

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOASCENTRO DE TECNOLOGIA ENGENHARIA
AMBIENTAL E SANITÁRIA

WESLLEY DOS SANTOS BULHÕES

**Gestão de outorgas pelos usuários: Como condicionantes melhoram
estimativas.**

Maceió

2023

WESLEY DOS SANTOS BULHÕES

**Gestão de outorgas pelos usuários: Como condicionantes melhoram
estimativas.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador: Professor Dr. Christopher Freire Souza.

Maceió

2023

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

B933g Bulhões, Wesley dos Santos.

Gestão de outorgas pelos usuários : como condicionantes melhoram estimativas / Wesley dos Santos Bulhões. – Maceió, 2023.

52 f. : il., grafs. e tabs. color.

Orientador: Christopher Freire Souza.

Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2023.

Bibliografia: f. 50-52.

1. Recursos hídricos. 2. Método Silveira. 3. Medição de vazão. I. Título.

CDU: 556.18

Folha de Aprovação

AUTOR: WESLLEY DOS SANTOS BULHÕES

Gestão de outorgas pelos usuários: Como condicionantes melhoram estimativas.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Professor Dr. Christopher Freire Souza - Universidade Federal de Alagoas
(Orientador)

Banca Examinadora:

Carlos Ruberto Fragoso Jr - UFAL

Cleuda Custódio Freire - UFAL

Augusto Hugo Farias da Cunha – SEMARH

RESUMO

O conhecimento da disponibilidade hídrica de uma determinada região é de suma importância para uma adequada gestão de recursos hídricos. O estudo da disponibilidade hídrica depende da disponibilidade de dados correspondentes ao fenômeno hidrológico. Apesar da relevância do assunto, a disponibilidade desses dados ainda é deficitária, acarretando em uma dificuldade em se realizar histórico de séries de vazões. Na SEMARH (Secretaria do Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Alagoas), a aplicação do método Silveira objetiva estimar vazões a partir de poucos dados em regiões de cabeceira. Adotando este método como referência, elaboramos um modelo capaz de efetuar estimativas de vazões, obtendo como produto curvas de permanência. Além disso, o método Silveira necessita de 3 medições para ser eficaz. Nesse âmbito, efetuamos simulações no modelo utilizando 3, 4 e 5 medições de vazões e caracterizamos a qualidade da estimativa a partir da assimilação de novos dados. Ademais, avaliamos o funcionamento do modelo com uma aplicação no caso da região de cabeceira da fazenda Rio das Carnes, localizada no município de São Sebastião.

Palavras-chave: Recursos Hídricos; Método Silveira; Vazão.

ABSTRACT

The knowledge of the water availability in a particular region is extremely important for adequate water resource management. The study of water availability depends on the availability of corresponding data to the hydrological phenomenon. Despite the relevance of the subject, the availability of this data is still deficient, resulting in a difficulty in carrying out historical flow series. At SEMARH (Secretary of the Environment and Water Resources of Alagoas), the application of the Silveira method aims to estimate flows from few data in headwater regions. Adopting this method as a reference, we developed a model capable of making flow estimates, obtaining flow duration curves as a product. In addition, the Silveira method requires 3 measurements to be effective. In this context, we simulated the model using 3, 4 and 5 flow measurements and characterized the quality of the estimate from the assimilation of new data. Furthermore, we evaluated the model performance with an application in the case of the headwater region of the Rio das Carnes farm, located in the municipality of São Sebastião.

Key-words: Water Resources; Silveira Method; Flow.

"Todo mundo é gênio. Mas se você julgar um peixe por sua capacidade de subir em árvores, ele vai gastar toda a sua vida acreditando que é inferior."

Autor Desconhecido

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma que resume a metodologia.....	15
Figura 2: Processos que caracterizam o método Silveira	16
Figura 3: Metodologia referente ao Método Silveira	17
Figura 4: Metodologia referente a simulação.....	20
Figura 5: Mapa de localização do município de São Sebastião.....	22
Figura 6: Perímetro da área de estudo	23
Figura 6: Localização das seções (S1, S2, S3)	24
Figura 7: Localização das seções (S1, S2, S3)	24
Figura 8: Mapa de localização da estação A353	32
Figura 9: Dashboard que contém os dados de vazão real e vazão modelada.....	36

