959, p. 19).

Naturalmente os cursos tendem a um equilíbrio na sua forma em função de fatores feito as vazões impostas pelo processo chuva-vazão na bacia como também vazões vindas do próprio leito e a sensibilidade das margens aos processos naturais de erosão e deposição de sedimentos. "Esses fatores definem propriedades hidráulicas, modelam a calha em uma forma de equilíbrio mais ou menos estável e diz-se então que o rio se encontra "em regime"."(Silva; Mascarenhas; Miguez, 2003, p. 26).

3.3.1.1 Propriedades Geométricas dos Cursos D'água

3.3.1.1.1 Seção Transversal

A característica geométrica mais empregada como ponto de consulta de um curso fluvial é a sua seção transversal. A seção é adquirida pela interseção do leito do rio com um plano perpendicular à orientação predominante do fluxo d'água. Para caracterizar a seção transversal de um rio são usadas algumas propriedades geométricas, sendo as principais segundo Silva, Mascarenhas e Miguez (2003) :

Seção molhada: A área da seção molhada de um rio refere-se à parte transversal do leito do rio que está atualmente em contato com a água. Em outras palavras, é a região da seção transversal do rio que é inundada e coberta pela água em um determinado momento, a área desta seção é chamada de Área molhada (A).

Largura superficial (B): A largura superficial é a largura medida diretamente na superfície livre, normalmente de uma margem para outra. Geralmente essa medida é utilizada para calcular a área molhada já que existe certa dificuldade de representar a variação da largura com a profundidade por conta da irregularidade dos canais naturais.

Profundidade do escoamento (h): A profundidade do escoamento é a distância vertical do ponto mais baixo do leito do rio até a superfície livre. Quando essa medida é tomada perpendicular em relação ao escoamento, é chamada de profundidade da seção molhada. Em situações práticas, é comum usar uma profundidade média estabelecida como a média das profundidades em várias alturas na mesma seção, sempre em relação perpendicular ao leito.

Perímetro molhado (P): O perímetro molhado é a parte da área molhada que está em contato com o leito do rio, ou seja, é o perímetro da área molhada excetuando a superfície livre.

Raio hidráulico (R): O raio hidráulico é uma grandeza que apesar de não poder ser medido diretamente, é obtido através da relação entre a área molhada e o perímetro molhado, $R=A/P$, e tem extrema importância para o escoamento.

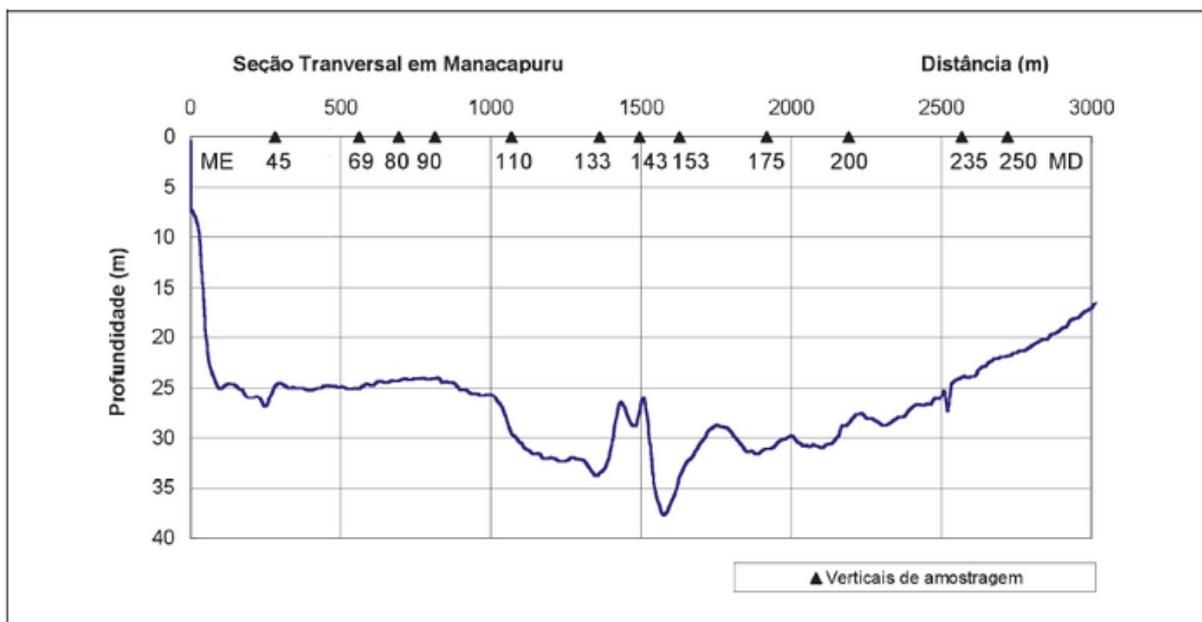
Seção equivalente: A seção equivalente é a seção geométrica conhecida, usada para representar a seção irregular, tal como a seção retangular, trapezoidal, triangular ou circular, a forma a ser usada dependerá de algumas características da seção irregular em estudo.

Cota do fundo ou do leito (z): A cota do fundo é a medida do ponto mais baixo ou de um ponto de referência a partir da base da seção com relação a uma referência de nível.

Cota da superfície livre, nível d'água ou cota fluviométrica (Z): A cota fluviométrica é a altura da superfície d'água medida a partir de um nível de referência. Equivale à soma da cota do fundo com a profundidade do escoamento em relação ao mesmo nível de referência: $Z=h+z$.

A figura 1 exemplifica uma seção transversal especificamente do Rio Solimões próximo ao município de Manacapuru, retirada de um artigo publicado no ano de 2001 na Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH).

Figura 1 — Exemplo de Seção Transversal



Fonte: Da Silva e Pecly (2001, p. 6).

3.3.1.1.2 Propriedades Longitudinais dos cursos d'água

As propriedades longitudinais desempenham um papel fundamental na forma como a água flui, transporta sedimentos, modifica a paisagem e interage com o ambiente circundante.

Considerando uma das hipóteses fundamentais utilizadas para as equações da Hidráulica Fluvial, que deriva da corroboração de que "as dimensões longitudinais das calhas dos rios são sempre preponderantes em relação às dimensões verticais e transversais" (Silva; Mascarenhas; Miguez, 2003, p. 33).

Considerando um corte longitudinal que atravessa o eixo do rio em um trecho retilíneo cuja largura é significativamente maior que a profundidade, admite-se que este plano resultante caracteriza o padrão de escoamento, podemos citar como principais propriedades de acordo com Silva, Mascarenhas e Miguez (2003):

Declividade do leito (S_0): É uma característica essencial para a descrição do perfil de um rio, por constituir a relação entre o desnível e o comprimento do rio em um trecho específico. Essa propriedade é estabelecida com base no ângulo θ resultante de um plano representando o leito do rio e um plano horizontal de referência.

$$S_0 = tg\theta = \frac{z_1 - z_2}{\Delta_x} \quad (3)$$

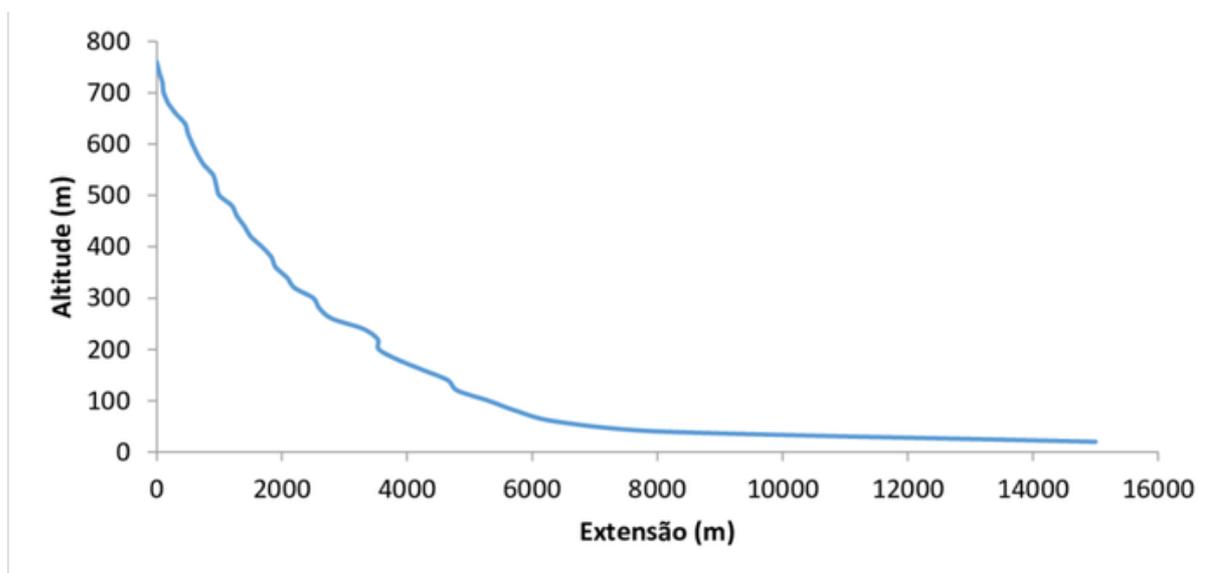
Apesar de um rio ter superfície irregular e também em virtude de os perfis

longitudinais dos rios modificarem no tempo, considera-se a hipótese do fundo fixo por questão de conveniência, o perfil do rio é ponderado e as declividades tomadas como constantes para cada trecho.

Declividade da linha d'água (S_w): Esta propriedade indica o perfil longitudinal da linha d'água, é o resultado da fração entre a diferença das cotas fluviométricas em duas seções subsequentes pela distância Δ_x entre as seções, sendo:

$$S_w = \frac{Z_1 - Z_2}{\Delta_x} \quad (4)$$

Figura 2 — Exemplo perfil longitudinal de um rio



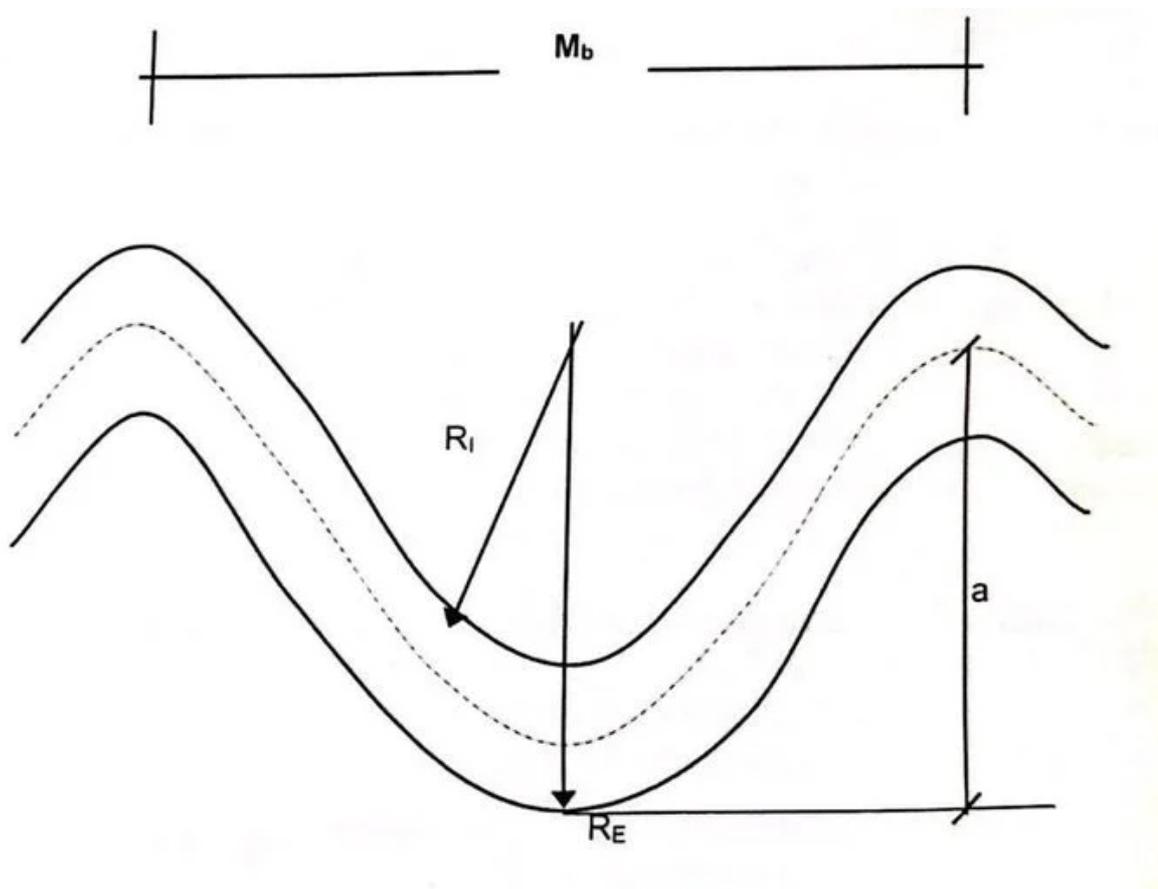
Fonte: Silva e Paes (2018).

3.3.1.1.3 Aspecto em Planta de Um Rio

O aspecto em planta dos rios, deve-se a relação do curso d'água com as vazões preponderantes e com o processo de erosão nas suas margens, normalmente nos trechos onde ocorrem depósitos de matéria, apresentam-se curvas subsequentes separadas por curtos trechos retilíneos. O trecho com duas curvaturas sucessivas e intercaladas é chamado de meandro. A Figura 3 exibe uma configuração de como os meandros são caracterizados, sendo os raios de curvatura interna e externa, R_i e R_e respectivamente, amplitude a e o comprimento de onda M_b para dois meandros alternados de acordo com Silva, Mascarenhas e Miguez (

2003).

Figura 3 — Propriedades geométricas de um meandro



Fonte: Silva, Mascarenhas e Miguez (2003, p. 36).

3.3.1.2 Distribuição de velocidades em uma seção transversal

A distribuição de velocidades em uma seção transversal de um rio refere-se à maneira como as velocidades da água variam em diferentes pontos dessa seção. Devido às características hidrodinâmicas e geométricas de um rio, a velocidade da água não é uniforme em toda a sua largura e profundidade.

Em uma seção transversal típica de um rio, a velocidade da água tende a ser mais alta no centro do rio (geralmente na parte mais profunda da seção molhada) e diminui em direção às margens e ao fundo. Isso ocorre porque a fricção com o leito e as paredes laterais do rio desacelera a água nessas regiões.

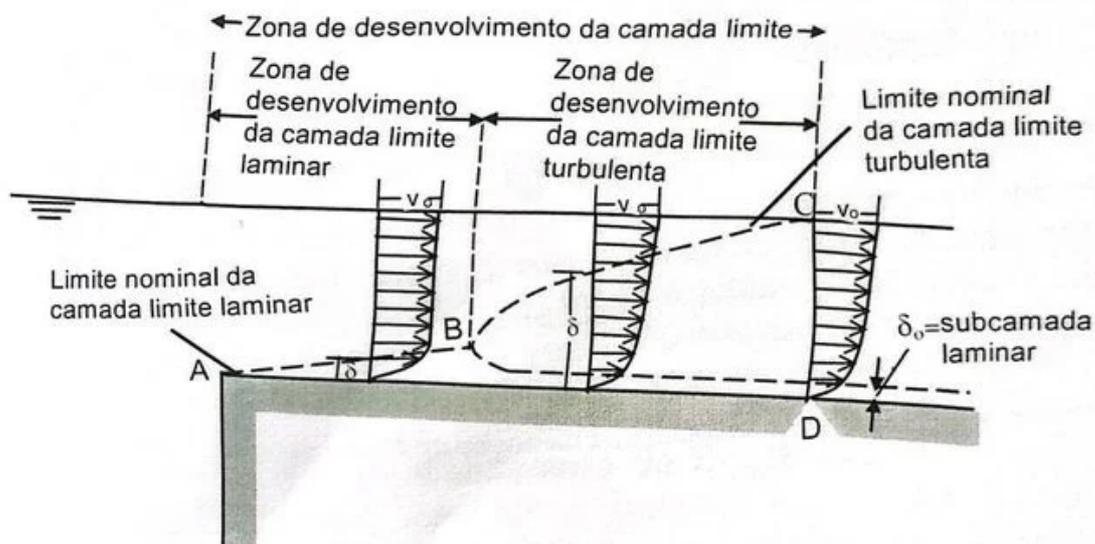
A distribuição de velocidades é influenciada por vários fatores, incluindo a geometria do leito do rio, a rugosidade das superfícies, a vazão de água, a inclinação do leito e a presença de obstáculos. Modelos matemáticos, como as equações de Navier-Stokes e os modelos de turbulência, são frequentemente usados para prever e compreender a distribuição de velocidades em diferentes

condições de fluxo. Porém, geralmente as velocidades pontuais em uma seção transversal são substituída pela velocidade média na maioria das aplicações.

A distribuição de velocidade nos rios está associada com um fenômeno estudado na Mecânica dos Fluidos que é o conceito de camada limite turbulenta sobre paredes rugosas. Uma vez que o escoamento ocorre em superfície livre, a camada limite estende-se por toda a profundidade do canal definindo três regiões como mostrado na Figura 4 de acordo com Silva, Mascarenhas e Miguez (2003, p. 38):

1. Região inferior adjacente ao eixo chamada de subcamada laminar onde prevalece os efeitos viscosos.
2. Região de transição, onde se fazem presentes tanto os efeitos viscosos quanto os turbulentos.
3. Região superior, aqui o escoamento é plenamente turbulento, mesmo que ainda possam haver efeitos do atrito viscoso.

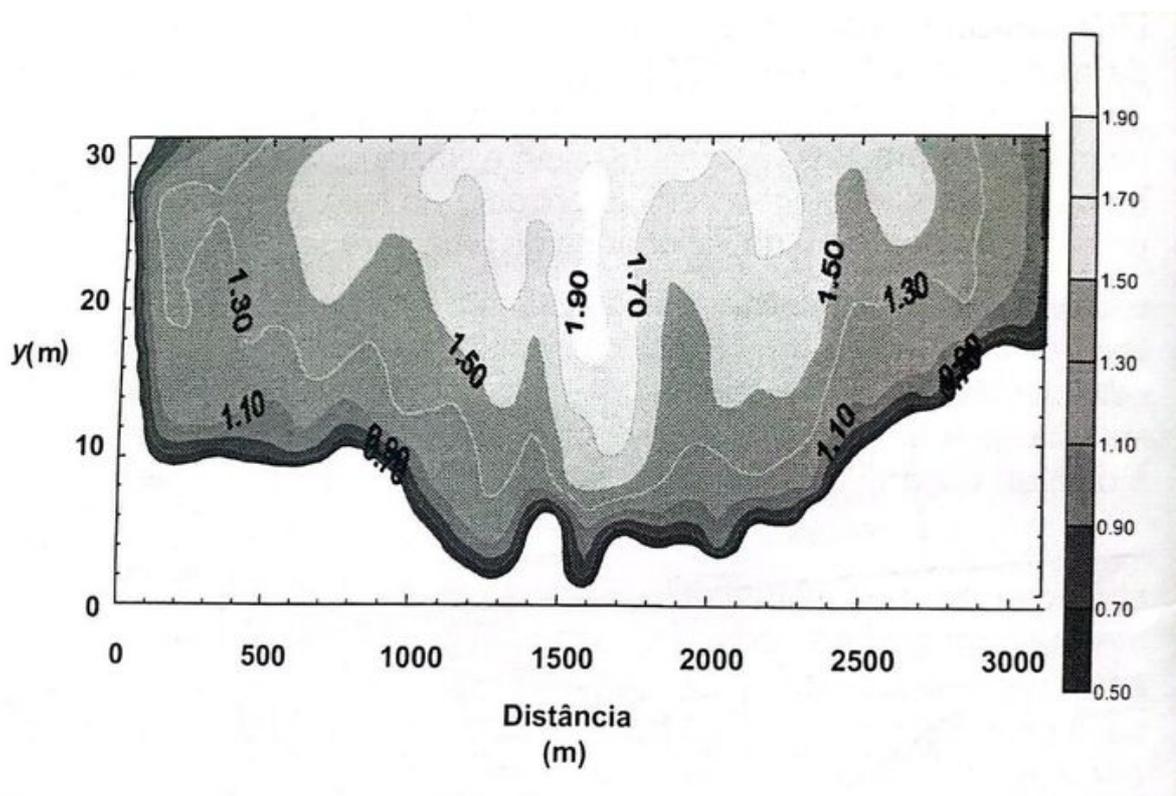
Figura 4 — Desenvolvimento de uma camada limite em um canal



Fonte: Silva, Mascarenhas e Miguez (2003, p. 39).