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01: Diagrama de Gantt dos dados de precipitação na fazenda.....	25
Gráfico 02: Precipitação mensal média	26
Gráfico 03: Diagrama de Gantt dos dados de precipitação da estação 00936020.	26
Gráfico 04: Precipitação mensal média do município de Junqueiro.....	27
Gráfico 05: Diagrama de Gantt referente aos dados de vazão da seção S1	27
Gráfico 06: Diagrama de Gantt referente aos dados de vazão da seção S2	27
Gráfico 07: Diagrama de Gantt referente aos dados de vazão da seção S3	28
Gráfico 08: Curva de permanência referente aos dados de vazão da seção S1	28
Gráfico 09: Curva de permanência referente aos dados de vazão da seção S2	29
Gráfico 10: Curva de permanência referente aos dados de vazão da seção S3	29
Gráfico 11: Boxplot referente aos dados de vazão da seção S1	30
Gráfico 12: Boxplot referente aos dados de vazão da seção S2	30
Gráfico 13: Boxplot referente aos dados de vazão da seção S3	31
Gráfico 14: Fluviograma referente a seção S1	33
Gráfico 15: Fluviograma referente a seção S2	33
Gráfico 16: Fluviograma referente a seção S3	34
Gráfico 17: Resultado da modelagem na seção S1.....	39
Gráfico 18: Resultado da modelagem na seção S2.....	39
Gráfico 19: Curva de permanência apresentando a vazão gerada pelo modelo e a vazão real na seção S1	40
Gráfico 20: Curva de permanência apresentando a vazão gerada pelo modelo e a vazão real na seção S2	40
Gráfico 21: Precipitação e Vazão modelada na seção S1, usando 4 medições de vazões	42
Gráfico 22: Precipitação e Vazão modelada na seção S1, usando 5 medições de vazões.	42
Gráfico 23: Precipitação e Vazão modelada na seção S2, usando 4 medições de vazões.	42
Gráfico 24: Precipitação e Vazão modelada na seção S2, usando 5 medições de vazões.	43
Gráfico 25: Curva de permanência apresentando a vazão gerada pelo modelo e a vazão real na seção S1 usando 4 medições de vazões	43

Gráfico 26: Curva de permanência apresentando a vazão gerada pelo modelo e a vazão real na seção S1 usando 4 medições de vazões	44
Gráfico 27: Curva de permanência apresentando a vazão gerada pelo modelo e a vazão real na seção S2 usando 4 medições de vazões	44
Gráfico 28: Curva de permanência apresentando a vazão gerada pelo modelo e a vazão real na seção S2 usando 5 medições de vazões	45
Gráfico 29: Curvas de permanência de todas as medições Seção S1	46
Gráfico 30: Curvas de permanência de todas as medições Seção S2	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Q90 referente a cada seção	28
Tabela 02: Fator correção usados na estimativa da evapotranspiração	31
Tabela 03: Dados obtidos de evapotranspiração adquiridos a partir da aplicação do Método de Thornthwaite	32
Tabela 04: Período de estiagem referente a seção S1	35
Tabela 05: Período de estiagem referente a seção S2	35
Tabela 06: Q90 gerada pelo modelo e Q90 referente às medições reais	41
Tabela 07: Q90 gerada pelo modelo e Q90 referente às medições reais.	45

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo Geral.....	14
2.2	Objetivos Específicos.....	14
3	METODOLOGIA.....	14
3.1	Método Silveira	15
3.2	Simulação de dados como condicionante	19
3.3	Método de Thornthwaite	20
4	ESTUDO DE CASO.....	22
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	25
5.1	Estudo da precipitação na fazenda	25
5.2	Vazão nas Seções S1, S2 e S3	27
5.3	Estimativa da Evapotranspiração.....	31
5.4	Identificação do período de estiagem.....	33
5.5	Elaboração do modelo	36
5.6	Aplicação do modelo.....	39
5.7	Melhoria da estimativa a partir da assimilação de novos dados.....	41
6	CONCLUSÕES.....	48
7	REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

Outorga pode ser caracterizada como um instrumento cujo intuito é assegurar ao usuário o direito de utilizar determinado recurso hídrico. Para concedê-la, o órgão gestor pode definir condicionantes à manutenção da outorga a serem atendidas pelo usuário, tais como medições de vazões em um determinado trecho de rio. As condicionantes de outorga são as exigências impostas pela autoridade competente para a concessão do direito de uso da água. A outorga de direito de uso da água é um instrumento legal que autoriza o usuário a utilizar a água de um manancial específico, seja para abastecimento humano, agricultura, indústria, geração de energia elétrica, entre outras finalidades. As condicionantes de outorga podem incluir uma série de medidas a serem adotadas pelo usuário da água, a fim de garantir a utilização adequada e sustentável do recurso hídrico. Essas medidas podem envolver, por exemplo, a construção de obras para a proteção do meio ambiente e a conservação da qualidade da água, o monitoramento do uso da água, o pagamento de taxas e tarifas, a realização de estudos ambientais, entre outros requisitos.