A Figura 5 demonstra através de isolinhas a distribuição de velocidades numa seção transversal de um trecho do Rio Solimões em Manacapuru

Figura 5 — Isolinhas de velocidades na seção de Manacapuru



Fonte: Da Silva e Pecly (2001, p. 7).

3.3.2 Equações fundamentais da hidráulica fluvial

As equações fundamentais da hidráulica fluvial desempenham um papel essencial na análise e na modelagem desses sistemas. Elas são derivadas das leis básicas da física, como as equações de conservação da massa, conservação de energia e da quantidade de movimento, adaptadas para o contexto dos fluxos de água em rios. Para a hidráulica fluvial esta análise parte tomando-se por referência um trecho do rio situado entre duas seções transversais distintas, porém subsequentes.

Por conta das numerosas variáveis e leis que descrevem os escoamentos nos rios e a irregularidade geométrica dos leitos e de suas calhas, as equações são aplicadas partindo de determinadas hipóteses que simplificam o entendimento conforme Silva, Mascarenhas e Miguez (2003, p. 38):

- No escoamento as vazões, velocidades, cotas e profundidades mudam somente com a distância ao longo do eixo do rio e com o tempo.
- A distribuição de pressões em uma vertical é hidrostática.
- A não uniformidade da distribuição das velocidades ao longo da seção transversal é pouco salientada.
- Considera-se que a declividade do leito S_0 é razoavelmente pequena, de

modo que os valores do ângulo θ , seu seno, cosseno e tangente sejam aproximadamente iguais.

- Considera-se também a água como um fluido incompressível e homogêneo, assim como sua densidade constante no espaço e no tempo.
- Serão desconsideradas as interações químicas e biológicas, as taxas de temperatura e densidade, bem como a presença de sedimentos e a mobilidade do leito.

3.3.2.1 Equação de conservação de energia de Bernoulli

Essa equação é uma adaptação da equação de Bernoulli para fluxos em rios abertos, considerando as perdas de energia devido à fricção entre a água e as paredes do canal. Ela relaciona a energia total em uma seção do rio com a energia em outra seção, levando em conta a altura da água, a velocidade e a rugosidade do leito. Posto isto, a energia total por unidade de peso em uma seção, que denominaremos H , obedecerá a seguinte expressão:

$$H = \frac{v^2}{2g} + z + h \quad (5)$$

Onde:

v é a velocidade média na seção transversal,

g é a aceleração da gravidade,

z é a cota do leito,

h é a altura da energia específica.

3.3.2.2 Equação da conservação de massa da continuidade

A equação da continuidade é baseada na lei de conservação da massa e afirma que, para um fluxo permanente e incompressível, a vazão que entra em um trecho de rio é igual à vazão que sai desse trecho. Porém na aplicação a rios significa que "a diferença entre o volume de água afluente à seção de montante e o volume efluente do trecho, num dado intervalo de tempo, corresponde exatamente à variação do volume d'água dentro deste trecho e no mesmo intervalo." (Silva; Mascarenhas; Miguez, 2003, p. 38).

Caso venha ocorrer variação de vazão num trecho com ausência de afluentes, deve-se por conta dos fatores a seguir de forma isolada ou combinados:

- armazenamento de água dentro do trecho;
- transbordamento para a planície de inundação;

- retorno do fluxo da planície para a calha durante recessão;
- permutas com o lençol freático;
- contribuição lateral vindo do escoamento superficial provocados por chuva na bacia.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_l \quad (6)$$

Onde:

A é a área em determinado trecho,

t é o intervalo de tempo,

Q é a vazão no trecho,

x é o comprimento do trecho,

q_l é a vazão lateral por unidade de comprimento que pode ser positiva em caso de ganho e negativa em caso de perda.

3.3.2.3 Equação dinâmica da quantidade de movimento

A equação dinâmica é outra das equações fundamentais da hidráulica fluvial que traduz o princípio da conservação da quantidade de movimento. O princípio da quantidade de movimento é uma consequência direta da Segunda Lei de Newton, a qual estabelece que a taxa de variação do momento linear de um corpo é igual ao somatório das forças aplicadas sobre ele. A quantidade de movimento pode ser obtida do produto entre a massa do elemento e a sua velocidade.

Num escoamento, podemos considerar principalmente três forças atuantes, sendo elas: a força gravitacional obtida pela decomposição do peso na direção do escoamento, a força de pressão que é resultado da variação de profundidade e da pressão exercida pelas margens e a força de atrito que é resultado das tensões de cisalhamento que produzem resistência ao escoamento. Ao trabalhar com as informações citadas, conseguimos chegar na forma mais popular da equação dinâmica dos escoamentos em rios e canais:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_0 - S_f) \quad (7)$$

Onde:

v é velocidade no escoamento,

t é o intervalo de tempo,

x é a largura da seção,

g é a aceleração da gravidade,

h é a profundidade,
($S_0 - S_f$) é a diferença de declividade.

3.3.3 Resistência ao Escoamento e Perda de Carga em Rios

A resistência ao escoamento é a força que atua contra o movimento da água no curso d'água. Ela é causada por vários fatores, incluindo a rugosidade do leito e das margens do rio, a presença de obstáculos como pedras e vegetação, a viscosidade da água e a velocidade do escoamento. Quanto mais rugoso e irregular for o leito do rio, maior será a resistência ao escoamento.

A perda de carga em um rio refere-se à diminuição da energia total da água à medida que ela flui ao longo do curso d'água. Essa perda de energia ocorre devido à resistência ao escoamento, turbulência, atrito com as paredes do rio e outras interações com o ambiente.

3.3.3.1 Fórmulas de perda de carga

As fórmulas de perda de carga mais encontradas na literatura e que são mais aplicadas na hidráulica fluvial são as fórmulas de Chèzy e a fórmula de Manning, e a semelhança entre elas se dá por ambas relacionarem "a velocidade média do escoamento com as propriedades geométricas de uma seção, a natureza do material do leito e a declividade da linha de energia" (Silva; Mascarenhas; Miguez, 2003, p. 136).

O fator principal dessas fórmulas é uma propriedade do material conhecida como coeficiente de rugosidade, que diz respeito ao atrito no escoamento, apesar de ser função principalmente do material, outros fatores também podem afetar esse coeficiente.

3.3.3.1.1 Fórmula de Chèzy

Foi desenvolvida pelo cientista considerado pioneiro nos tempos modernos a estudar os problemas de resistência ao escoamento em rios: Antoine Chèzy(1798). O coeficiente de rugosidade da sua formulação é função somente da rugosidade do material do leito do canal, porém, levando em conta sua dimensão $L^{1/2}T^{-1}$ também deve depender da forma da seção transversal, por conta de ser uma variação um tanto desconhecida, a fórmula de Chèzy acabou ficando restrita a pesquisas de canais de laboratório, fazendo com que tenha aplicação limitada a rios pouco profundos e com baixas velocidades de escoamento, sendo possível então, admiti-lo

praticamente constante.

$$v = C\sqrt{RS_f} \quad (8)$$

Onde:

v é velocidade média de escoamento,

C é o coeficiente de Chèzy,

R é o raio hidráulico,

S_f é a declividade da linha de energia.

3.3.3.1.2 Fórmula de Manning

A fórmula de Manning foi desenvolvida pelo engenheiro irlandês Robert Manning (1897) e é amplamente utilizada na hidráulica de rios para estimar a velocidade média, e indo de encontro à fórmula de Chèzy, ele concluiu que a variação da velocidade com o raio hidráulico não era quadrática. A partir disso ele propôs duas expressões com alta complexidade para a resistência ao escoamento, que foram agrupadas por estudiosos que daí apresentaram a fórmula amplamente conhecida como fórmula de Manning:

$$v = \frac{1}{n}R^{2/3}S_f^{1/2} \quad (9)$$

Onde:

v é velocidade média de escoamento,

n é o coeficiente de rugosidade de Manning,

R é o raio hidráulico,

S_f é a declividade do leito.

Ao igualar as velocidades nas duas fórmulas, conseguimos obter uma correlação entre o coeficiente de rugosidade de Manning e o coeficiente de Chèzy:

$$\frac{1}{C} = \frac{n}{R^{1/6}} \quad (10)$$

Onde:

C é o coeficiente de Chèzy,

n é o coeficiente de rugosidade de Manning,

R é o raio hidráulico.

3.3.3.2 Fatores que afetam o coeficiente de Manning

A princípio, o que define a resistência em um escoamento em um canal é a granulometria do material no leito, porém existem fatores complementares que contribuem para a resistência ao escoamento. " O atrito entre o escoamento e o leito é uma função do regime de escoamento na camada limite que pode ser laminar ou turbulento." (Silva; Mascarenhas; Miguez, 2003, p. 140). Como nos canais principais dos rios a rugosidade é alta, assim como o número de Reynolds, considera-se que o regime sempre é turbulento.

O processo de resistência ao escoamento acontece ao longo do fluxo, portanto, a perda de carga ocorre de forma distribuída, entretanto, pode ocorrer de forma localizada devido a especificidades naturais ou por intervenção humana.

3.3.3.2.1 *Perdas de carga distribuída*

- Rugosidade do material do leito: é o principal fator considerado na perda de carga distribuída, e depende das dimensões características do material ao longo do perímetro molhado da seção.
- Formas do fundo: sabemos que os leitos dos rios não têm uma configuração plana, além de que cursos naturais apresentam muitas singularidades, como bancos de areia, dunas, meandros, etc. São, portanto, resistências relacionadas aos obstáculos nas calhas e ao transporte de sedimentos.
- Profundidade e largura da seção molhada: o coeficiente de Manning varia conforme as dimensões das irregularidade do leito e da profundidade, pois canais menos profundos sofrem mais influência da resistência do leito, assim como pela implicação das margens, a largura também influencia pois quanto maior, menos sofre influência das margens.
- Vegetação natural: é comum ser encontrado vegetação em meio à seção de cursos naturais, assim como nas margens, tornando-se assim um importante fator que influencia na rugosidade e perda de carga.

3.3.3.2.2 *Perdas de carga localizadas*

- Contrações e expansões bruscas da seção natural: em cursos naturais está normalmente relacionado à canalizações ou estruturas hidráulicas, a perda de carga vai estar associada ao regime de escoamento à montante e à variação da seção transversal, e deve-se usar métodos de calibração obtidos por simulação para estimar as perdas.

- Pontes e estruturas nas margens: pontes construídas, espigões nas margens e outros tipos de intervenções também são responsáveis por perda de carga em um escoamento.
- Quebras de perfil longitudinal: ocorrem em mudanças de escoamento, por exemplo, das encostas para planícies, nesses casos a perda de carga localizada se dá por conta da menor inércia do escoamento.

3.3.4 Escoamentos permanentes gradualmente variados

Os escoamentos permanentes gradualmente variados referem-se a situações em que a variação do nível da água em um curso d'água é suave e contínua. Isso significa que a inclinação do leito do rio é gradual o suficiente para permitir que a energia cinética e a energia potencial da água se ajustem ao longo do fluxo. Esses escoamentos são importantes em cenários de canais abertos, rios e córregos, onde as variações no nível da água ocorrem de maneira contínua, como em trechos de planícies de inundação ou em seções de rios com declividade suave.

Nesse tipo de escoamento as grandezas não variam com o tempo para uma mesma seção, obtém-se então as equações fundamentais eliminando-se as derivadas parciais com relação ao tempo nas equações da continuidade e na equação dinâmica, desta forma:

A fórmula do escoamento permanente pode ser usada para avaliar a inclinação de energia de um fluxo gradualmente variado em uma determinada seção do canal, e o coeficiente de rugosidade correspondente desenvolvido principalmente para escoamento uniforme é aplicável ao escoamento variado (Chow, 1959, p. 217).

Sabendo que a vazão lateral entra significativamente nos cursos d'água naturais durante os escoamentos de cheia, e por isso são considerados nos casos regimes não permanentes, portanto podemos desprezar o valor da contribuição lateral também, de maneira que possamos considerar a vazão constante. Quanto a forma de variação longitudinal da seção transversal: considerando um leito prismático, a seção permanece constante, para um leito não prismático, por sua vez, a seção varia com a profundidade e a posição, sendo este o padrão comum para rios, contudo, considerando a seção não prismática na resolução da equação diferencial exige o "conhecimento de uma relação que defina a variação da seção transversal com a distância, [...] o que é praticamente impossível" (Silva; Mascarenhas; Miguez, 2003, p. 177).

Felizmente é um problema que pode ser contornado visto que existe forma de

solucionar a equação numericamente, deve-se portanto particionar o rio em trechos, e interpolar as características de uma seção entre seções já conhecidas, feito isto e considerando um leito prismático de seção correspondente poderemos obter a equação diferencial dos escoamentos gradualmente variados para canais prismáticos conforme Silva, Mascarenhas e Miguez (2003, p. 177).

$$\frac{dh}{dx} = \frac{S_o - S_f}{1 - F_r^2} \quad (11)$$

3.3.5 Escoamentos Não Permanentes Gradualmente Variados

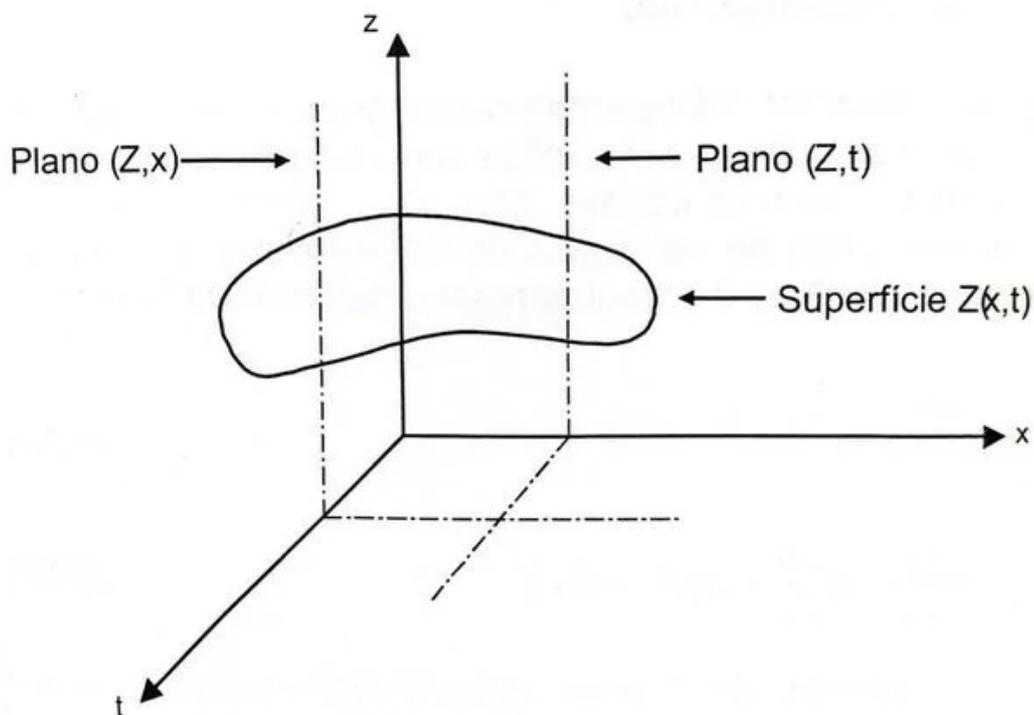
Os escoamentos não permanentes gradualmente variados são situações em que ocorrem variações no nível da água em cursos d'água de maneira gradual ao longo do tempo. Essas variações podem ser causadas por eventos como a abertura ou fechamento de comportas, o aumento súbito do fluxo de água devido a chuvas intensas ou o escoamento de cheias que se propagam ao longo do canal. Diferentemente dos escoamentos permanentes gradualmente variados, que envolvem variações suaves e contínuas no nível da água, os escoamentos não permanentes gradualmente variados lidam com variações transitórias e temporais. Como podemos conferir na literatura:

É possível em algumas situações transformar escoamentos não permanentes em permanentes tendo coordenadas com relação a uma referência móvel. Esta simplificação é útil na visualização do escoamento e na derivação das equações que o governam (Chaudhry, 2008, p. 6).

Nesse tipo de escoamento as variações dependem do espaço e do tempo, e portanto, são governados pelo conjunto das equações de Saint-Venant (equações 6 e 7 vistas anteriormente) conforme Silva, Mascarenhas e Miguez (2003, p. 215).

Olhando matematicamente para as duas equações, se considerarmos f uma variável dependente de uma das duas equações, a solução será dada por uma função de duas variáveis, podendo ser representada graficamente por uma superfície $f(x,t)$ conforme a Figura 6:

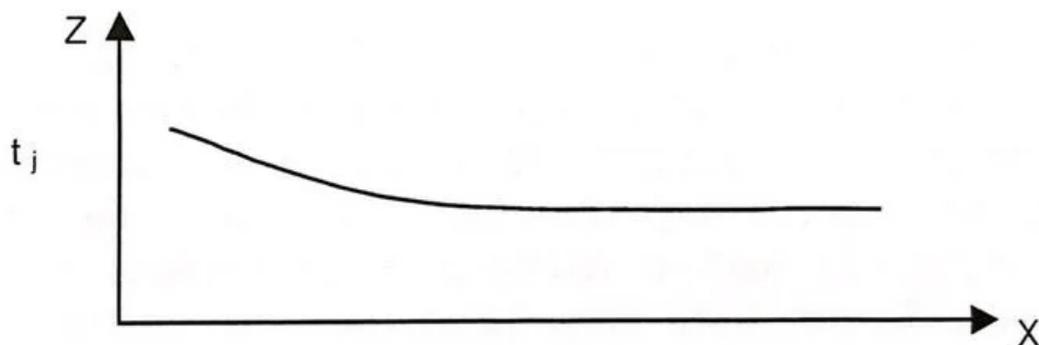
Figura 6 — Representação gráfica da solução das equações de Saint-Venant



Fonte: Silva, Mascarenhas e Miguez (2003, p. 216).

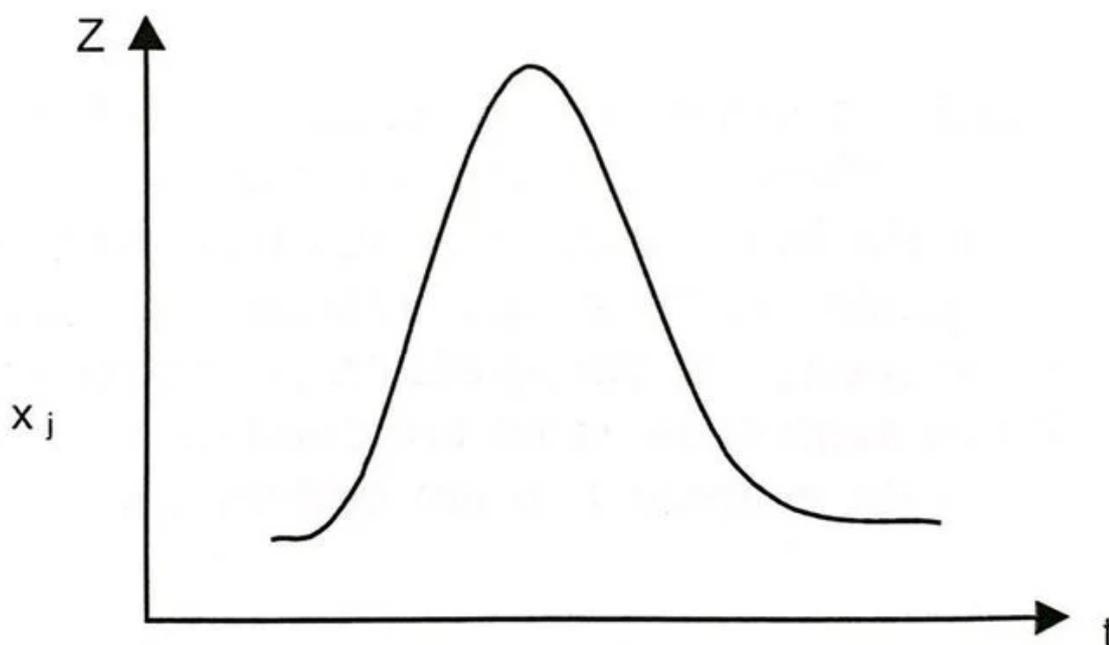
Utilizando-se a cota da superfície Z no lugar da variável genérica f , podemos observar nas Figuras 7 e 8, consegue-se definir a solução da seguinte forma: "as interseções dos planos perpendiculares mencionados anteriormente com a superfície solução $Z(x,t)$ definem respectivamente um perfil de superfície livre $Z(x)$ em um determinado instante t , e um cotograma $Z(t)$ em uma seção x ." (Silva; Mascarenhas; Miguez, 2003, p. 215).

Figura 7 — Perfil de superfície livre no instante t (Plano Z,x)



Fonte: Silva, Mascarenhas e Miguez (2003, p. 216).

Figura 8 — Cotograma em uma seção x (Plano Z,t)



Fonte: Silva, Mascarenhas e Miguez (2003, p. 216).

É necessário ainda, para solucionar as equações, que sejam definidas além da condição inicial, condições de contorno, deve-se portanto analisar as figuras 7 e 8 com a percepção de que o eixo x equivale ao leito do rio e o eixo t corresponde ao tempo de duração do transiente e cada ponto equivale a um instante de cálculo.

Para as condições iniciais consideramos os valores das variáveis no decorrer da distância x , no instante inicial ($t=0$), ou seja, no momento em que o escoamento não permanente ainda não foi iniciado.

As condições de contorno a montante referem-se às condições impostas no início do canal. Essas condições podem incluir a especificação do hidrograma de entrada, que descreve como o fluxo de água varia ao longo do tempo, ou a variação temporal do nível da água. As condições de contorno a montante desempenham um papel crucial na propagação das variações no nível da água ao longo do canal.

As condições de contorno a jusante se referem às condições impostas no final do canal ou na saída do domínio de modelagem. Elas podem ser especificadas de forma semelhante às condições de fronteira a montante e influenciam a dissipação das variações do nível da água à medida que o fluxo se propaga rio abaixo.

Além das condições de contorno associadas ao nível da água, também é

importante considerar as condições de escoamento, como a vazão, a velocidade e a profundidade da água. Essas informações podem ser usadas para definir as condições iniciais e as condições de fronteira, bem como para avaliar os efeitos das variações no nível da água no comportamento do escoamento.

3.4 HIDROMÉTRIA APLICADA EM ESCOAMENTO FLUVIAL: MEDIÇÕES DE COTAS (NÍVEL) E VAZÕES.

A hidrometria aplicada em escoamento fluvial desempenha um papel de extrema importância na gestão dos recursos hídricos e na compreensão dos complexos sistemas aquáticos que percorrem nosso planeta. Neste campo de estudo e prática concentrar-nos-emos em dois aspectos cruciais: a medição de cotas (níveis) e vazões em corpos d'água, permitindo-nos decifrar os segredos das vias fluviais e fornecendo dados críticos para uma variedade de aplicações.

As cotas (níveis) representam a altura da água em um determinado ponto de um rio, lago ou canal, enquanto as vazões quantificam a quantidade de água que flui por unidade de tempo em uma dada seção transversal. Essas medidas, juntas, constituem os pilares da hidrometria fluvial e têm implicações significativas em áreas como previsão de inundações, gestão de recursos hídricos, controle de qualidade da água, projetos de engenharia, pesquisa ambiental e muito mais.

Nesta revisão sobre a hidrometria em escoamento fluvial, examinaremos as técnicas e instrumentos utilizados para realizar medições precisas de cotas e vazões e algumas aplicações dessa prática, como a mitigação de desastres naturais até o planejamento de infraestrutura hídrica.

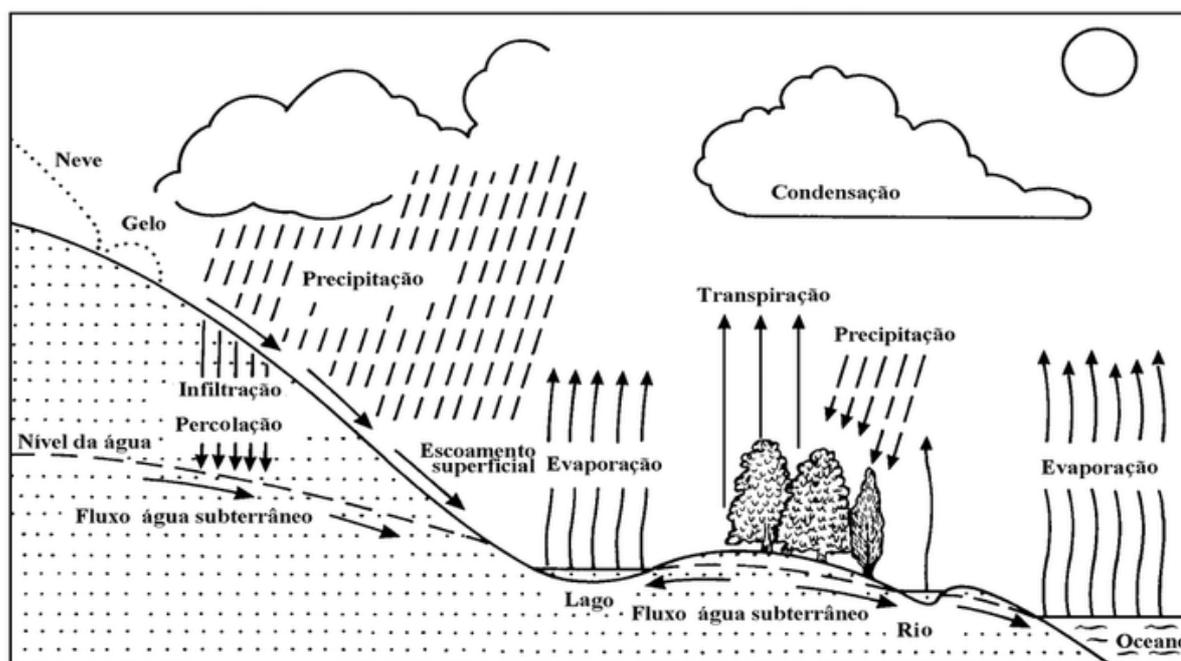
3.4.1 Ciclo Hidrológico

O ciclo hidrológico, também conhecido como ciclo da água, é um dos processos naturais mais fundamentais e vitais que ocorrem na Terra. Este ciclo representa a contínua circulação e transformação da água em diferentes estados físicos (líquido, sólido e gasoso) à medida que ela se move através da atmosfera, da superfície terrestre e dos corpos d'água. É um ciclo complexo e interligado que desempenha um papel essencial na manutenção da vida, no fornecimento de água doce, na modelagem do clima e no funcionamento dos ecossistemas terrestres e aquáticos, como assegurado por Santos *et al.* (2001, p. 22).

A água, em suas diversas formas, está constantemente em movimento, como mostrado na Figura 9, impulsionada por processos como evaporação, condensação, precipitação, infiltração, escoamento superficial e transpiração. O ciclo hidrológico é

global, conectando oceanos, continentes, atmosfera e subsolo. A água evaporada dos oceanos é transportada pela atmosfera para formar nuvens, que eventualmente liberam a água na forma de precipitação sobre a terra. Essa água da chuva pode então se infiltrar no solo, alimentando aquíferos subterrâneos, ou escorrer diretamente para rios e lagos, recomeçando o ciclo.

Figura 9 — Ciclo Hidrológico



Fonte: Tucci (2004).

Este ciclo contínuo e dinâmico desempenha um papel crítico na manutenção do equilíbrio hídrico do planeta e afeta diretamente a distribuição da água doce disponível para abastecimento humano, agricultura e uso industrial. Além disso, influencia padrões climáticos, desempenhando um papel fundamental na regulação da temperatura e no transporte de calor ao redor do globo, contudo:

Cerca de 97% da água do planeta Terra está nos oceanos e não pode ser utilizada para irrigação, uso doméstico e dessedentação. Os 3% restantes têm, aproximadamente, um volume de 35 milhões de quilômetros cúbicos. Grande parte deste volume está sob forma de gelo na Antártida ou na Groelândia. Somente 100 mil km³, ou seja, 0,3 % do total de recursos de água doce está disponível e pode ser utilizado pelo homem (Tundisi, 2003, p. 31).

Sabemos que a maior parte da superfície da terra é coberta por água, cerca de 70%, por conta disto, o volume de evaporação direta que ocorre nos oceanos é aproximadamente 7 vezes maior que o volume evapotranspirado da superfície da terra, isso faz com que os oceanos sejam os maiores responsáveis pela precipitação

terrestre de acordo com (Santos *et al.*, 2001, p. 23).

3.4.2 Estação Fluviométrica

As redes de monitoramento hidrométrico ou estações fluviométricas são sistemas de coleta de dados que se concentram na medição de parâmetros relacionados à água, como cotas (níveis) e vazões em rios, córregos e corpos d'água. Essas redes desempenham um papel crucial em várias áreas e aplicações, permitindo o acompanhamento das condições hidrológicas e fornecendo informações essenciais para uma gestão eficaz dos recursos hídricos.

As estações devem ser instaladas em locais em que a calha responda à alguns requisitos básicos, entre eles: trechos retos que tenham as margens bem definidas, altas e estáveis e de fácil acesso ao menos no período da cheia; leito regular e estável, de preferência rochoso; locais de águas tranquilas e protegidas contra materiais carregados pela enchente; facilidade de efetuar as medições no local ou próximo; entre outros requisitos citados por (Santos *et al.*, 2001, p. 68).

Diante disto, fica claro a importância e necessidade de fazer as medições das séries de variáveis hidrológicas para que se conheça as características hidrológicas, e possa ser aplicado os modelos matemáticos e físicos de estudo da hidrologia, tornando, portanto, possível estimar as probabilidades e períodos de retorno para eventos históricos, tais quais, cheias e secas extremas, entendimento em harmonia com o descrito por Santos *et al.* (2001, p. 28).

Figura 10 — Estação 14100000 - Manacapuru



Fonte: Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

3.4.3 Medição de Cota

Antes de adentrar no tópico de medição da vazão líquida é necessário

entender que são feitas correlações desta com o nível d'água, para o melhor entendimento do regime hidrológico numa localidade. Basicamente a medição dos níveis d'água são feitas por meio de réguas linimétricas ou linímetros e também por linígrafos. Réguas linimétricas são simplesmente escalas graduadas de madeira ou metálicas, como mostrado na Figura 11 a seguir:

Figura 11 — Réguas Linimétricas



Fonte: Grupo de Pesquisas em Hidrologia e Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas - UFPEL (2012).

Segundo Moreira (2010, p. 12), é importante lembrar que em projetos de engenharia é comum utilizar níveis de referência arbitrários, o que resolve a maioria dos problemas localmente, mas impede o estabelecimento de uma base comum para que se possa conectar e articular diversos projetos e estudos.

Sabe-se ainda que as medições por leituras manuais são propensas a apresentarem muitos erros, dependendo do tipo de régua, uma pessoa com pouca instrução pode apresentar dificuldades, outros tipos de régua aderem à sujeira da água tornando difícil a visualização, outro problema comum é a colocação dos linímetros, que podem ter sua posição alterada por conta da força do curso d'água, também existe certa dificuldade em descer o barranco para a leitura, e quando a

leitura não é feita, há quem invente valores. Como alternativas existem também os linígrafos de boia e de pressão: "Os linígrafos de boia possuem um flutuador preso a um cabo ou uma fita de aço que transmite o seu movimento, decorrente de uma variação do nível de água, a um eixo que desloca um estilete munido de pena sobre um gráfico de papel."(Santos *et al.*, 2001, p. 60).

Os linígrafos de boia têm uma grande desvantagem, o alto custo de instalação, pois para operarem da melhor forma, necessitam estar em poços que necessitam de manutenção e limpeza periódica, além do custo para escavação que por vezes, demandam até explosivos. Por conta disso, tem-se dado maior preferência para os linígrafos de pressão, que podem ser de bolhas ou com transdutor eletrônico de pressão, sendo este último mais compacto e com custo reduzido, entretanto:

As estações linigráficas exigem manutenção constante e podem apresentar problemas de segurança devido ao preço dos equipamentos. Os linígrafos exigem manutenção mais sofisticada e, por trabalharem sem necessidade de operador, em caso de problemas podem ficar fora de operação sem que isso seja percebido (Barnez, 2004, p. 9).

Em alguns lugares, o tipo de estação pode ser telemétrica, que, segundo Santos *et al.* (2001, p. 66) é uma estação linigráfica acrescentada de sensores objetivando canais de comunicação e equipamentos de controle.

3.4.4 Medição de Vazão

Dentre as varias medições hidrológicas, a medição de vazões é onde mais são empregados recursos tecnológicos variados necessários para o desenvolvimento de medidores e transmissores auxiliares, sendo importantes para aplicações nos transportes de fluidos, para o serviço público, bem como para a gestão de recursos hídricos, como defendido por (Delmée, 2003, p. 6).

Podemos conceituar vazão como: "o volume de água que passa numa determinada seção do rio por unidade de tempo, a qual é determinada pelas variáveis de profundidade, largura e velocidade do fluxo, e expressa no (SI) em m^3/s ." (De Carvalho, 2008, p. 74).

Na hidrometria, considera-se medição de vazão todo processo empírico utilizado na determinação da vazão em um trecho, os métodos principais de acordo com Santos *et al.* (2001, p. 119), são: medição e integração da distribuição de velocidade, método acústico, método volumétrico, método químico, uso de dispositivos de geometria regular e a medição com flutuadores. Porém, não entraremos no mérito de todos esses métodos, focaremos no método convencional que é o mais utilizado na hidrometria de cursos naturais, o método convencional

emprega a medição e integração da distribuição de velocidades.

Como técnicas de medição, podemos citar a medição indireta que consiste em uma forma manual de valorar a vazão, para a medição indireta é necessário que se tenha um embasamento teórico, precisa ser determinada a largura do lago em diferentes profundidades ao longo da seção transversal e estimada a velocidade do escoamento (essas grandezas são necessárias para estimar a vazão em qualquer método, variando a forma de fazer a medição e a precisão). Para a estimativa da velocidade pode ser utilizada qualquer objeto como uma folha, ou flutuadores, colocados no eixo central do curso natural, prefixando-se a distância que o objeto percorre, cronometra-se o tempo e a partir destes dados estima-se a velocidade, conforme descrito por De Carvalho (2008, p. 79).

Para a medição direta, é universalmente utilizado para canais naturais o uso de molinete, como o da Figura 12. Um rio apresenta variadas velocidades de fluxo, que variam com o material da calha, a largura do canal e a profundidade do rio, por conta disto, é necessário que se faça varias medições verticais e transversais no rio para que se tenha uma velocidade média coerente e o mais precisa possível, para facilitar o processo, o molinete é utilizado para a medição da velocidade em tantos pontos quantos medidos as profundidades, como mostrado por Santos *et al.* (2001, p. 124).

Figura 12 — Molinete Fluviométrico



Fonte: Ismael *et al.*.

3.4.4.1 Medição de Vazão em Grandes Rios

Em grandes rios a medição da descarga líquida pode ser realizada por diferentes técnicas, cada método tem suas aplicações específicas e é escolhido com base nas necessidades do estudo, na precisão desejada e nos recursos disponíveis.

De acordo com a publicação *Medição de descarga líquida em grandes rios: manual técnico*, da Agência Nacional de Águas (2009), temos que:

- a. Barco ancorado - Uma das abordagens tradicionais é o método do barco ancorado. Neste método, um barco é fixado em um ponto específico do rio, e a vazão é calculada medindo-se a velocidade da corrente e a área da seção transversal do rio. Isso é feito por meio de sondas e medidores de corrente.
- b. Barco não ancorado - Outra técnica é o método do barco não ancorado, onde o barco se move ao longo do rio enquanto mede a velocidade da corrente em pontos estratégicos. Os dados coletados são usados para calcular a vazão do rio. Embora esse método seja mais flexível em termos de localização, ele pode ser mais suscetível a erros devido à movimentação do

barco.

c. Barco em movimento - O método do barco em movimento é uma variação do método do barco não ancorado, onde um barco equipado com instrumentação de medição se move continuamente ao longo do rio, coletando dados de velocidade e profundidade. Isso permite uma cobertura mais abrangente, mas requer sistemas de posicionamento global precisos e uma logística mais complexa.

d. ADCP - Uma abordagem mais avançada envolve o uso de tecnologia acústica, como o Perfilador de Corrente Doppler Acústico (ADCP). O ADCP emite pulsos acústicos no rio e mede o tempo que esses pulsos levam para refletir das partículas de água em movimento. Com base na mudança de frequência Doppler desses pulsos, o ADCP pode calcular com precisão a velocidade da corrente em diferentes profundidades, permitindo a estimativa da vazão do rio com alta resolução espacial.

O ADCP é um equipamento composto por uma sonda com quatro transdutores, existem algumas sondas com três transdutores. O transdutor acústico precisa ser completamente imerso, o que permite que o barco seja conduzido a velocidades aceitáveis.

Figura 13 — Vista dos três transdutores do ADP (esquerda) e dos quatro transdutores do ADCP (direita).



Fonte: Agência Nacional de Águas (2009, p. 66).