Além disso, para a instrução de processos de outorga de uso dos recursos hídricos, as Agências Governamentais necessitam conhecer as disponibilidades hídricas de modo a não gerarem conflitos nem conceder outorga superior à real (Silveira, 1998). A questão é que a disponibilidade de dados de vazão em boa parte dos casos ainda é deficitária, proporcionando uma dificuldade à análise para a emissão da outorga correspondente. Outro fator preponderante para dificultar a disponibilidade de dados é que medir vazão tem um custo financeiro elevado para o órgão gestor, visto que é necessária uma rede extensa de postos de medição e na grande maioria das vezes, não é possível apresentar esta estrutura em todos os rios e seus trechos correspondentes.

Mesmo que o local apresente uma estação, nem sempre esses dados são confiáveis, visto que, em determinado período pode ocorrer medições distantes da atual ou até mesmo não apresentar uma quantidade de dados suficiente para uma boa representatividade da variação do processo em medição, pois a qualidade da medição depende do cuidado na definição do local, na execução da instalação da seção, dos equipamentos escolhidos, da manutenção deles, da transmissão dos dados, do tratamento, armazenamento e até mesmo da disponibilização para uso. Desse modo, quase sempre existirão lacunas temporais e espaciais que necessitam ser preenchidas com base em metodologias robustas (TUCCI, 2002).

A vazão de um determinado trecho de rio apresenta diversos fatores determinantes que estão interligados com o ciclo hidrológico, variando em função do tempo e espaço. Nesse âmbito, conhecer de forma eficiente sobre esses fatores e até mesmo seus processos hidrológicos abrangidos é um grande desafio na Hidrologia.

Outro aspecto de suma relevância é que as medições de vazões podem não ser coerentes se comparadas às vazões naturais dos rios. Esse fato pode ser explicado devido ao armazenamento em barramentos, aporte de efluentes ou até mesmo a transposição de águas para outros corpos d'água. Além disso, as obras hidráulicas que podem existir, afetam diretamente a vazão das águas do local de observação. Ademais, no âmbito do controle ambiental, o conhecimento do escoamento é fundamental para avaliar a qualidade da água de pequenos rios, decorrente de cargas pontuais e difusas. Para estimar as condições ambientais sujeitas a essas cargas poluidoras, é necessário conhecer as vazões de estiagem do rio (Silveira, 1998). Há, portanto, grande demanda por estudos hidrológicos confiáveis para pequenas bacias que levem em conta a carência de dados fluviométricos da rede existente de monitoramento (Silveira, 1988).

Nesse âmbito, com o objetivo de caracterizar essa problemática, tem sido estudado métodos (POGIAN, 2016) que visam estimar a vazão dos cursos d'água em locais sem dados. Nessa perspectiva, um método que se destaca é denominado de regionalização de vazão, visto que, é o mais usado pelos órgãos gestores de recursos hídricos. Este método consiste em estabelecer uma equação de regressão entre a vazão de interesse em função das características da bacia de uma região homogênea.

No entanto, bacias de cabeceira apresentam um desafio particular para gestão em função do comportamento hidrológico, visto que, de acordo com a SEMARH (Secretaria do Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Alagoas) regionalizar dados a partir do plano diretor de recursos hídricos se apresentou não confiável. Atualmente a SEMARH, aplica o método Silveira nessa situação, outorgando uma parcela do volume solicitado e atualizando a partir de condicionantes. Nesse âmbito, a partir da aplicação deste método, é possível obter uma curva de permanência das vazões de um determinado rio através de poucos dados.

Vale salientar que o modelo se baseia na estimativa do comportamento da bacia hidrográfica em épocas de estiagem, onde a sua depleção corresponde ao seu comportamento após a ocorrência de precipitações, relacionando com o baixo tempo de concentração de bacias pequenas (Fountoura et al; 2016).

A área de estudo está localizada no perímetro da fazenda Rio das Carnes, especificamente no município de São Sebastião em uma região de cabeceira. Nessa

perspectiva, elaboramos um modelo capaz de efetuar estimativas de vazão outorgável considerando que temos uma carência de dados.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste estudo consiste em estabelecer como o aporte de dados de condicionantes melhora estimativas da vazão outorgável. Desse modo, a partir dos dados de precipitação e de incorporação gradual de poucas medições de vazões, criamos um modelo cujo intuito é efetuar estimativas de vazão outorgável adotando como referência o método Silveira. Nessa perspectiva, o método será ilustrado com o caso da Bacia de Cabeceira no perímetro da fazenda Rio das Carnes, localizada no município de São Sebastião. Ademais, partindo do princípio de que a tendência é que quanto maior a quantidade de dados, mais eficiente serão nossas estimativas, vamos caracterizar a melhoria da estimativa da vazão outorgável pela assimilação de novos dados.

2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste estudo consiste em definir como condicionantes melhoram estimativas da vazão outorgável.

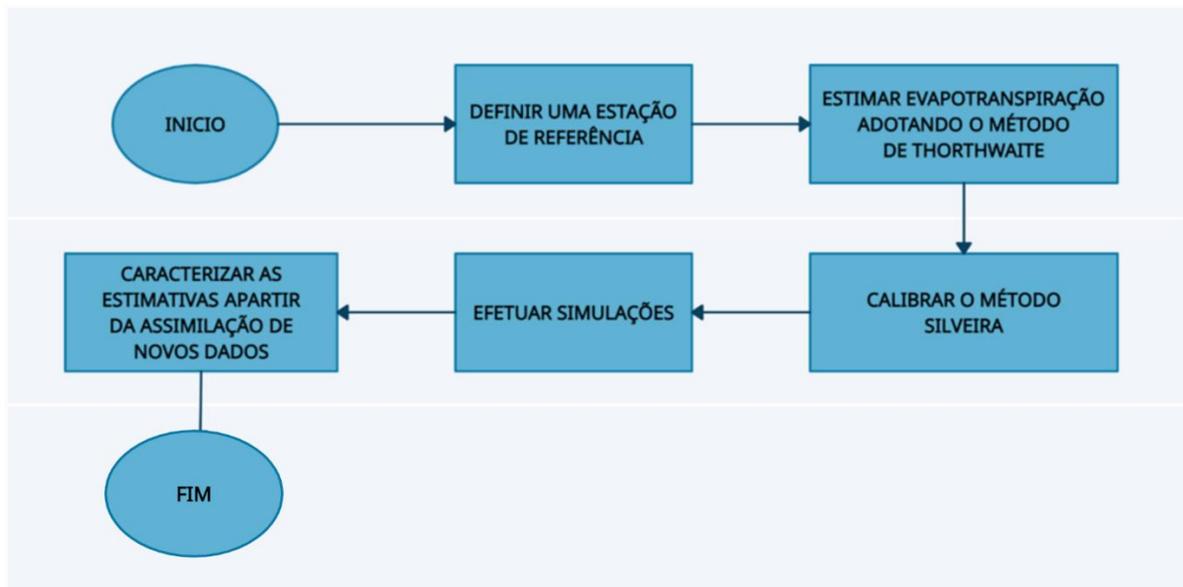
2.2 Objetivos Específicos

- I. Caracterização de melhoria da estimativa da vazão outorgável pela assimilação de novos dados.

3 METODOLOGIA

Começamos a elaborar o modelo adotando como referência o método Silveira. Para verificar a precisão do modelo, aplicamos-o em uma região de nascente localizada nas fazendas Rio das Carnes e São Manoel, que ficam no município de São Sebastião. Sabemos que quanto mais medições de vazão tivermos, mais precisas serão nossas estimativas. Por isso, realizamos simulações no modelo utilizando 4 e 5 medições de vazão, a fim de caracterizar nossa estimativa ao assimilar novos dados. Na figura 1 apresentamos um fluxograma que fornece uma visão geral da metodologia empregada neste estudo.