Na medição de vazão com o ADCP, um perfil leva menos de um segundo para ser obtido pelo equipamento, o que faz a medição de vazão com ADCP rápida. Para uma seção de 3,2 km de largura, como a de Manacapuru, no Rio Solimões, a travessia com o ADCP leva apenas 20 minutos, enquanto uma medição com

métodos de barco ancorado levaria de mais de um dia de trabalho (Agência Nacional de Águas, 2009).

3.5 ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DE MÁXIMAS E MÍNIMAS DO ESCOAMENTO FLUVIAL

A análise de frequência de máximas e mínimas de escoamento fluvial é uma abordagem fundamental na hidrologia, que permite estimar a probabilidade de ocorrência de eventos extremos de escoamento em um determinado local ao longo de um período de tempo. Essa análise é crucial para o planejamento e o gerenciamento de recursos hídricos, bem como para a mitigação de riscos de inundação e o projeto de estruturas hidráulicas, como barragens e pontes.

Na hidrologia, praticamente todos os processos são considerados estocásticos, ou seja, vão descrever uma sequência de eventos e observações ao longo do tempo, onde pelo menos parte da variação ou comportamento do processo é governada pela aleatoriedade. Em outras palavras, um processo estocástico é aquele em que as observações futuras não podem ser previstas com certeza, mas podem ser modeladas probabilisticamente (Pinto; Naghettini, 2007).

3.5.1 Parâmetros Estatísticos de Séries Históricas

As variáveis hidrológicas têm sua variabilidade observada por meio das séries temporais, ou seja, são mantidos os dados de uma variável organizadas em sequência de acontecimento, esses registros são distinguidos por intervalos de tempo, normalmente equidistantes. Os dados são primeiramente reunidos como amostra que posteriormente é submetida a análises estatísticas com o objetivo de definir probabilidades de determinados eventos (Tucci, 2004, p. 79, com adaptações).

3.5.1.1 População e Amostra

População é um conjunto que pode ser finito ou infinito de todos os possíveis resultados, porém, na prática é conhecido apenas um subconjunto de elementos extraídos da população que é conhecido como amostra. Para a hidrologia estatística, o objetivo principal é extrair conclusões a partir dessas amostras, se, por exemplo obtivermos uma amostra como uma série de máximas anuais, tal que os valores variam de x a y , supomos com base apenas nessa amostra que a probabilidade de esses valores serem superiores ou inferiores a esses limites

amostrais é muito pequena, e um próximo evento de máxima deverá estar compreendido entre esses dois valores, embasado no texto de Pinto e Naghettini (2007, p. 11).

3.5.1.2 Medidas de Tendência Central

As medidas de tendência central são valores calculados que podem representar uma amostra, as mais utilizadas são a média, a moda e a mediana, todas as medidas têm ampla utilização e vão depender do objetivo de utilização. Podemos descrever as medidas de tal forma:

- Média: A média é o valor médio de todos os pontos de dados na série temporal. Ela fornece uma medida central dos dados e é calculada somando todos os valores e dividindo pelo número de observações:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (12)$$

- Mediana: A mediana é o valor central em um conjunto de dados quando os valores são ordenados em ordem crescente ou decrescente. Ela é menos sensível a valores extremos do que a média e é frequentemente usada para descrever a tendência central da série, calculada da seguinte forma caso seja uma amostra com um número ímpar de elementos:

$$x_{md} = \frac{x_{(\frac{n}{2})}}{2} \quad (13)$$

Caso seja par,

$$x_{md} = \frac{x_{(\frac{n}{2})} + x_{(\frac{n}{2}+1)}}{2} \quad (14)$$

- Moda: A medida de tendência moda, também conhecida simplesmente como moda, é um conceito estatístico que representa o valor ou valores que ocorrem com maior frequência em um conjunto de dados. Em outras palavras, a moda é o valor que aparece com maior frequência em uma distribuição de dados.

3.5.1.3 Medidas de Dispersão

As medidas de dispersão são estatísticas que descrevem o grau de variação ou dispersão dos valores em um conjunto de dados. Elas são essenciais para entender como os dados estão distribuídos em torno da medida central como a média ou a mediana, e proporcionam informações sobre a consistência ou a variabilidade dos dados. As principais são a variância e o desvio padrão:

- Variância: A variância é uma medida que descreve o quão dispersos estão os valores em relação à média. Ela é calculada como a média dos quadrados das diferenças entre cada valor e a média. A variância é sensível a valores extremos e é expressa em unidades ao quadrado:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (15)$$

- Desvio padrão: O desvio padrão é a raiz quadrada da variância e é uma medida mais interpretável de dispersão, uma vez que possui as mesmas unidades que os dados originais. É amplamente utilizado na análise estatística e é menos sensível a valores extremos do que a variância.

$$DP = \sqrt{\sigma^2} \quad (16)$$

3.5.2 Teste de Hipótese de Kolmogorov-Smirnov

O teste de hipótese é uma técnica estatística usada para tomar decisões ou fazer inferências sobre uma população com base em informações obtidas de uma amostra dos dados e de uma distribuição de probabilidades. Por ser questão de inferência inerente a uma variável aleatória, deve-se observar um nível de significância α (para hidrologia, é usual $\alpha=0,05$) para a tomada de decisão de rejeitar ou não uma hipótese. Basicamente, o teste de hipóteses é compilar evidências nos dados amostrais que sirvam de justificativa para a rejeição ou não de um parâmetro estatístico ou sobre a forma de um modelo de distribuição, conforme Pinto e Naghettini (2007, p. 246).

Ainda segundo Pinto e Naghettini (2007), para realizar o teste de hipótese, é necessário:

- Formular a hipótese a ser testada, H_0 - hipótese nula;
- Formular a hipótese alternativa, H_1 ;
- Especificar a distribuição de amostragem de teste a ser utilizada;

- Definir o nível de significância α ;
- Especificar a região de rejeição, ou região crítica;
- Verificar se a estatística do teste está dentro ou fora dos limites estabelecidos para a região de rejeição.

Um dos testes mais usuais em hidrologia é o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov que é um teste não paramétrico, a estatística do teste baseia-se na diferença máxima entre as funções de probabilidade acumuladas, seja empírica ou teórica, desde que sejam de variáveis aleatórias contínuas, já que o teste não se aplica a variáveis aleatórias discretas, como definido por Pinto e Naghettini (2007, p. 275).

Figura 14 — Valores Críticos Para o Teste de Aderência de KS

Tabela 7.5 – Valores críticos da estatística $D_{N,\alpha}$ do teste de aderência KS									
N	$D_{N,0,10}$	$D_{N,0,05}$	$D_{N,0,02}$	$D_{N,0,01}$	N	$D_{N,0,10}$	$D_{N,0,05}$	$D_{N,0,02}$	$D_{N,0,01}$
10	0,369	0,409	0,457	0,489	26	0,233	0,259	0,290	0,311
11	0,352	0,391	0,437	0,468	27	0,229	0,254	0,284	0,305
12	0,338	0,375	0,419	0,449	28	0,225	0,250	0,279	0,300
13	0,325	0,361	0,404	0,432	29	0,221	0,246	0,275	0,295
14	0,314	0,349	0,390	0,418	30	0,218	0,242	0,270	0,290
15	0,304	0,338	0,377	0,404	31	0,214	0,238	0,266	0,285
16	0,295	0,327	0,366	0,392	32	0,211	0,234	0,262	0,281
17	0,286	0,318	0,355	0,381	33	0,208	0,231	0,258	0,277
18	0,279	0,309	0,346	0,371	34	0,205	0,227	0,254	0,273
19	0,271	0,301	0,337	0,361	35	0,202	0,224	0,251	0,269
20	0,265	0,294	0,329	0,352	36	0,199	0,221	0,247	0,265
21	0,259	0,287	0,321	0,344	37	0,196	0,218	0,244	0,262
22	0,253	0,281	0,314	0,337	38	0,194	0,215	0,241	0,258
23	0,247	0,275	0,307	0,330	39	0,191	0,213	0,238	0,255
24	0,242	0,269	0,301	0,323	40	0,189	0,210	0,235	0,252
25	0,238	0,264	0,295	0,317	>40	$1,22/\sqrt{N}$	$1,36/\sqrt{N}$	$1,52/\sqrt{N}$	$1,63/\sqrt{N}$

Fonte: Pinto e Naghettini (2007, p. 277).

3.5.3 Período de Retorno

Quando uma variável aleatória é discretizada em intervalos de tempo com amplitude definida, onde, pela prova de Bernoulli, para cada intervalo exista apenas

a possibilidade de um sucesso com probabilidade p , ou uma falha com probabilidade $(1-p)$ independentes de ocorrências anteriores ou posteriores, num momento em que essa variável assume um valor h , traduz-se que ocorreram $(1-p)^{h-1}$ falhas antes de h (De Souza, 2021, p. 37).

A função dada pelo termo citado no parágrafo anterior é uma função de densidade de probabilidade, tratando, portanto, de uma variável aleatória discreta geométrica, se for levado em conta um valor de referência h_T , a função de distribuição de probabilidade irá resultar em um tempo médio de ocorrência para um sucesso em que há uma ocorrência de valor maior que o de referência, conhecido como período de retorno, conforme mostrado por Naghettini e Portela (2011, p. 19) é igual a :

$$T_r = \frac{1}{P} \quad (17)$$

O período de retorno corresponde ao:

Número médio de anos necessários para que o acontecimento ocorra num ano qualquer desses anos e é igual ao inverso da probabilidade de esse acontecimento ocorrer num ano qualquer desses anos, ou seja, é igual ao inverso da probabilidade anual de ocorrência desse acontecimento (Naghettini; Portela, 2011, p. 20).

3.5.4 Função Densidade de Probabilidade da Distribuição Normal

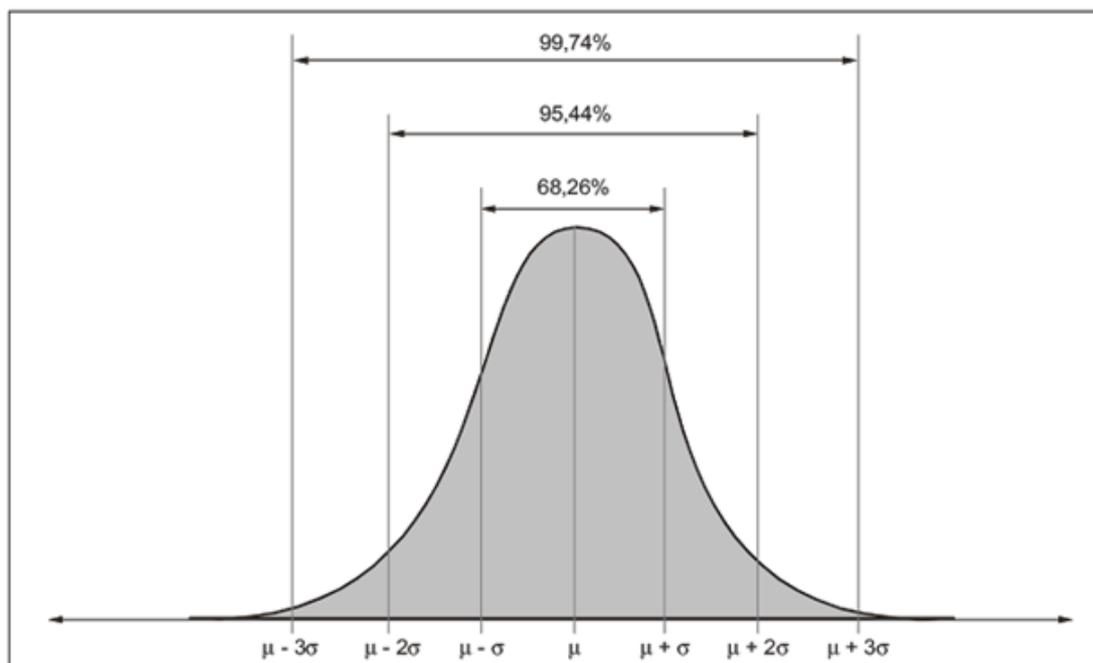
As variáveis contínuas têm suas distribuições de probabilidade simples explicadas por meio de uma função de densidade de probabilidade (FDP). A FDP de uma variável aleatória contínua X é denotada como $f(x)$ e é uma função não negativa que atribui uma densidade de probabilidade a cada possível valor da variável aleatória X . Em outras palavras, a FDP especifica a probabilidade de que X caia em um intervalo infinitesimal em torno de um valor específico x , segundo Tucci (2004, p. 113), com adaptações.

A função densidade de probabilidade da distribuição normal, também conhecida como distribuição gaussiana, é uma das distribuições de probabilidade contínuas mais utilizadas na hidrologia e na engenharia. A FDP da distribuição normal é definida pela seguinte fórmula:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (18)$$

Sendo μ a média, e σ o desvio padrão.

Figura 15 — Representação Gráfica da Distribuição Normal



Fonte: WebSite Mensuração Florestal (2023).

3.5.5 Modelos Estocásticos

Modelos estocásticos são ferramentas de simulação de séries sintéticas, que permitem a preservação de parâmetros estatísticos entre as séries históricas e sintéticas. Essa habilidade de preservação fez com que modelos estocásticos fossem usados por diversos autores, para estudo de séries de vazões em diferentes rios com finalidade de dimensionamento de reservatórios, planejamento e operação de sistemas hídricos ou otimização de usos de recursos hídricos, previsão de afluências, ressaltando-se o uso na operação de aproveitamentos hidrelétricos (Mendes, 2021).

Um modelo de distribuição de probabilidades é uma forma matemática abstrata capaz de representar, de modo conciso, as variações contidas numa amostra de uma variável aleatória. Um modelo de distribuição de probabilidades também é uma forma paramétrica, ou seja, é um modelo matemático contendo parâmetros, cujos valores numéricos o definem completamente e o particularizam para uma dada amostra de uma variável aleatória. Uma vez estimados os valores numéricos desses parâmetros, o modelo de distribuição de probabilidades passa a caracterizar o comportamento plausível da variável aleatória a que respeita aquela

amostra podendo, como tal, ser utilizado para interpolar ou extrapolar probabilidades e/ou quantis não contidos na mesma (Naghettini; Portela, 2011).

Dessa forma, um modelo de distribuição de probabilidade pode mostrar aqueles eventos que apresentam valores distantes da média (máximos ou mínimos) de séries temporais. Esses valores extremos de cotas e/ou vazões, quando máximos estão relacionados às enchentes e quando mínimos representam as secas.

3.6 SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE RECURSOS HIDRÍCOS

O Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) é uma iniciativa da Agência Nacional de Águas (ANA) no Brasil para coletar, armazenar, organizar e disponibilizar informações relacionadas aos recursos hídricos do país. O SNIRH é uma ferramenta fundamental para a gestão sustentável dos recursos hídricos, pois fornece dados e informações essenciais para subsidiar a tomada de decisões, a elaboração de políticas públicas e o monitoramento das condições dos recursos hídricos.

A ANA, como a principal agência federal responsável pela gestão dos recursos hídricos no Brasil, lidera o desenvolvimento e a operação do SNIRH. O sistema pode ser acessado pelo aplicativo para smartphones ou website através do portal HidroWeb.

O Portal HidroWeb é uma plataforma digital desenvolvida pela Agência Nacional de Águas (ANA) no Brasil para fornecer informações em tempo real sobre os recursos hídricos do país:

O Portal HidroWeb é uma ferramenta integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) e oferece o acesso ao banco de dados que contém todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), reunindo dados de níveis fluviais, vazões, chuvas, climatologia, qualidade da água e sedimentos (Agência Nacional De Águas, 2005).

Os dados disponíveis no Portal HidroWeb referem-se à coleta de informações hidrometeorológicas. Isso envolve o registro diário realizado por observadores e medições realizadas em campo por especialistas em hidrologia e engenheiros. Essas informações permitem acompanhar a ocorrência de eventos hidrológicos críticos, como inundações e secas, e planejar medidas para mitigar os impactos decorrentes desses eventos. Além disso, o Portal Hidrotelemetria (disponível em <http://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria>) oferece dados em tempo real.

Além de monitorar esses fenômenos, o conjunto de dados coletados até o momento no âmbito da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) também possibilita, em muitos casos, a simulação dos eventos e a previsão de seus efeitos

nas bacias hidrográficas. Informações disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas (2005).

3.7 RISCO HIDROLÓGICO

Segundo Graciosa (2010, p. 6), existe na literatura diversos conceitos para risco em função da área de conhecimento, o conceito básico é definido como um produto entre a probabilidade de ocorrência de um evento e o seu respectivo dano.

Em hidrologia, o risco traz consigo complexidades inerentes aos inúmeros fatores que podem provocar um evento de risco, como uma enchente ou uma inundação. Tratando-se de fenômenos naturais, sabe-se que a maioria apresentam grande variabilidade, resultando em certa imprevisibilidade quanto ao tempo de recorrência de eventos naturais. Por outro lado existem as cidades, que são também organismos complexos, onde as diversas redes de infraestrutura e serviços, pessoas e entidades sofrem riscos de danos que podem ser associadas à fenômenos naturais, como salientado por Miguez, Vérol e Di Gregório (2018).

De acordo com De Souza (2021, p. 38), o risco hidrológico refere-se à probabilidade de ocorrer ao menos uma cheia que se iguale ou que exceda a cheia associada a um determinado período(T_r), considerando um horizonte de projeto(n):

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^n \quad (19)$$

4 METODOLOGIA

O trabalho inicia com a aquisição de informações diversas sobre o local do estudo por meio da pesquisa bibliográfica. Essas informações consistem na descrição do local, características climáticas como pluviometria e temperatura, regime de escoamento e sazonalidade.

Em seguida, para a análise de frequência, procedeu-se a aquisição dos dados de cotas e vazões do rio Solimões na estação nº 14100000. Separadamente, cotas e vazões, foram construídas as séries históricas de máximas anuais e mínimas anuais.

A série histórica de cotas máximas foi tratada conforme mostrado na Figura 16:

Figura 16 — Fluxograma da Metodologia



Fonte: O autor (2023).

A construção da série histórica se dá com a seleção dos valores extremos

anuais. Assim, os maiores valores da cota que ocorrem em dado ano compõem a série histórica de cotas máximas. Por sua vez, os menores valores da cota compõem a série histórica de cotas mínimas. O mesmo raciocínio é aplicado com os dados de vazão para a construção da série histórica de vazões máximas e série histórica de vazões mínimas.

De cada uma dessas séries históricas se extrai a média e o desvio padrão, calculados na forma das equações (12) e (16).

O passo seguinte consiste em testar se a série histórica se adapta à função de distribuição de probabilidade Normal, para tanto, foi utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov descrito no item 3.5.2 adotando-se o nível de significância de 0,05, uma vez que o teste não rejeitou a hipótese, o trabalho prossegue com a construção do modelo estocástico baseado na média, desvio padrão e na função de distribuição de probabilidade Normal.

Do modelo se extrai o período de retorno associado a cada valor de cota ou vazão, máxima ou mínima anual. Com esse período de retorno, é calculado o risco hidrológico.

O mesmo procedimento mostrado acima foi aplicado para a série histórica de cotas mínimas, vazões máximas e vazões mínimas.

5 RESULTADOS

5.1 LOCAL DO ESTUDO

O município de Manacapuru está localizado no estado do Amazonas, na bacia do rio Solimões, aproximadamente 85 km distante da capital. O município faz fronteira com os municípios de Anamá, Caapiranga e Novo Airão e possui uma área de aproximadamente 7.330 km (IBGE, 2010).

Os dados utilizados neste trabalho são referentes à estação fluviométrica de código nº14100000 de Manacapuru (Figura 17), situada no Estado do Amazonas, é um dos principais locais de coleta de dados hidrológicos da bacia do rio Solimões, responsável por drenar neste ponto uma área de 2.200.000 km². A estação de Manacapuru é a última estação fluviométrica antes da confluência com o Rio Negro.

Figura 17 — Localização da Estação Fluviométrica 14100000 - Manacapuru



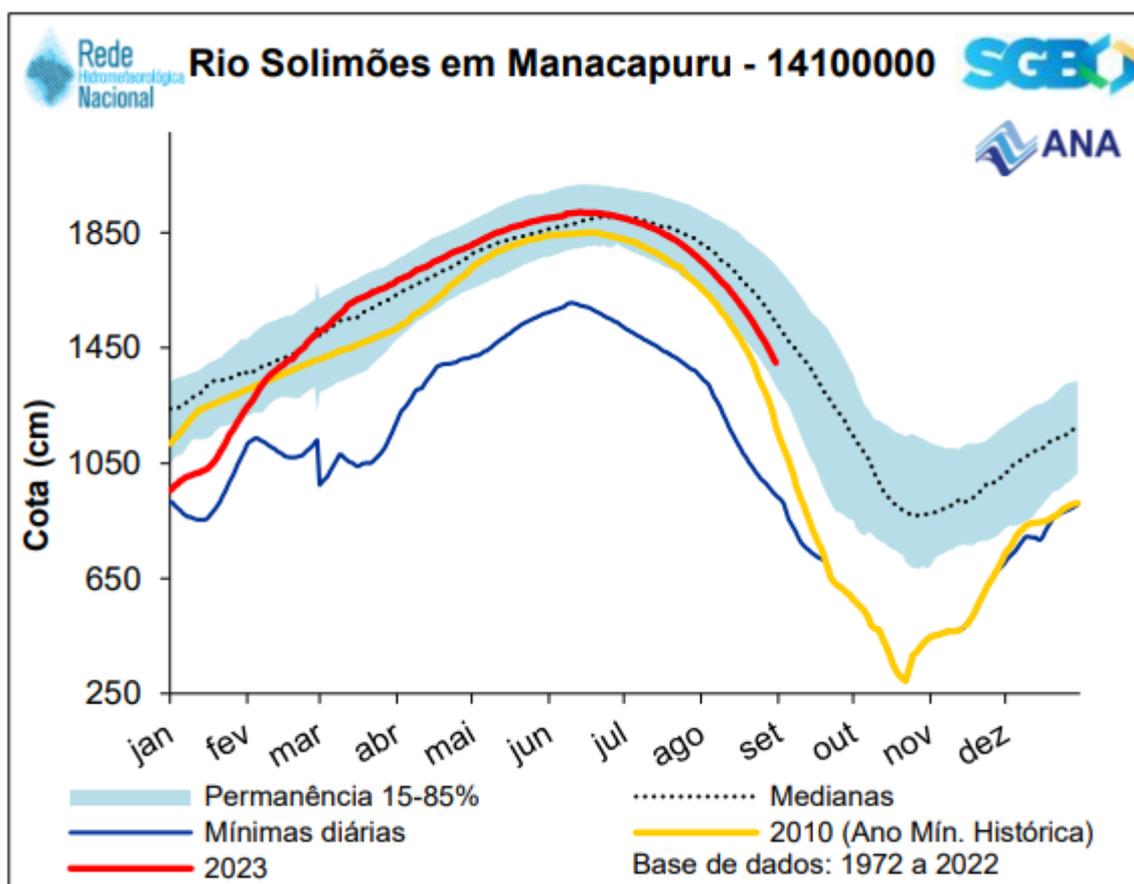
Fonte: Google Earth (2023).

A estação entrou em operação no ano de 1972, faz parte da rede hidrometeorológica nacional, gerenciada pela ANA. A estação 14100000 - Manacapuru é operada pela CPRM, e são registrados dados de cotas, vazões, qualidade da água e sedimentos.

5.2 CARACTERÍSTICAS FLUVIAIS E CLIMÁTICAS

Conforme podemos observar no cotograma da Figura 18, na estação 14100000 - Manacapuru, o rio Solimões tem um comportamento conhecido como regime equatorial, caracterizado por apresentar picos de cheia nos meses de maio à julho, enquanto que o período de seca ocorre de outubro a dezembro (Molinier *et al.*, 1995).

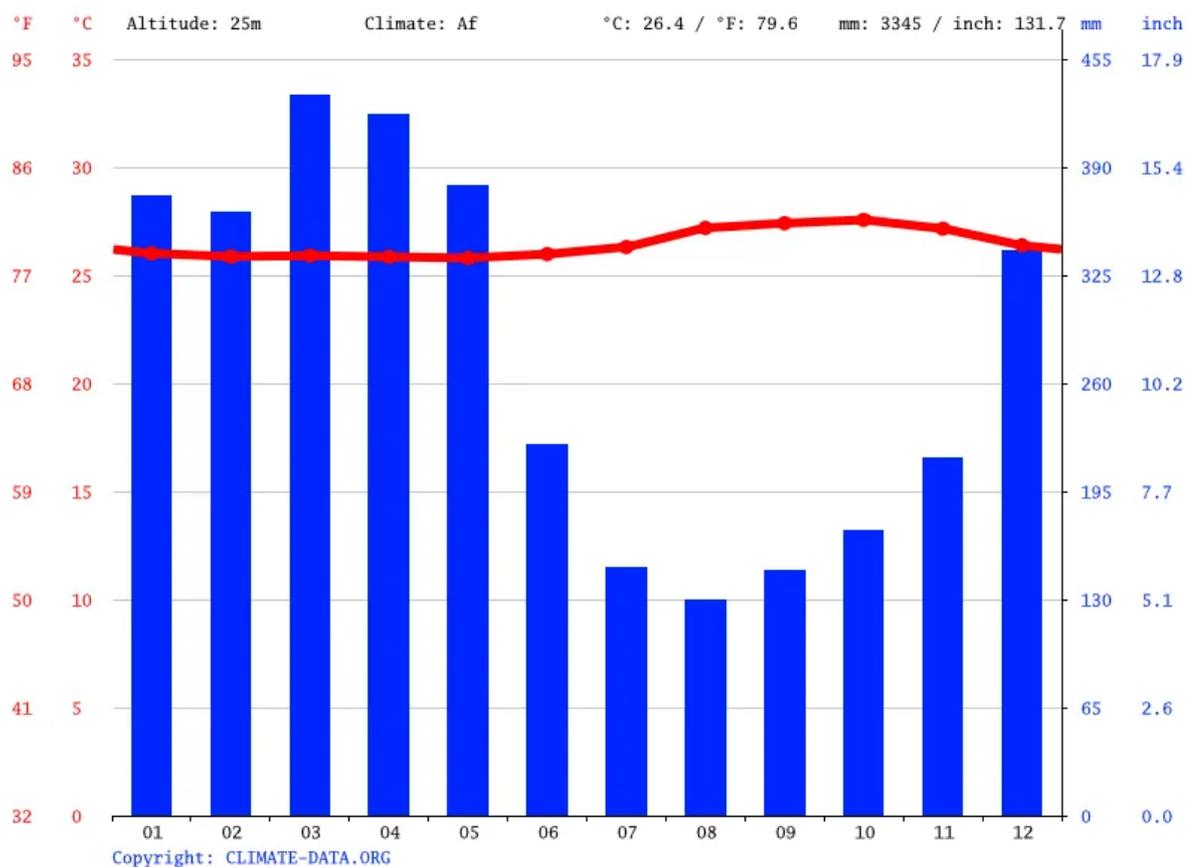
Figura 18 — Cotograma Estação 14100000 - Manacapuru



Fonte: SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM (2023).

Os rios da Bacia Amazônica têm seu regime governado pela distribuição não uniforme da pluviosidade, no rio Solimões, em Manacapuru, a média de chuva é de 3.345 mm/ano. A temperatura média anual é de 26,4°C.

Figura 19 — Médias mensais de precipitação e temperatura em Manacapuru



Fonte: Climate Data.

Segundo Santos *et al.* (2001), a água "esbranquiçada" do Solimões tem a sua cor e o aspecto turvo devido aos sedimentos carregados em suspensão: argilas, siltes e areias finas (nas enchentes) em quantidades de 37 mg/l nas épocas de seca e 165 mg/l nas enchentes. O rio Solimões é alvo de muitos estudos devido a grande quantidade de sedimentos que carrega, denominado vazão ou descarga sólida, que é a massa total de sedimentos que atravessa uma seção transversal em um determinado tempo, expressa usualmente em toneladas por dia.

A carga total de sedimentos pode ser destrinchada em carga dissolvida, composta basicamente pelos constituintes intemperizados das rochas transportado em solução química sobretudo por meio de escoamento subterrâneo; carga em suspensão, que por sua vez são partículas finas, pequenas o suficiente para serem transportadas na água devido ao escoamento turbulento formando solução heterogênea; e a carga do leito, que são as partículas de granulometria maior que são transportadas por meio de arraste e rolamento no fundo do canal, conforme Santos *et al.* (2001, p. 238-241).

O gradiente do canal do Solimões, desde a confluência com o Ucajali no

Peru, é de 1 cm/km na estação de seca e quase o dobro, na estação da águas altas de acordo com Sioli (1984).

Não obstante, a velocidade é de 0,5-1 m/s até 2,5 m/s, conforme vemos na Tabela 1. "Isso é explicado pela quase ausência de atrito da grande massa de água no leito e nas margens da grande seção transversal." (Franzinelli, 2011, p. 590).

Tabela 1 — Características hidráulicas, hidroquímicas e sedimentológicas dos rios Solimões e Negro na altura do encontro das águas

Variáveis	Rio Solimões	Rio Negro
Área das bacias	2.200.000 km ²	600.000 km ²
Amplitude média	2-5 km	3-20 km (máxima no Baixo Rio Negro)
Profundidade média	20-35 m	20-30 m (90 máxima próximo ao encontro das águas)
Descarga líquida média	100.000 m ³ /s	30.000 m ³ /s
ph	6,2-7,2	3,8-4,9
Descarga sólida	700 x 10 ⁶ mt/ano	6 x 10 ⁶ mt/ano
Carga dissolvida	205 x 10 ⁶ t/ano	5,7 x 10 ⁶ t/ano
Sedimentos de fundo	Areia grossa, média e fina	argila solta de cor creme
Velocidade da corrente	0,5-1 m/s (2-2,5 m/s na vazante)	1 cm/s
Temperatura	29° ± 1° C	30° ± 1° C

Fonte: Franzinelli (2011).

5.3 REGIME DE ESCOAMENTO E SAZONALIDADE

O clima na região Amazônica, onde está localizado o rio Solimões é identificado como equatorial quente e úmido, por conta da sua posição geográfica na América do Sul, caracterizado por chover praticamente o ano todo e ainda assim fazer muito calor conforme o IBGE (2010).

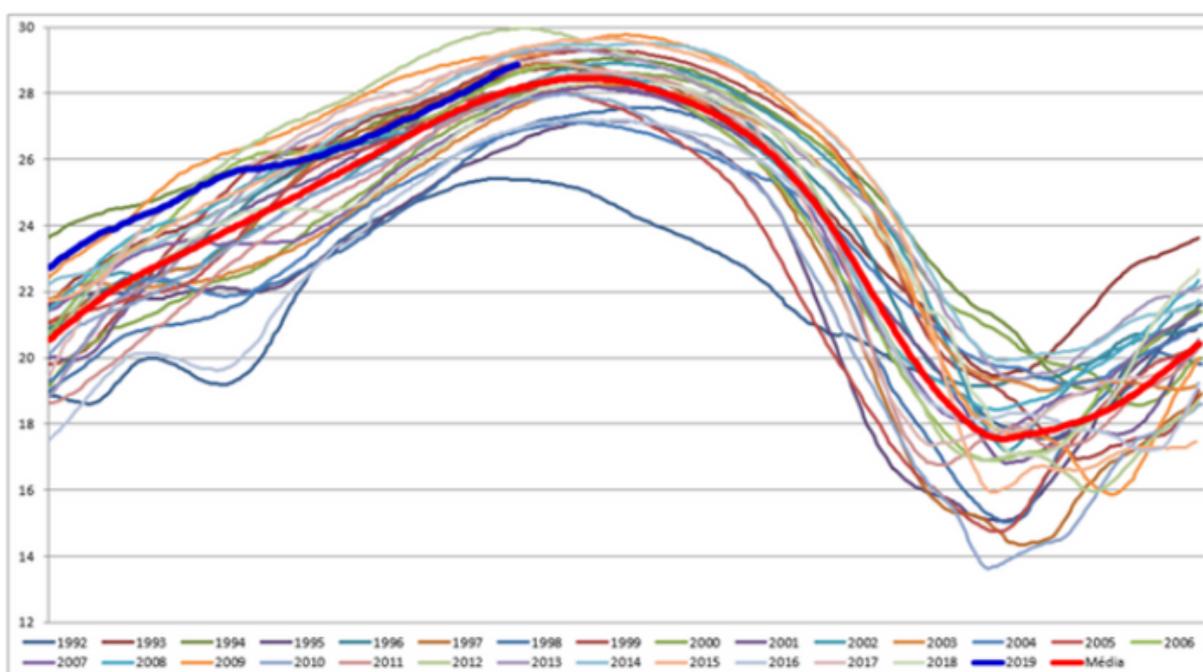
As temperaturas na região hidrográfica do Solimões variam entre 25° e 29°C. As precipitações ocorridas na Bacia são oriundas sobretudo do Oceano Atlântico, e a floresta recicla aproximadamente metade do volume precipitado por meio da evapotranspiração. A sazonalidade das precipitações se destaca por caracterizar uma estação de chuvas intensas durante os meses de novembro a março, e período de seca, com poucas chuvas no período de maio a setembro, sendo assim o período de transição entre os regimes se dão nos meses de abril e outubro

(Aves, 2019, p. 63).

Com base nos registros hidrometeorológicos, a enchente do rio Solimões começa no mês novembro ou dezembro, indo até o mês de junho ou julho. Por sua vez, a vazante inicia nos meses restantes do ano.

Conforme o estudo realizado por Aves (2019), o rio Solimões passa de seis a sete meses enchendo e leva de quatro a cinco meses para chegar ao nível mínimo. É comum que seja observado em meados do mês de setembro, normalmente o período de maior estiagem, uma descida de 1 centímetro por hora, isto significa aproximadamente 24 cm/dia, por esta razão o tempo de vazante é consideravelmente menor que o tempo de enchente.

Figura 20 — Regime hidrológico do rio Solimões (1992-2019)

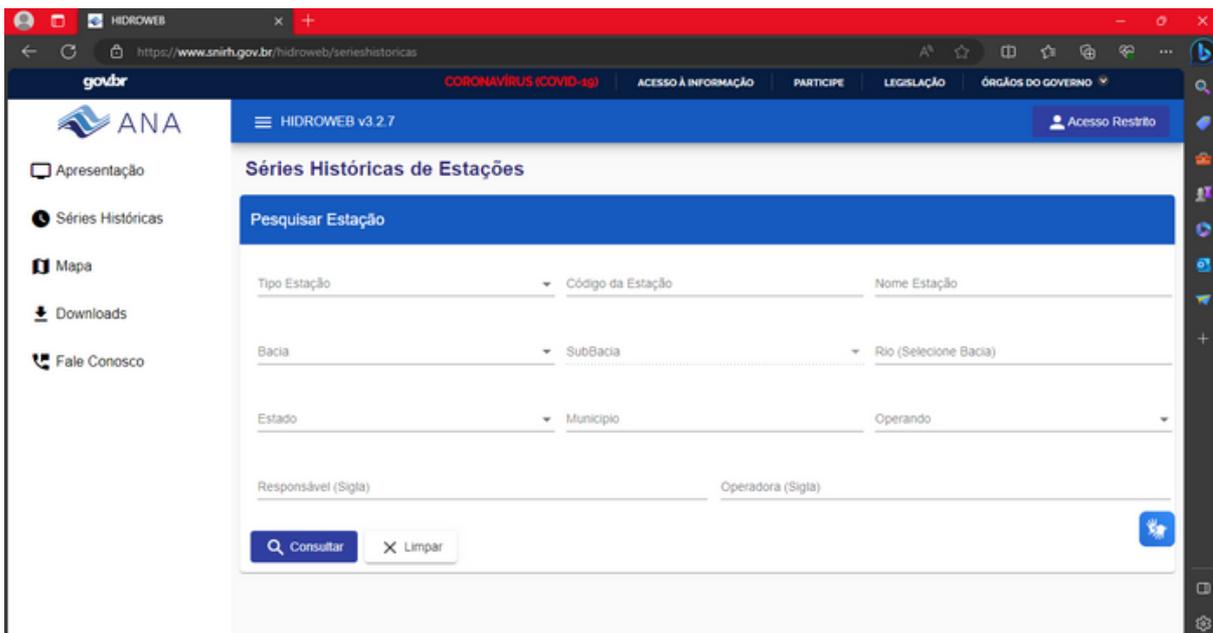


Fonte: Aves (2019, p. 64).

5.4 DADOS ADQUIRIDOS

Os dados hidrológicos foram obtidos junto ao Sistema Nacional de Informações de Recursos Hídricos da Agência Nacional de Águas (ANA), por meio da plataforma HidroWeb disponível na internet e consultada no dia 03 de julho de 2023 (Figura 21). Os dados são referentes a estação de código nº 14100000 - Manacapuru.

Figura 21 — Interface do Sítio HidroWeb para Acesso aos Dados de Séries Históricas



The screenshot shows the HidroWeb v3.2.7 interface. The main heading is 'Séries Históricas de Estações'. Below it is a search form titled 'Pesquisar Estação'. The form contains several input fields:

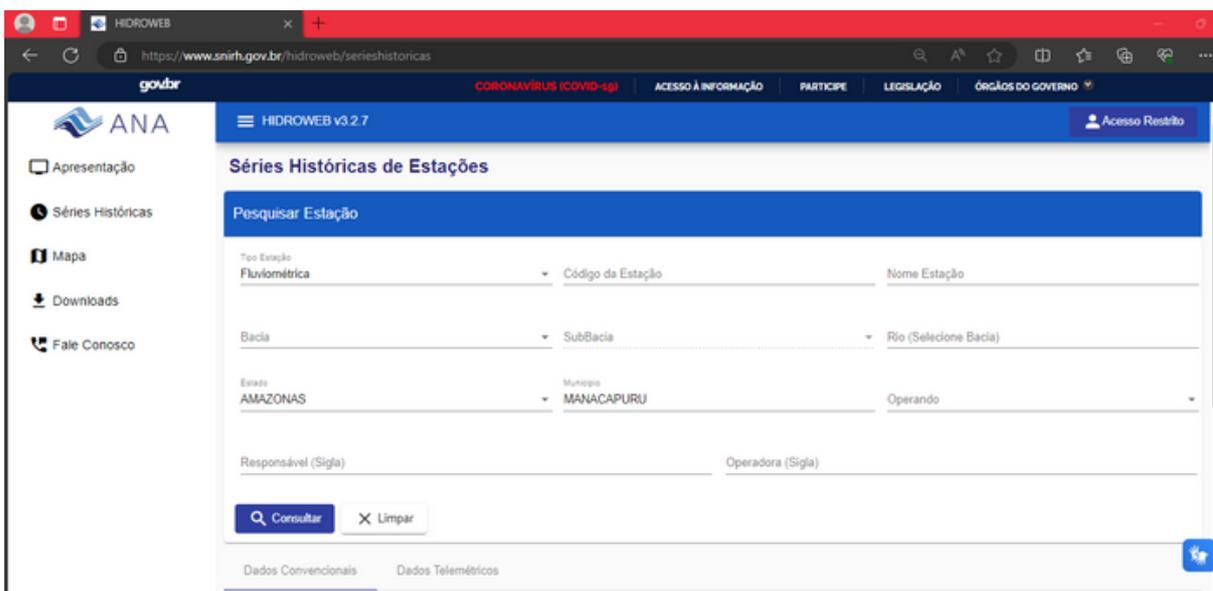
- Tipo Estação (dropdown)
- Código da Estação (text input)
- Nome Estação (text input)
- Bacia (dropdown)
- SubBacia (dropdown)
- Rio (Selecione Bacia) (dropdown)
- Estado (dropdown)
- Município (dropdown)
- Operando (dropdown)
- Responsável (Sigla) (text input)
- Operadora (Sigla) (text input)

At the bottom of the form are two buttons: 'Consultar' (with a magnifying glass icon) and 'Limpar' (with an 'X' icon). A blue search icon is also visible in the bottom right corner of the form area.