Figura 1: Fluxograma que resume a metodologia



Fonte: Autor, 2022

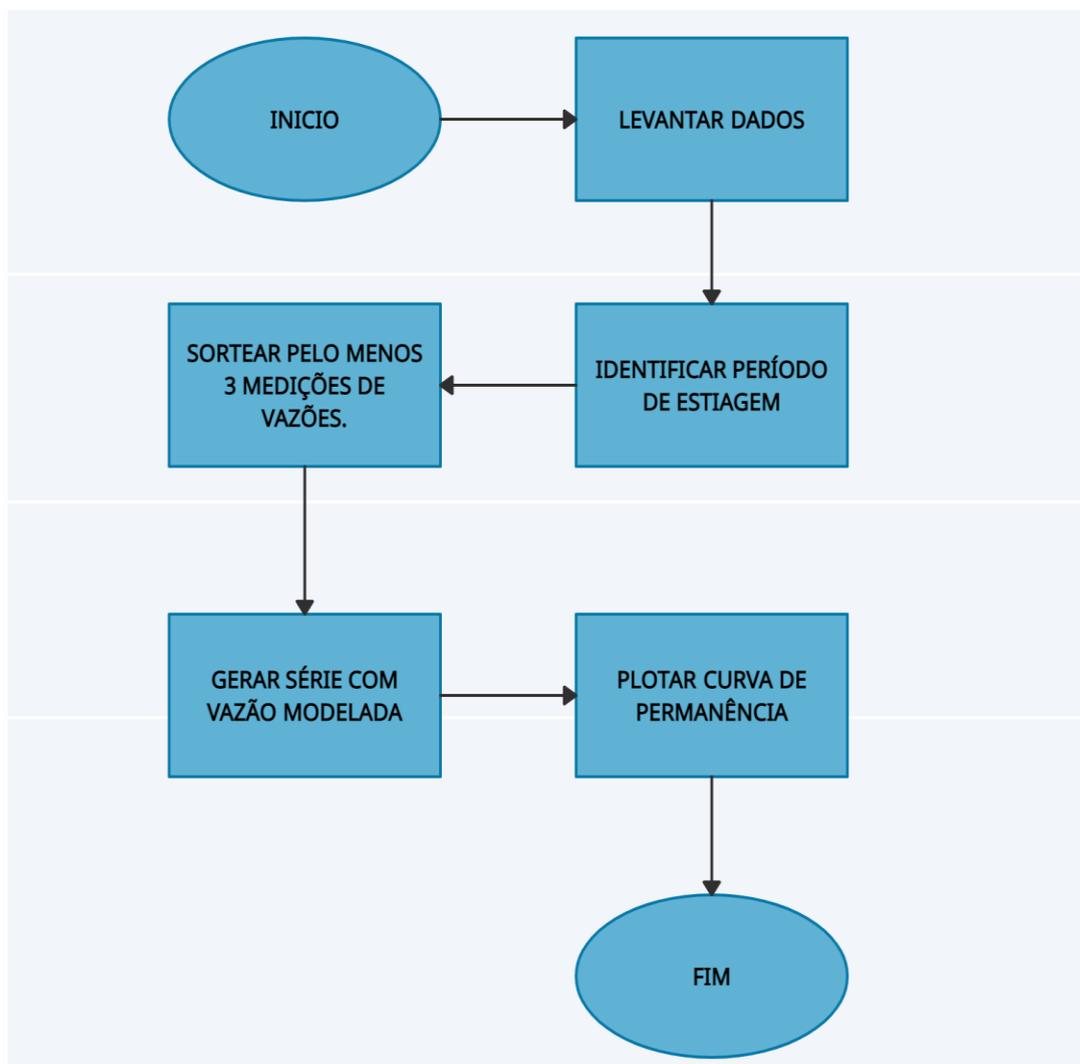
3.1 Método Silveira

O método Silveira é um modelo simplificado de chuva-vazão que permite a estimativa da vazão de um rio a partir de poucos dados, sendo aplicado principalmente em pequenas bacias hidrográficas. O modelo considera que uma parte da precipitação que ocorre em uma bacia hidrográfica vai infiltrar no solo até que o solo fique saturado, gerando então o escoamento superficial e consequentemente a vazão de pico. A água que infiltra no solo gera uma vazão de base, que depende do coeficiente de infiltração, precipitação e evapotranspiração. A vazão total é a soma da vazão de pico e da vazão de base. Uma das vantagens desse método é que é possível estimar a disponibilidade hídrica de uma bacia a partir de poucas medições locais em período de estiagem. Assim, com apenas duas medições de vazão é possível obter uma boa avaliação da disponibilidade hídrica através de um modelo chuva-vazão com apenas dois parâmetros. O critério estabelecido para o uso do método Silveira é que as bacias devem ter um tempo de concentração inferior a um dia.