Fonte: O autor (2023).

As séries históricas podem ser pesquisadas e acessadas por meio de um simples preenchimento de alguns campos para localização da estação requerida, como o tipo de estação, se pluviométrica ou fluviométrica, nome do rio, nome ou código da estação, estado e/ou município, entre outros, não sendo preciso o preenchimento de todos os campos necessariamente, como demonstrado abaixo na Figura 22:

Figura 22 — Formulário para Pesquisa de dados hidrológicos



This screenshot shows the same 'Pesquisar Estação' form as in Figure 21, but with specific values entered:

- Tipo Estação: Fluviométrica
- Bacia: (empty)
- SubBacia: (empty)
- Rio (Selecione Bacia): (empty)
- Estado: AMAZONAS
- Município: MANACAPURU
- Operando: (empty)
- Responsável (Sigla): (empty)
- Operadora (Sigla): (empty)

The 'Consultar' and 'Limpar' buttons are visible at the bottom of the form. Below the form, there are two tabs: 'Dados Convencionais' and 'Dados Telemétricos'.

Fonte: O autor (2023).

O site retorna uma lista de estações correspondentes aos campos preenchidos, portanto, quanto mais campos forem preenchidos, mas precisa será a busca. Foi selecionada a estação referida acima e os dados brutos foram baixados no arquivo em formato CSV, como visível na Figura 23:

Figura 23 — Resultados da pesquisa no HidroWeb

The screenshot shows the 'Estações Convencionais' section of the HidroWeb interface. It contains a table with the following data:

Selecionar	Código	Nome Estação	Tipo Estação
<input type="checkbox"/>	14070000	MANACAPURU MONTANTE	Fluviométrica
<input type="checkbox"/>	14090000	RIO SOLIMÕES	Fluviométrica
<input checked="" type="checkbox"/>	14100000	MANACAPURU	Fluviométrica
<input type="checkbox"/>	14222000	RIO MIRITI - MONTANTE	Fluviométrica
<input type="checkbox"/>	14223000	RIRIO MIRITI	Fluviométrica

Below the table, there is a 'Tipo de Arquivo' section with three radio buttons: 'Arquivo Access (.MDB)', 'Arquivo Texto (.TXT)', and 'Arquivo Excel (.CSV)'. The 'Arquivo Excel (.CSV)' option is selected. A 'Baixar Arquivo' button is visible to the right. The page also shows pagination information: 'Qtd. por página: 5' and '1 - 5 / 5'.

Fonte: O autor (2023).

5.5 TRATAMENTO DE DADOS

5.5.1 Séries históricas

Com os dados de cotas e vazões dos anos 1972-2022 foram construídas as Série Histórica:

- Série histórica de cotas máximas;
- Série histórica de cotas mínimas;
- Série histórica de vazões máximas;
- Série histórica de vazões mínimas.

As séries acima referidas são apresentadas na Tabela 2 - Série histórica das cotas máximas e mínimas e Tabela 3 - Série histórica das vazões máximas e mínimas:

Tabela 2 — Série Histórica das Cotas Máximas e Cotas Mínimas (continua)

ANO	COTAS MÁXIMAS (m)	COTAS MÍNIMAS (m)
1972	19,23	10,66
1973	19,22	11,45
1974	19,09	12,51
1975	19,72	10,03
1976	19,99	8,84
1977	19,09	11,15
1978	18,75	10,95
1979	18,70	7,89
1980	16,27	8,45
1981	17,45	7,74
1982	19,44	8,76
1983	17,13	7,48
1984	18,57	9,91
1985	16,60	10,30
1986	19,27	11,81
1987	18,98	8,40
1988	18,33	8,26
1989	19,94	9,38
1990	19,19	7,04
1991	18,62	6,66
1992	16,23	8,28
1993	19,55	10,05
1994	19,80	7,83
1995	17,78	5,52
1996	19,11	9,41
1997	19,52	4,95
1998	18,28	5,57
1999	20,03	7,49
2000	19,14	8,57
2001	18,86	7,43
2002	19,56	8,01
2003	19,02	9,85
2004	17,58	10,22

Tabela 2 — Série Histórica das Cotas Máximas e Cotas Mínimas (conclusão)

ANO	COTAS MÁXIMAS (m)	COTAS MÍNIMAS (m)
2005	18,72	5,08
2006	19,27	7,48
2007	18,76	8,08
2008	19,06	8,72
2009	20,46	7,68
2010	18,50	4,12
2011	18,97	6,97
2012	20,73	6,72
2013	20,17	9,82
2014	20,33	10,88
2015	20,78	6,91
2016	18,26	9,15
2017	19,91	8,56
2018	19,04	7,77
2019	20,23	8,84
2020	19,29	7,42
2021	20,78	10,02
2022	20,46	11,28

Fonte: O autor (2023).

Tabela 3 — Série Histórica das Vazões Máximas e Vazões Mínimas (continua)

ANO	VAZÃO MÁXIMA (m³/s)	VAZÃO MÍNIMA (m³/s)
1972	143680,44	72516,42
1973	143573,48	77623,21
1974	142185,72	84683,15
1975	148957,95	68540,28
1976	151896,38	61267,35
1977	142185,72	75668,21
1978	138580,16	74375,55
1979	138052,86	55688,79
1980	113349,62	58952,47
1981	125117,48	54826,75
1982	145933,48	60789,71

Tabela 3 — Série Histórica das Vazões Máximas e Vazões Mínimas (continuação)

ANO	VAZÃO MÁXIMA (m³/s)	VAZÃO MÍNIMA (m³/s)
1983	121883,21	53344,84
1984	136685,42	67792,72
1985	116596,66	70233,79
1986	136895,47	79994,42
1987	137315,92	59188,31
1988	134174,36	57837,15
1989	151350,59	64528,82
1990	136685,42	54597,75
1991	137210,77	49708,75
1992	112958,38	57954,16
1993	147118,89	68665,18
1994	149717,69	74762,45
1995	128383,41	42684,57
1996	142398,89	64711,91
1997	146795,25	39758,01
1998	133653,42	42945,09
1999	152333,53	53401,55
2000	142718,88	59720,29
2001	139742,86	53118,24
2002	147226,83	56382,13
2003	141440,56	67482,16
2004	126440,45	69730,35
2005	138263,69	40418,43
2006	144108,58	53344,84
2007	138685,72	56788,09
2008	141866,19	60551,43
2009	157062,58	54483,39
2010	135951,23	29863,17
2011	140909,20	50539,09
2012	160059,61	49103,21
2013	153867,27	67420,12
2014	155627,14	73347,59
2015	154552,19	52416,09

Tabela 3 — Série Histórica das Vazões Máximas e Vazões Mínimas (conclusão)

ANO	VAZÃO MÁXIMA (m ³ /s)	VAZÃO MÍNIMA (m ³ /s)
2016	130942,70	57184,78
2017	146081,97	57910,01
2018	137994,58	56890,92
2019	149145,70	62775,73
2020	140302,98	55094,91
2021	145701,75	69773,02
2022	151420,53	77809,66

Fonte: O autor (2023).

5.5.2 Média e desvio padrão

O tratamento seguinte foi calcular a média e o desvio padrão de cada uma das quatro séries, os resultados são mostrados no Quadro 1 - Parâmetros estatísticos: média e desvio padrão das cotas; e no Quadro 2 - Parâmetros estatísticos: média e desvio padrão das vazões:

Quadro 1 — Parâmetros Estatísticos: média e desvio padrão das cotas

Média Cotas Máximas (m)	Desvio Padrão Cotas Máximas (m)
19,05	1,07
Média Cotas Mínimas (m)	Desvio Padrão Cotas Mínimas (m)
8,56	1,85

Fonte: O autor (2023).

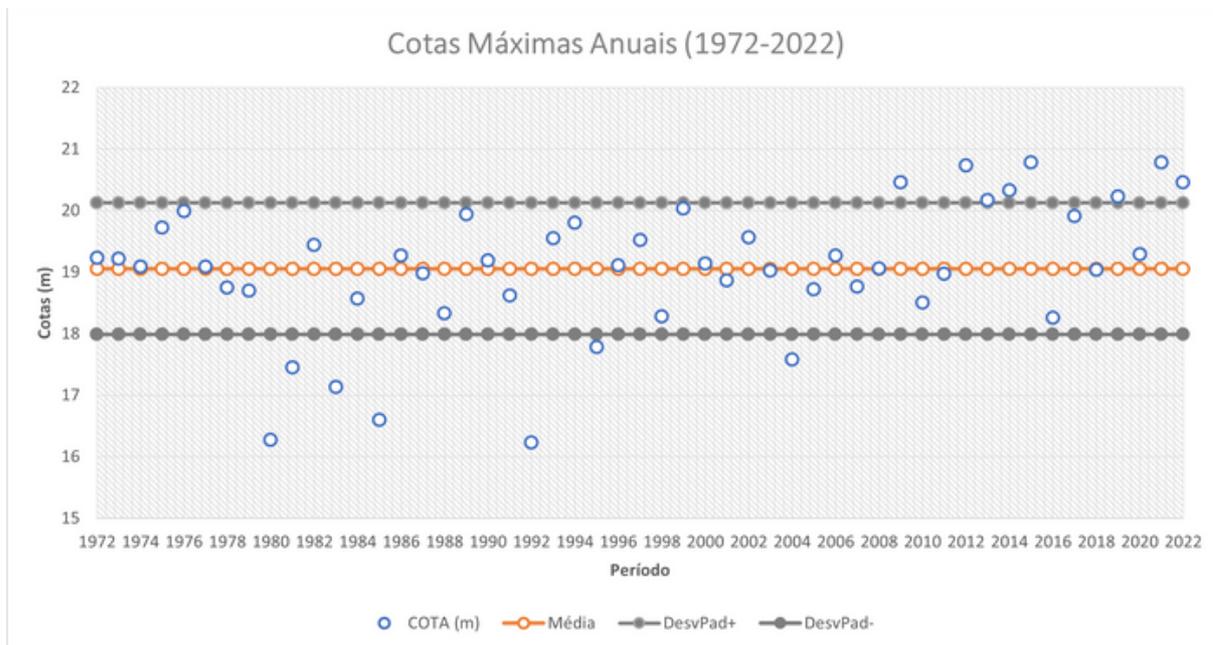
Quadro 2 — Parâmetros Estatísticos: média e desvio padrão das vazões

Média Vazões Máximas (m³/s)	Desvio Padrão Vazões Máximas (m³/s)
140.701,64	10.531,55
Média Vazões Mínimas (m³/s)	Desvio Padrão Vazões Mínimas (m³/s)
60.376,25	11.252,09

Fonte: O autor (2023).

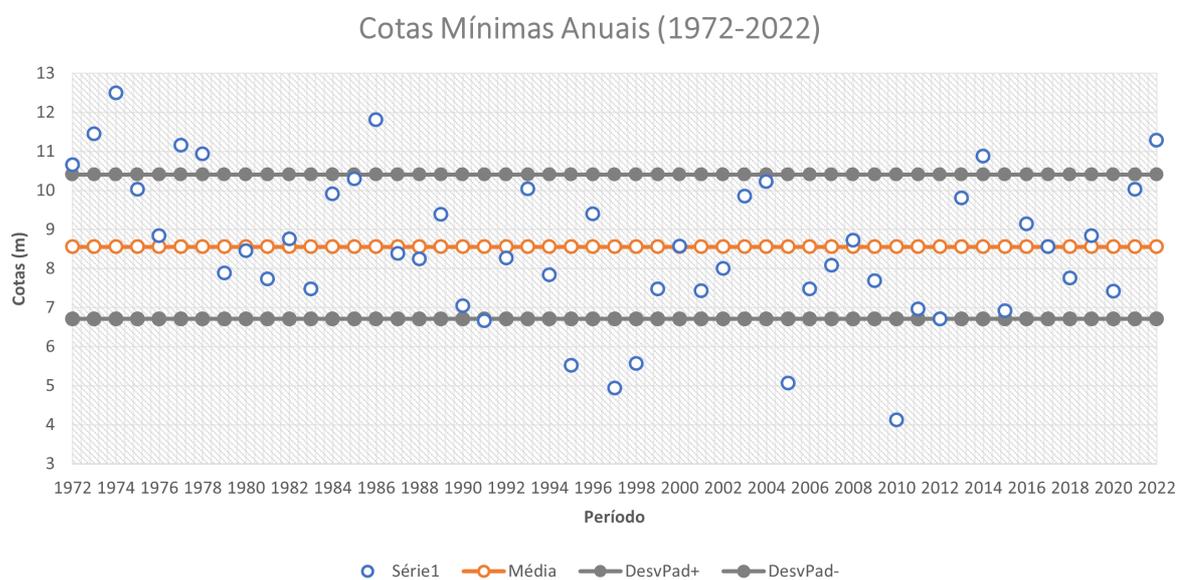
A seguir para melhor visualizar a distribuição dos dados em torno da média e do desvio padrão foram elaborados: Figura 24 - Cotas Máximas Anuais, estação 14100000 - Manacapuru; Figura 25 - Cotas Mínimas Anuais, estação 14100000 - Manacapuru; Figura 26 - Vazões Máximas Anuais, estação 14100000 - Manacapuru e Figura 27 - Vazões Mínimas Anuais, estação 14100000 - Manacapuru.

Figura 24 — Cotas Máximas Anuais, estação 14100000 - Manacapuru



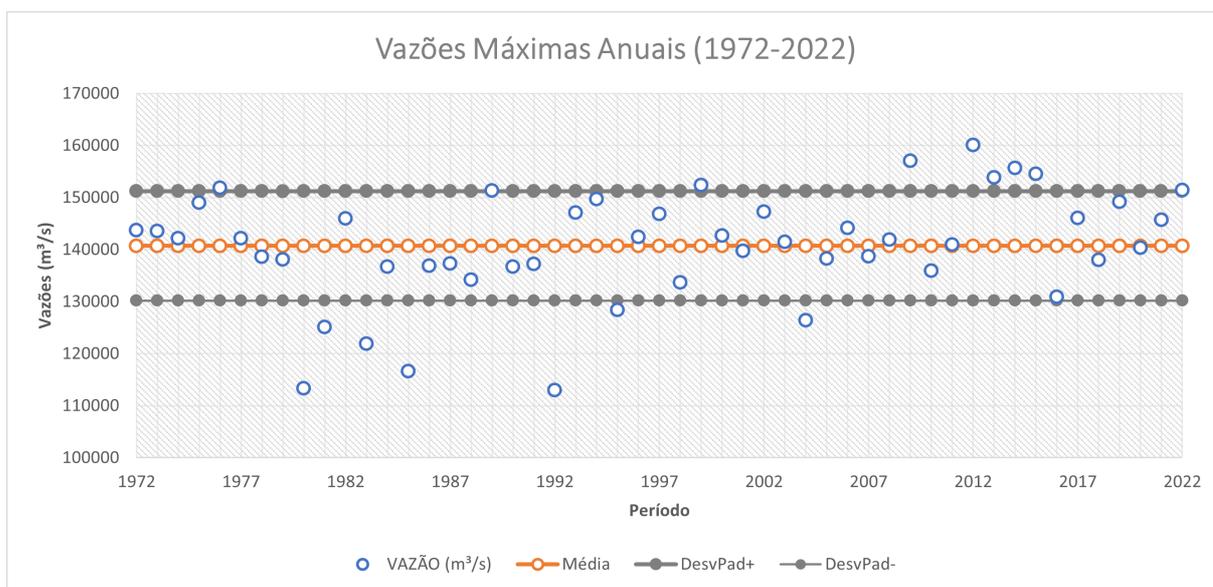
Fonte: O autor (2023).

Figura 25 — Cotas Mínimas Anuais, estação 14100000 - Manacapuru



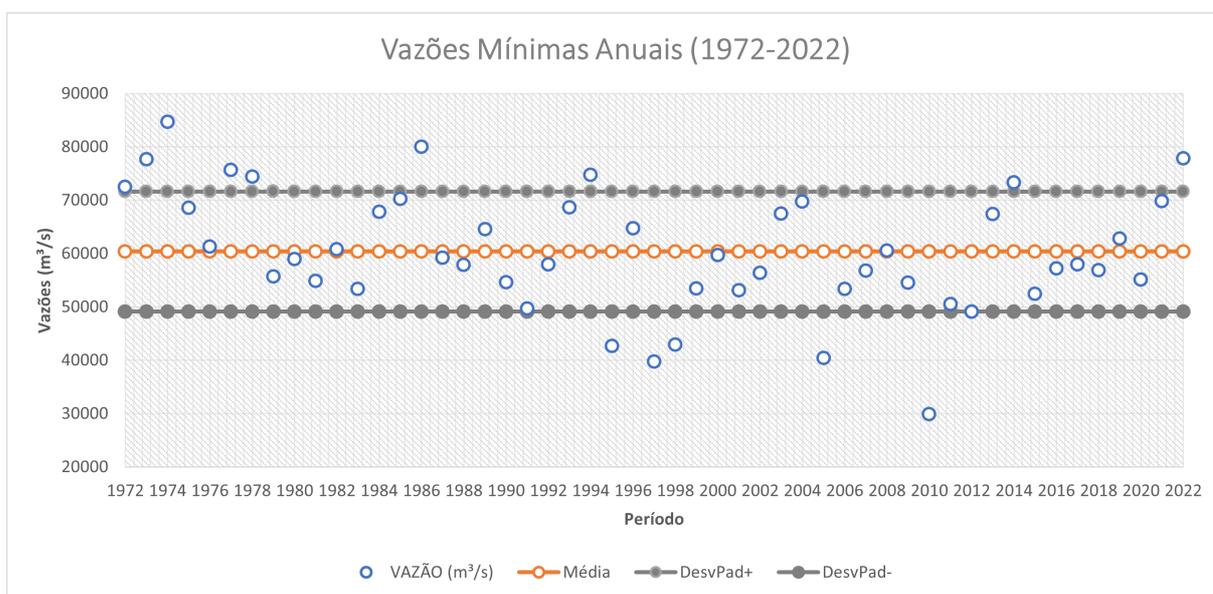
Fonte: O autor (2023).