A figura 02 ilustra os processos que caracterizam o método, onde parte da precipitação infiltra no solo até que o solo fique saturado, gerando então o escoamento e a vazão QS. A água que infiltrou gera uma vazão QB, que está em função do coeficiente de infiltração, precipitação e evapotranspiração. A vazão total é a soma de QS e QB. O método Silveira se baseia na ideia de que, com algumas medições locais em períodos de estiagem, é possível obter uma boa avaliação da

Nesse âmbito, o método necessita de uma série de dados pluviométricos e dados de evapotranspiração. Em posse desses dados identificamos o período de estiagem. Além disso, o método também precisa de pelo menos 3 medições de vazões que devem estar dentro do período de estiagem identificado. Por fim, vamos ter como produto a curva de permanência da vazão modelada. O fluxograma disposto na figura 3 apresenta a metodologia utilizada.

Figura 3: Metodologia referente ao método Silveira.



Fonte: Autor, 2022

O método considera que com poucas medições locais em período de estiagem, podemos obter como produto, uma boa avaliação da disponibilidade hídrica, através de um modelo chuva-vazão com dois parâmetros. Além disso, em bacias onde o tempo de concentração é inferior a um dia, na maioria das vezes, a resposta rápida da bacia não coincide com a hora observada da vazão. Mesmo nesses casos, o monitoramento em intervalos diários é suficiente para a estimativa da disponibilidade hídrica (PESSOA, 2017).

A partir deste método é possível estimar a vazão em função de dados históricos de precipitação da determinada região. Vale ressaltar que o modelo apresenta algumas restrições tais como:

1. despreza o armazenamento de água na camada superior do solo, no intervalo de tempo de análise (diário)
 2. retira diretamente da precipitação diária, a evapotranspiração potencial
- A partir da equação 1 encontramos a precipitação total diária.

$$P_{td} = P_d - E_d \quad (1)$$

P_{td} = Precipitação total diária (mm)

P_d = Precipitação em cada intervalo de tempo diária (mm)

E_d = Evapotranspiração diária (mm)

- De posse do valor de precipitação total diária encontrada na equação 1, calculamos a precipitação efetiva utilizando a equação 2, que pode ser definida como a precipitação que de fato vai proporcionar escoamento.

$$P_{ed} = (1 - C_{inf}) * P_{td} \quad (2)$$

P_{ed} = Precipitação Efetiva (mm)

C_{inf} = Coef. de infiltração das águas da chuva no solo (mm)

- Além disso, com o valor da precipitação total diária encontrada na equação 1, calculamos o volume de infiltração do solo (m³) a partir da equação 3. A parcela infiltrada alimenta diretamente o aquífero, desprezando-se a variabilidade da camada superior do solo associada a períodos úmidos e, geralmente, de pequena profundidade na cabeceira das bacias (SILVEIRA, 1998).

$$V_i = C_{inf} * P_{td} \quad (3)$$

- Podemos expressar o reservatório subterrâneo pela equação da continuidade.

$$\frac{dS}{dt} = V_i - Q_b \quad (4)$$

S = Armazenamento (mm)

Q_b = Vazão de escoamento subterrâneo (mm)

- Relacionamos o armazenamento (S) com a vazão de saída pela equação 5.

$$S = K_b * Q_b \quad (5)$$

K_b = Tempo de esvaziamento do reservatório em segundos.

- Derivamos a equação 5 e substituímos na equação da continuidade (4), resultando na equação diferencial simples do modelo do reservatório linear.

$$K_b * \frac{dQ_b}{dt} + Q_b = Vi \quad (6)$$

- O resultado da equação 6 é dado pela equação 7.

$$Q_b(t) = Q_b(t - 1) * e^{-\frac{\Delta t}{K_b}} + Vi(t) * (1 - e^{-\frac{\Delta t}{K_b}}) \quad (7)$$

$Q_{b(t)}$ = Vazão de contribuição de base em função do tempo

Δt = Intervalo de 1 dia

K_b = Tempo de esvaziamento do reservatório (dias)

- No período chuvoso em que $Pr > 0$, a vazão incorpora também a parcela de origem superficial e é dada por:

$$Q(t) = Q_s(t) + Q_b(t) \quad (8)$$

$Q(t)$ = Vazão total (mm/dia)

$Q_s(t) = P_{ef}(t)$

- Quando $Pr = 0$, a equação se reduz;

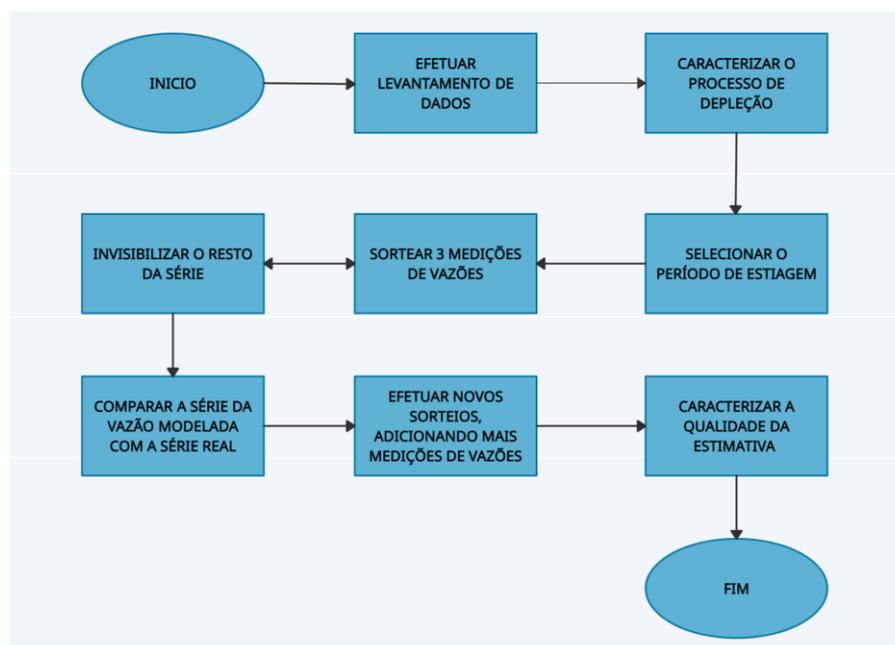
$$Q(t) = Q_b(t) \quad (9)$$

3.2 Simulação de dados como condicionante

O método Silveira deve ser calibrado com pelo menos 3 medições de vazões em período de estiagem. Nesse sentido, este período foi encontrado a partir da caracterização do processo de depleção, onde estabelecemos como critério que o período de estiagem sorteado deve ser selecionado a partir de um número mínimo de 2 dias antecedentes e consecutivos sem chuva. Efetuamos sorteios das medições dentro da nossa série de vazão de referência, garantindo que as medições de vazões sorteadas, se encontram em período de estiagem. Após o sorteio todo o resto dos dados da série de referência que contém os dados reais, foi invisibilizada, constituindo uma série de referência usada para comparação dos resultados entre vazão modelada

e vazão real. A partir dessas 3 medições de vazões, dados pluviométricos e de evapotranspiração, obtemos como produto uma série de vazão modelada. Além disso, apesar do método Silveira precisar de apenas 3 medições reais de vazões, também trabalhamos com a adição gradual de dados, tais como 4 e 5 medições. Com a adição de dados, efetuamos novas calibrações no modelo, e a partir disso, caracterizamos a qualidade da estimativa à medida em que adicionamos mais dados. O fluxograma abaixo apresenta uma explicação da metodologia aplicada neste item.

Figura 4: metodologia referente a simulação



Fonte: Autor, 2022

3.3 Método de Thornthwaite

O método de Thornthwaite foi proposto (THORNTHWAITE, 1948) com o intuito de estimar a evapotranspiração potencial (E_d) mensal de um gramado (posto meteorológico) como um elemento climatológico, visando à classificação climática. O conjunto de equações desenvolvido por Thornthwaite foi baseado em balanço hídrico de bacias hidrográficas e em medidas de evapotranspiração realizadas em lisímetros e utiliza a temperatura do ar como variável independente.

- A partir da equação 11, calculamos o índice de calor.

$$I = \sum (0,2 * T_M)^{1,514} \quad (11)$$

I = Índice de calor

T_M = Temperatura média mensal

- A partir do valor do índice de calor encontrado na equação 11, calculamos o expoente “a” utilizando a equação 12.

$$a = 0,49239 + (1,7912 * 10^{-2} * I) - (7,71 * 10^{-5} * I^2) + (6,75 * 10^{-7} * I^3) \quad (12)$$

- A partir do valor de “a” obtido na equação 12 calculamos a evapotranspiração potencial que é tida como igual à "chuva ideal" para que uma região não apresente nem excesso nem deficiência hídrica durante o ano.