Figura 26 — Vazões Máximas Anuais, estação 14100000 - Manacapuru



Fonte: O autor (2023).

Figura 27 — Vazões Mínimas Anuais, estação 14100000 - Manacapuru



Fonte: O autor (2023).

5.5.3 Teste de aderência à distribuição de probabilidade normal

Para verificar a aderência a uma distribuição de probabilidade, toma-se como hipótese que a distribuição empírica segue a função de distribuição de probabilidade escolhida, que no caso, foi a distribuição Normal. Para validar essa hipótese foi aplicado o teste de Kolmogorov-Smirnov (KS).

As quatro séries apresentam N=51. O nível de significância adotado foi 0,05, sendo

o

D

crítico

$D_{51;0.05} = 0,190438091$. O resultado do teste é mostrado abaixo no Quadro 3 - Teste de Aderência de KS:

Quadro 3 — Teste de Aderência de KS

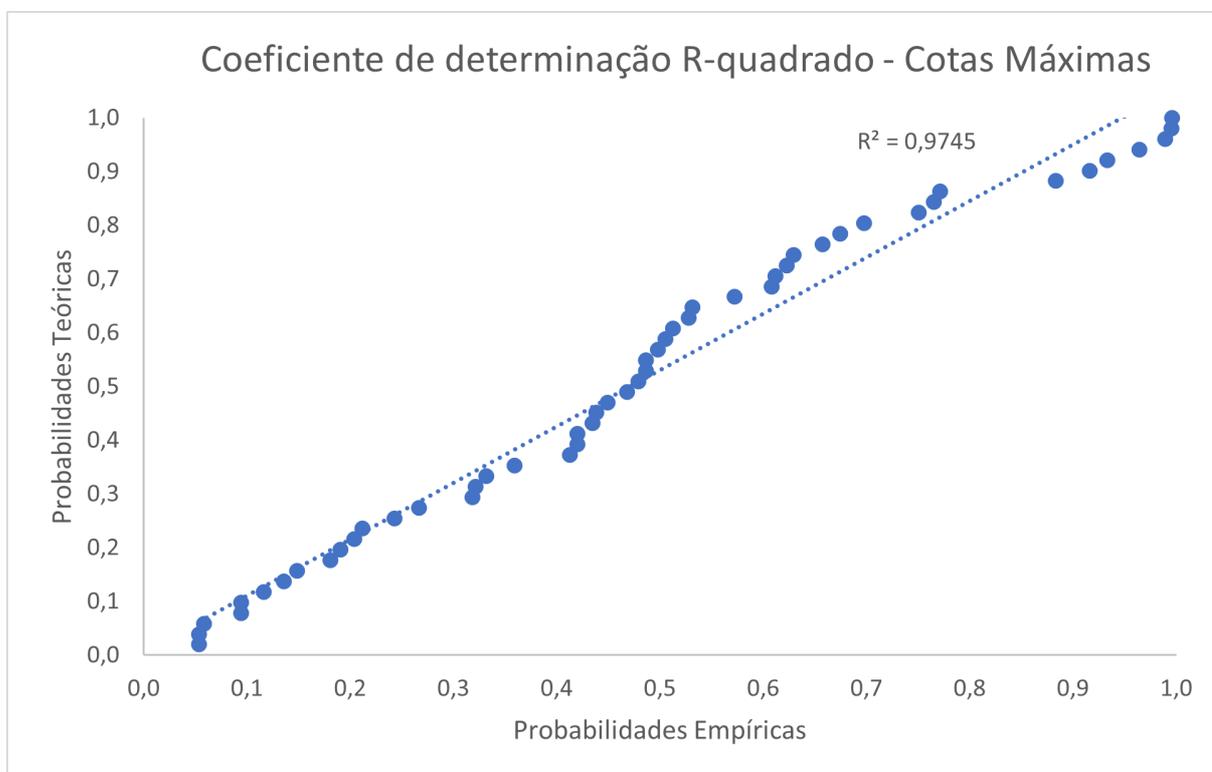
Cotas Máximas	Cotas Mínimas
$D_{máx} = 0,11571606 < D_{51;0.05}$	$D_{máx} = 0,066383268 < D_{51;0.05}$
Vazões Máximas	Vazões Mínimas
$D_{máx} = 0,135784995 < D_{51;0.05}$	$D_{máx} = 0,076282462 < D_{51;0.05}$

Fonte: O autor (2023).

De onde se verifica que todas as quatro séries aderem a distribuição de probabilidade Normal, pois as hipóteses não foram rejeitadas no teste de Kolmogorov Smirnov.

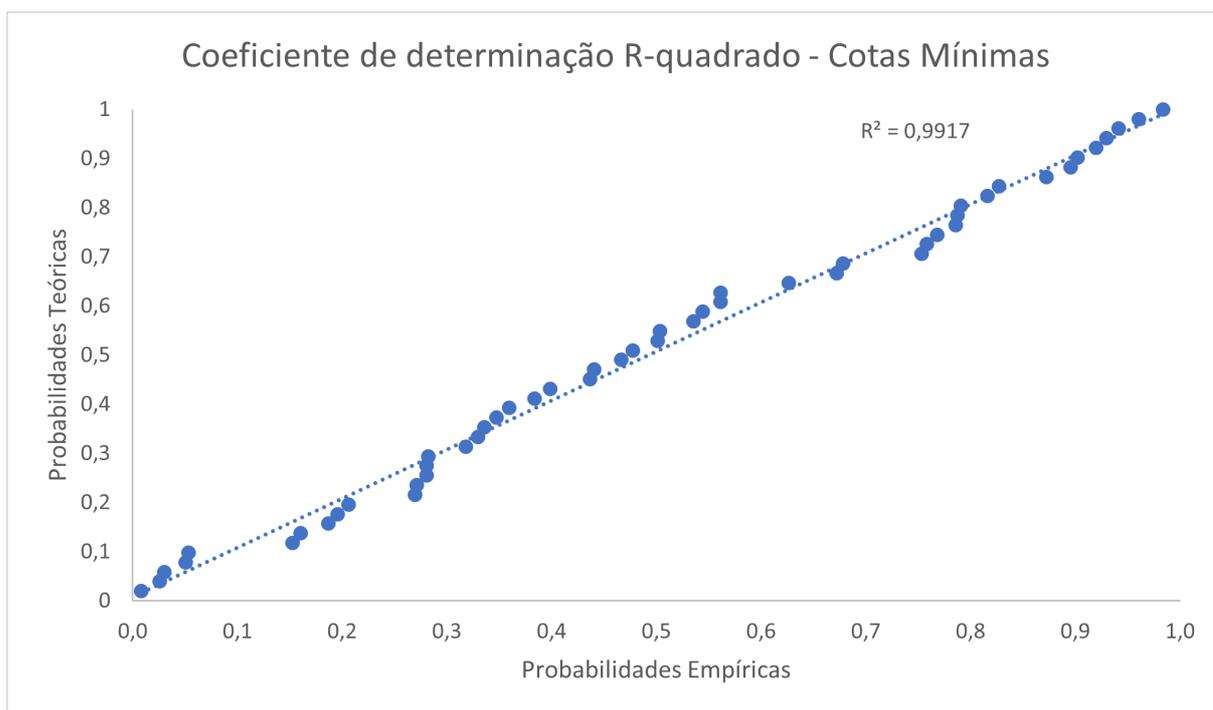
Suplementarmente para visualizar quão próximos os dados empíricos estão da série obtida pela aplicação da distribuição Normal, foi aplicado o coeficiente de determinação R-quadrado como mostrado nas Figuras 28 a 31:

Figura 28 — Coeficiente R-quadrado Cotas Máximas



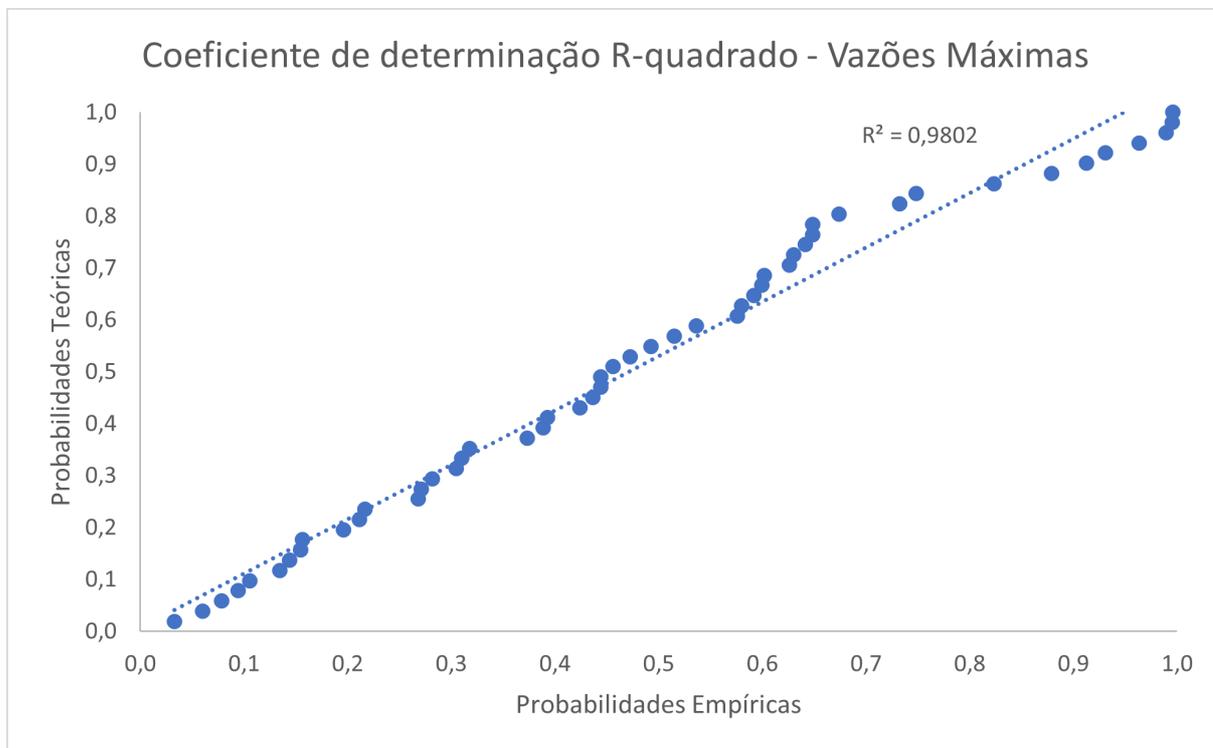
Fonte: O autor (2023).

Figura 29 — Coeficiente R-quadrado Cotas Mínimas



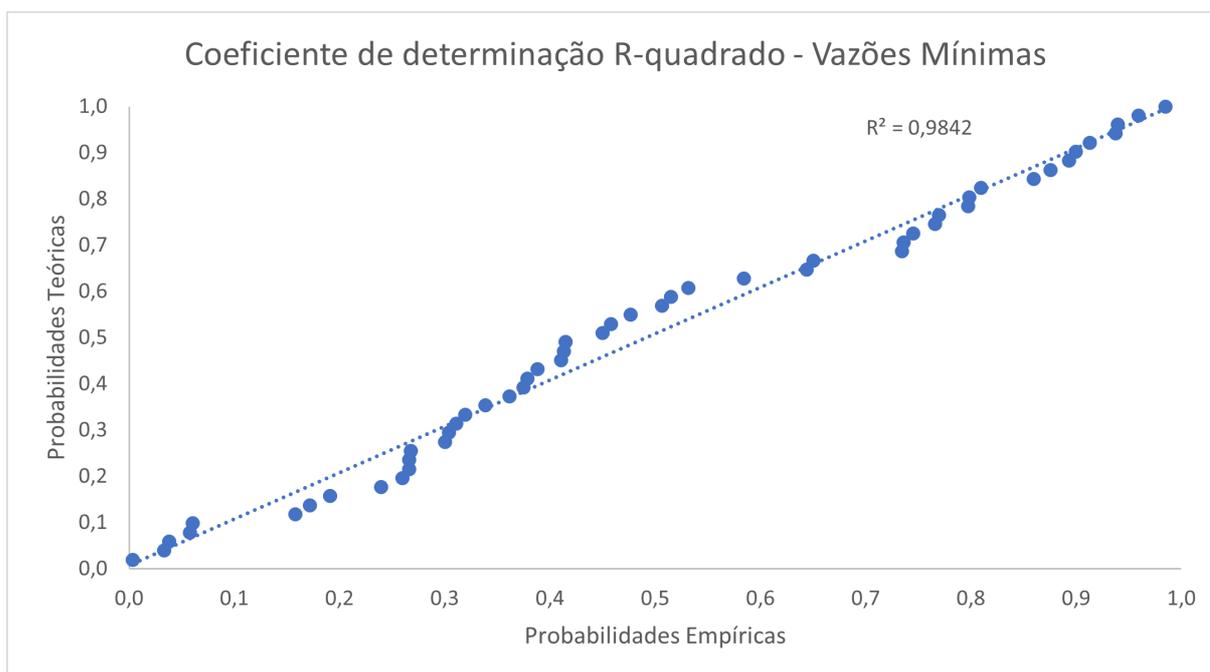
Fonte: O autor (2023).

Figura 30 — Coeficiente R-quadrado Vazões Máximas



Fonte: O autor (2023).

Figura 31 — Coeficiente R-quadrado Vazões Mínimas



Fonte: O autor (2023).

Desta forma, o tratamento estatístico dos dados foi concluído e estão prontos para que se proceda à análise de frequência.

5.6 ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DAS COTAS MÁXIMAS E RISCO HIDROLÓGICO

Abaixo, na Tabela 4, é apresentada a análise de frequência para a cota máxima provável na estação 14100000 - Manacapuru e respectivo risco hidrológico:

Tabela 4 — Análise de Frequência - Cotas Máximas (continua)

Tr (anos)	Risco Hidrológico	Cota Máxima Anual Provável (m)
2	50,00%	19,05
5	20,00%	19,95
10	10,00%	20,42
25	4,00%	20,93
50	2,00%	21,25
75	1,33%	21,42
100	1,00%	21,54
250	0,40%	21,89
500	0,20%	22,13

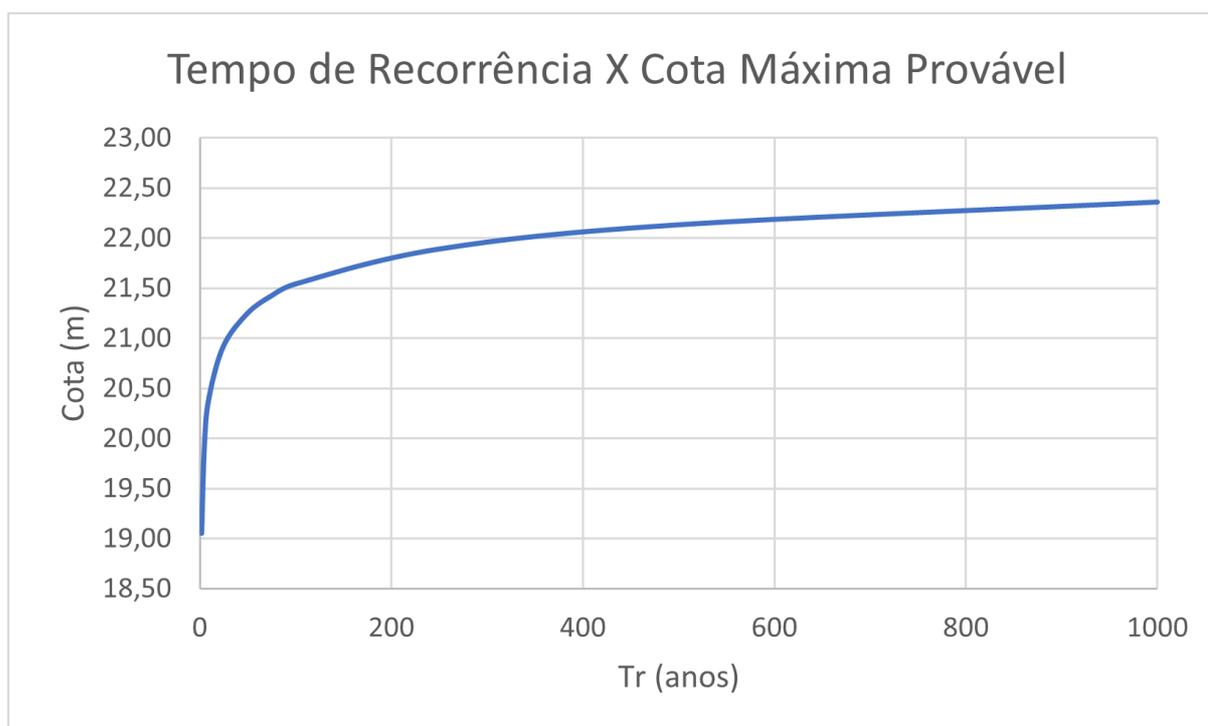
Tabela 4 — Análise de Frequência - Cotas Máximas (conclusão)

Tr (anos)	Risco Hidrológico	Cota Máxima Anual Provável (m)
1000	0,10%	22,36

Fonte: O autor (2023).

Valores diferentes dos que constam na tabela acima podem ser lidos no gráfico da Figura 32:

Figura 32 — Tr x Cota Máxima Provável



Fonte: O autor (2023).

5.7 ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DAS COTAS MÍNIMAS E RISCO HIDROLÓGICO

Abaixo, na Tabela 5, é apresentada a análise de frequência para a cota mínima provável na estação 14100000 - Manacapuru e respectivo risco hidrológico:

Tabela 5 — Análise de Frequência - Cotas Mínimas (continua)

Tr (anos)	Risco Hidrológico	Cota Mínima Anual Provável (m)
2	50,00%	8,56
5	20,00%	7,00
10	10,00%	6,19

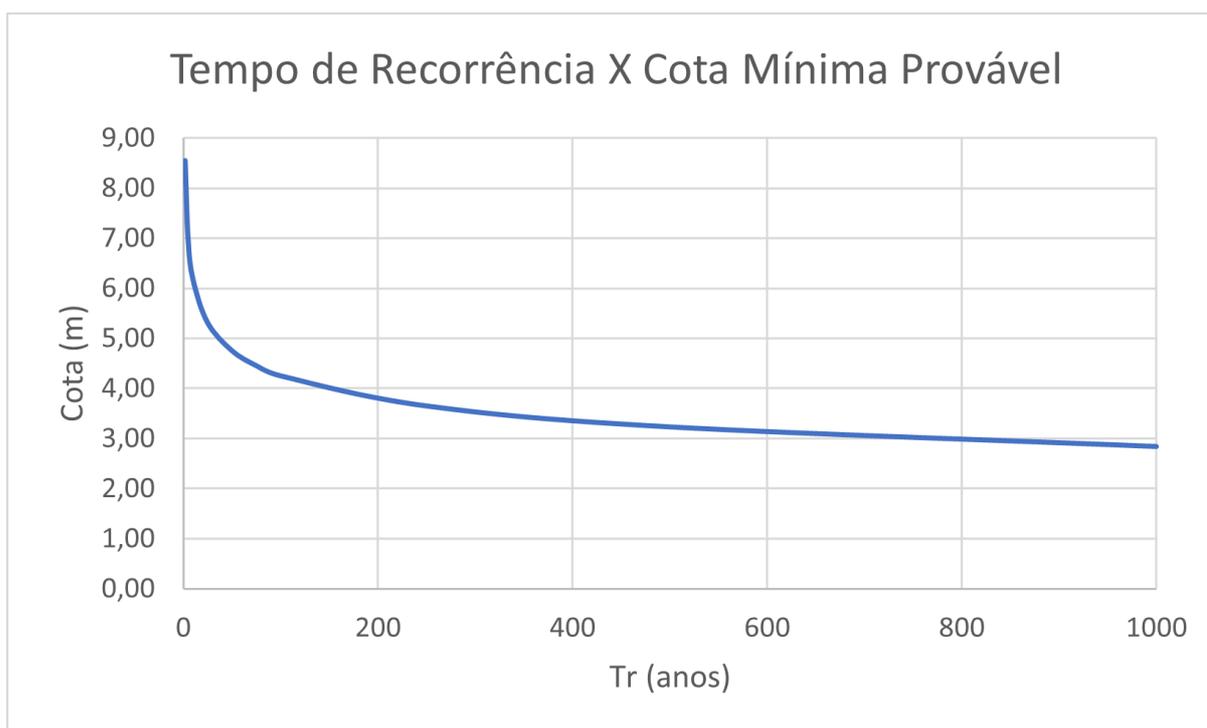
Tabela 5 — Análise de Frequência - Cotas Mínimas (conclusão)

Tr (anos)	Risco Hidrológico	Cota Mínima Anual Provável (m)
25	4,00%	5,32
50	2,00%	4,76
75	1,33%	4,46
100	1,00%	4,25
250	0,40%	3,65
500	0,20%	3,23
1000	0,10%	2,84

Fonte: O autor (2023).

Valores diferentes dos que constam na tabela acima podem ser lidos no gráfico da Figura 33:

Figura 33 — Tr x Cota Mínima Provável



Fonte: O autor (2023).

5.8 ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DAS VAZÕES MÁXIMAS E RISCO HIDROLÓGICO

Abaixo, na Tabela 6, é apresentada a análise de frequência para a vazão máxima provável na estação 14100000 - Manacapuru e respectivo risco hidrológico:

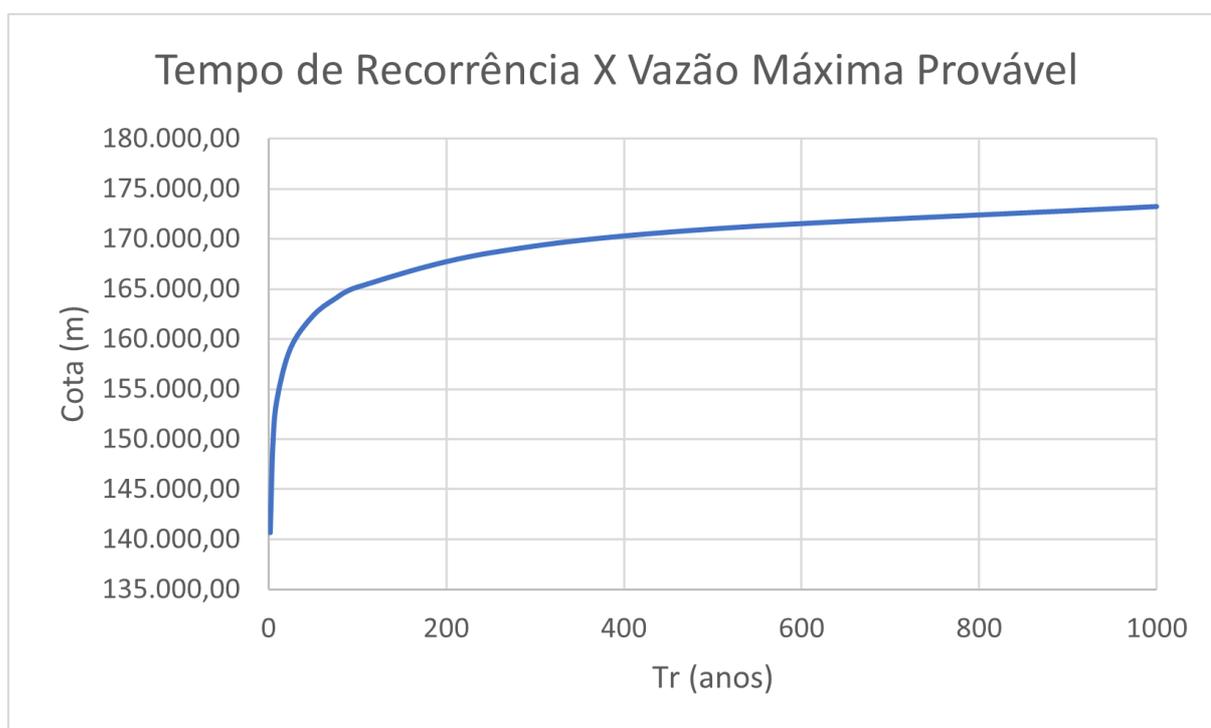
Tabela 6 — Análise de Frequência - Vazões Máximas

Tr (anos)	Risco Hidrológico	Vazão Máxima Anual Provável (m ³ /s)
2	50,00%	140.701,64
5	20,00%	149.565,22
10	10,00%	154.198,36
25	4,00%	159.139,08
50	2,00%	162.330,80
75	1,33%	164.043,37
100	1,00%	165.201,68
250	0,40%	168.632,04
500	0,20%	171.013,14
1000	0,10%	173.246,57

Fonte: O autor (2023).

Valores diferentes dos que constam na tabela acima podem ser lidos no gráfico da Figura 34:

Figura 34 — Tr x Vazão Máxima Provável



Fonte: O autor (2023).

5.9 ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DAS VAZÕES MÍNIMAS E RISCO HIDROLÓGICO

Abaixo, na Tabela 7, é apresentada a análise de frequência para a vazão mínima provável na estação 14100000 - Manacapuru e respectivo risco hidrológico:

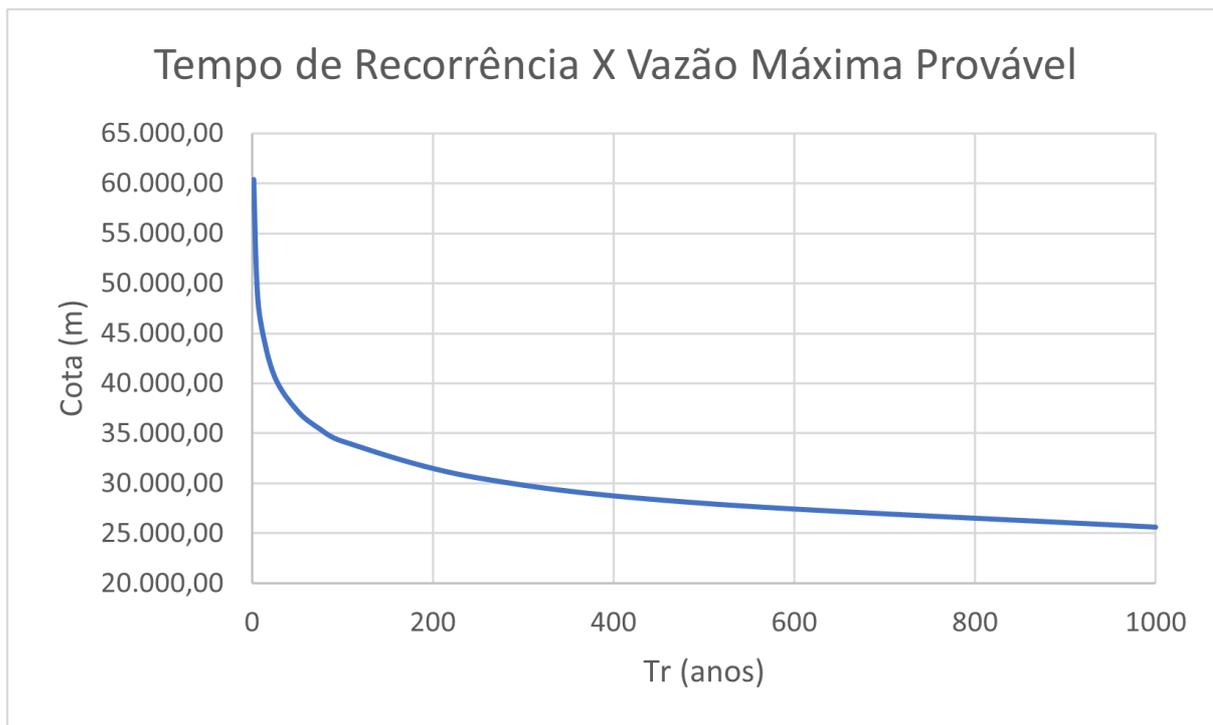
Tabela 7 — Análise de Frequência - Vazões Mínimas

Tr (anos)	Risco Hidrológico	Vazão Máxima Anual Provável (m³/s)
2	50,00%	60.376,25
5	20,00%	50.906,25
10	10,00%	45.956,12
25	4,00%	40.677,37
50	2,00%	37.267,28
75	1,33%	35.437,54
100	1,00%	34.199,97
250	0,40%	30.534,92
500	0,20%	27.990,91
1000	0,10%	25.604,67

Fonte: O autor (2023).

Valores diferentes dos que constam na tabela acima podem ser lidos no gráfico da Figura 35:

Figura 35 — Tr x Vazão Mínima Provável



Fonte: O autor (2023).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considera-se que o objetivo proposto para o presente Trabalho de conclusão de curso foi plenamente alcançado. Os resultados mostram as séries históricas anuais de cotas máximas e cotas mínimas, de vazões máximas e vazões mínimas, que antes eram desconhecidas. A metodologia aplicada mostrou que é viável a análise de frequência a partir de dados públicos de cotas e vazões do Sistema Nacional de Informações de Recursos Hídricos, que são gratuitos.

Esta análise de frequência forneceu informações úteis para os gestores de recursos hídricos do local estudado, rio Solimões na região da estação fluviométrica de Manacapuru, permitindo-lhes compreender a probabilidade de ocorrência e a magnitude de eventos extremos. Isso é importante para o planejamento e a gestão de recursos hídricos, contribuindo para a segurança das comunidades, a preservação do meio ambiente e o uso eficiente da água.

O estudo é útil na avaliação de riscos hidrológicos. Isso ajuda na elaboração de estratégias de mitigação dos efeitos adversos de eventos extremos. Adicionalmente o conhecimento dos riscos hidrológicos associados as cotas de inundações e enchentes permite melhorias no planejamento urbano da cidade de Manacapuru.

Um exemplo da utilidade deste trabalho é vivido nos dias atuais, pois o 43º Boletim de Monitoramento Hidrológico da Bacia do Amazonas publicado pela CPRM no dia 19 de outubro de 2023, no período da estiagem, registra que a cota do rio Solimões baixou para 3,61 metros, ultrapassando a mínima histórica alcançada na vazante do ano de 2010 quando chegou a 3,92 metros. Observando os resultados, para a cota mínima de 3,61 metros, verifica-se que corresponde a um Período de retorno de 268 anos, aproximadamente, e ao risco hidrológico de 0,37% considerando o horizonte de 1 ano.

É importante observar que em hidrologia, muitos processos podem ser entendidos e explicados com um processo probabilístico, pois apresentam um comportamento aleatório, no entanto, não é possível prever a vazão ou uma cota com base puramente determinística, uma vez que não se tem precisamente o conhecimento qualitativo de todas as suas causas. Assim, os resultados deste trabalho, lastreados no modelo estatístico e validado pelo teste de hipótese, estão disponíveis para organizar, apresentar e estudar os dados observados na estação nº 14100000, permitindo a interpretação e avaliação da série de dados hidrológicos do local.

A série histórica está sempre em evolução, a cada ano acrescenta-se à série

um novo dado, por isso, a análise de frequência deve ser atualizada a cada ano. Imagina-se que o resultado dessa atualização pode indicar a tendência do regime hidrológico do rio Solimões na seção da estação 14100000 - Manacapuru.

Por se tratar de processo probabilístico e inferencial, onde quanto maior a amostra, maior a precisão dos resultados, e pelo fato de a série estar em constante evolução como mencionado, a atualização periódica da análise de frequência é uma ferramenta útil para acompanhar as mudanças nos padrões hidrológicos ao longo do tempo, fornecendo informações sobre as tendências e a variabilidade do regime.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas. Twitter: @ANAgovbr. 2019. Disponível em: <https://twitter.com/ANAgovbr/status/1153310332221317120>. Acesso em: 1 ago. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **HidroWeb**. SNIRH. Brasil, 2005. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Acesso em: 15 nov. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Medição de descarga líquida em grandes rios**: manual técnico. Brasília - DF: SGH, f. 44, 2009. 88 p.

AVES, André Campos. **ANÁLISE MULTITEMPORAL E MORFODINÂMICA NO ENTORNO DA CONFLUÊNCIA DO RIO SOLIMÕES COM O RIO NEGRO**.. Manaus, f. 119, 2019 Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.

BARNEZ, ANDREA SOARES. **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO INTERVALO DE TEMPO DE REGISTRO DE DADOS DE LINÍGRAFOS E PLUVIÓGRAFOS EM ESTUDOS HIDROLÓGICOS DE PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS**. Brasília, 2004. 118 p Dissertação (Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

CHAUDHRY, M. Hanif. **Open-Channel Flow**. 2 ed. Columbia: Springer Science & Business Media, f. 264, 2008. 528 p.

CHOW, Ven Te. **Open-channel Hydraulics**, f. 340. 1959. 680 p.

CLIMATE DATA. **Manacapuru Climate**: Data and graphs for weather & climate in Manacapuru. Disponível em: <https://en.climate-data.org/south-america/brazil/amazonas/manacapuru-879355/>. Acesso em: 18 out. 2023.

DA SILVA, César Antônio. **APOSTILA DE HIDRÁULICA GERAL**. Mato Grosso, 2013.

DA SILVA, Rui Carlos Vieira; PECLY, José Otavio Goulart. Análise das Distribuições Verticais de Velocidades e Concentrações de Sedimentos em uma Seção do Rio Solimões. **RRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, 2001.

DE CARVALHO, Thiago Morato. TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO POR MEIOS CONVENCIONAIS E NÃO CONVENCIONAIS. **RBGF - Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 1, Ago. 2008.

DE SOUZA, Lucas Vinicius Palheta. **ESTUDO DE FREQUÊNCIA DAS COTAS MÁXIMAS ANUAIS DO RIO NEGRO, EM MANAUS - AM, ANTES E DEPOIS DO EVENTO EXTREMO DE 2021 E EFEITOS EM RISCO E SEGURANÇA NAS OBRAS DE ENGENHARIA NA ÁREA DE INUNDAÇÃO**. Manaus, f. 94, 2021 Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2021.

DELMÉE, Gérard J.. **Manual de medição de vazão**. 3 ed. São Paulo: Editora Blucher, v. 1, f. 183, 2003. 366 p.

DISTRIBUIÇÃO Normal e t de Student. Mensuração Florestal. Viçosa. Disponível em: <http://www.mensuracaoflorestal.com.br/distribuicao-normal-e-quottquot-de-student>. Acesso em: 26 set. 2023.

FRANZINELLI, Elena. Características morfológicas da confluência dos rios Negro e Solimões (Amazonas, Brasil). **Revista Brasileira de Geociências**, dez. 2011.

GRACIOSA, Melissa Cristina Pereira. **Modelo de seguro para riscos hidrológicos com base em simulação hidráulico-hidrológica como ferramenta de gestão do risco de inundações**. São Carlos, 2010 Tese (Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

GÓMEZ, Hernán; SÁNCHEZ, Iván; GARCÍA, Roberto. **MANUAL DE LABORATORIOS DE MECÁNICA DE FLUIDOS: PRINCIPIO DE PASCAL: VASOS COMUNICANTES Y PARADOJA HIDROSTATICA**. 1 ed. 2010.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física - Gravitação, Ondas e Termodinâmica - Volume 2**. 10 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

IBGE. **Atlas geográfico escolar**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, 2010. 218 p. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 2 set. 2023.

ISMAEL, Laura L. *et al.* Monitoramento Quantitativo e Qualitativo do rio Piranhas-PB. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SOCIAL*, n. 9. 2012.

LENCASTRE, Armando Coutinho de. **Hidráulica geral**. Lisboa: Hidroprojecto, 1983.

LIMBERGER, Leila; SILVA, Maria Elisa Siqueira. Precipitação na bacia amazônica e sua associação à variabilidade da temperatura da superfície dos oceanos Pacífico e Atlântico: uma revisão. **Geosp – Espaço e Tempo (Online)**, v. 20, n. 3, p. 657-675, 2016.

MIGUEZ, Marcelo Gomes; VÉROL, Aline Pires; DI GREGÓRIO, Leandro Torres. **Gestão de Riscos e Desastres Hidrológicos**. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2018.

MOLINIER, Michel *et al.* Les régimes hydrologiques de l'Amazonie et de ses affluents. **L'hydrologie tropicale : géosciences et outil pour le développement** , Paris, 1995.

MOREIRA, Daniel Medeiros. **Rede de Referência Altimétrica para Avaliação da Altimetria por Satélites e Estudos Hidrológicos na Região Amazônica**. Rio de Janeiro, 2010. 157 p Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - COPPE) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

NAGHETTINI, Mauro; PORTELA, Maria Manuela. **PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA APLICADAS À HIDROLOGIA**. Lisboa: IST, 2011. 57 p.

NETTO, Azevedo; Y FERNÁNDEZ, Miguel Fernández. **Manual de hidráulica**. Editora Blucher, v. 1, 2018.

NOBRE, Carlos A *et al.* Características do Clima Amazônico: Aspectos Principais. **Amazonia and Global Change**. Tradução Ivani Pereira, 2009. Tradução de: Characteristics of the Amazon Climate: Main Aspects.

PINTO, Éber José de Andrade; NAGHETTINI, Mauro. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p.

SANTOS, Irani dos *et al.* **Hidrometria aplicada**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, f. 186, 2001. 372 p.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. **BOLETIM DE MONITORAMENTO HIDROMETEOROLÓGICO DA AMAZÔNIA OCIDENTAL**. 2023. 13 p. Disponível em: https://www.sgb.gov.br/sace/boletins/Amazonas/20230901_13-20230901%20-%20133143.pdf. Acesso em: 15 nov. 2023.

SILVA, Rui Carlos Vieira da; MASCARENHAS, Flavio Cesar Borba; MIGUEZ, Marcelo Gomes. **Hidráulica fluvial**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, v. 1, 2003.

SILVA, Telma Mendes; PAES, Thainá Vasconcelos. PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS APLICADOS A ANÁLISE TECTONO-EROSIVA EM BACIAS DE DRENAGEM. **Geo UERJ**, Rio de Janeiro, 2018.

SIOLI, H.. The Amazon. Limnology and landscape ecology of mighty tropical river and its basin. **Junk**, Dordrecht. 800 p, 1984.

TUCCI, C. E. M. (Org.).. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3 ed. Porto Alegre: UFRGS:ABRH, f. 472, 2004. 943 p.

TUNDISI, José Galizia. Ciclo Hidrológico e Gerenciamento Integrado. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 55, p. 31-33, 2003.