$$ET_p = 16 * \left(\frac{10 * T_M}{I} \right)^a \quad (13)$$

ET_p = Evapotranspiração potencial

- Utilizando a equação 13 encontramos o fator de correção da evapotranspiração potencial.

$$COR = \left(\frac{ND}{30} \right) * \left(\frac{N}{12} \right) \quad (14)$$

ND = Número de dias avaliados

N = Fotoperíodo

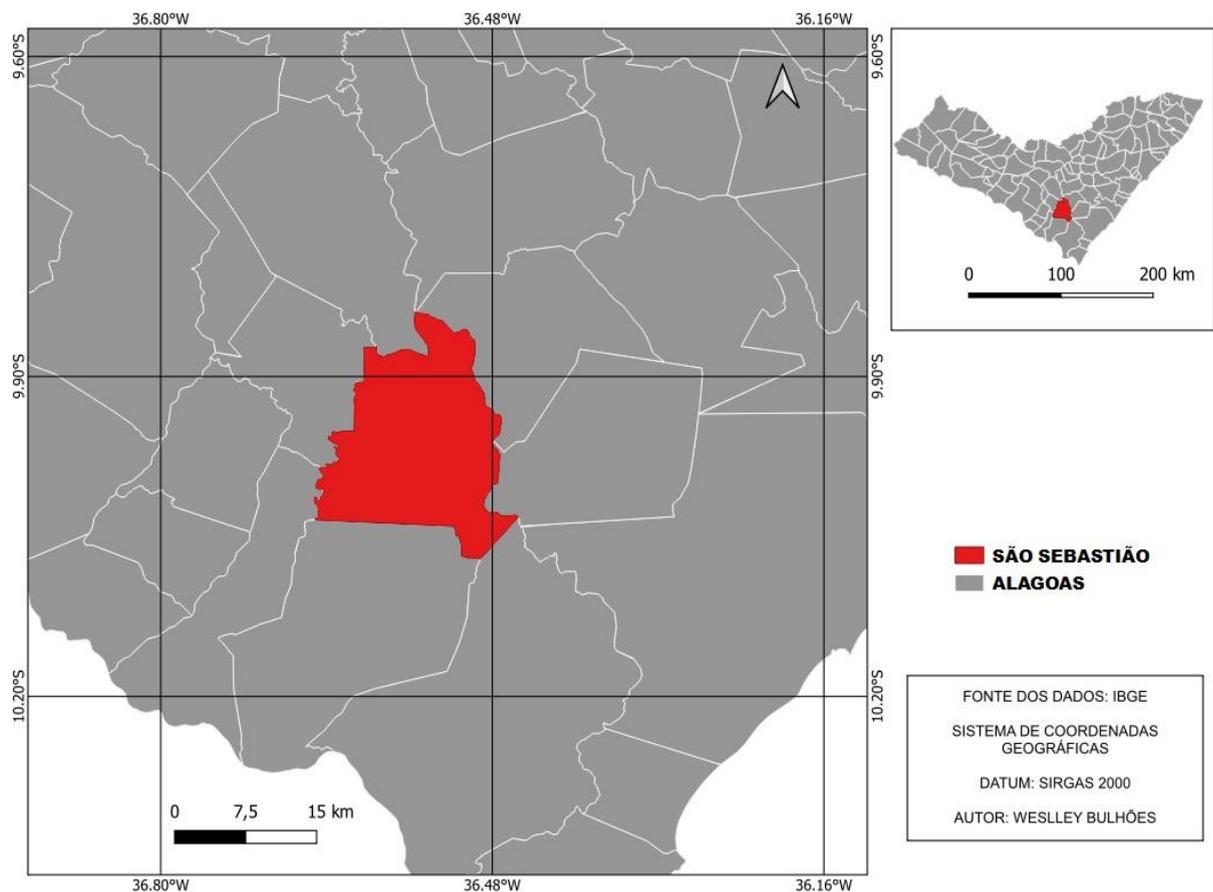
- Por fim, em posse do fator correção encontrado na equação 14, usamos a equação 15 e calculamos a evapotranspiração corrigida.

$$Ed = ET_p * COR \quad (15)$$

4 ESTUDO DE CASO

O município de São Sebastião possui uma área de 305.746 km² e está inserido na bacia hidrográfica do Rio São Francisco, sendo banhado pela sub-bacia do Rio Piauí, cujo principal afluente é o Riacho do Meio (MASCARENHAS,2005). Todo esse sistema fluvial desagua no Rio São Francisco.

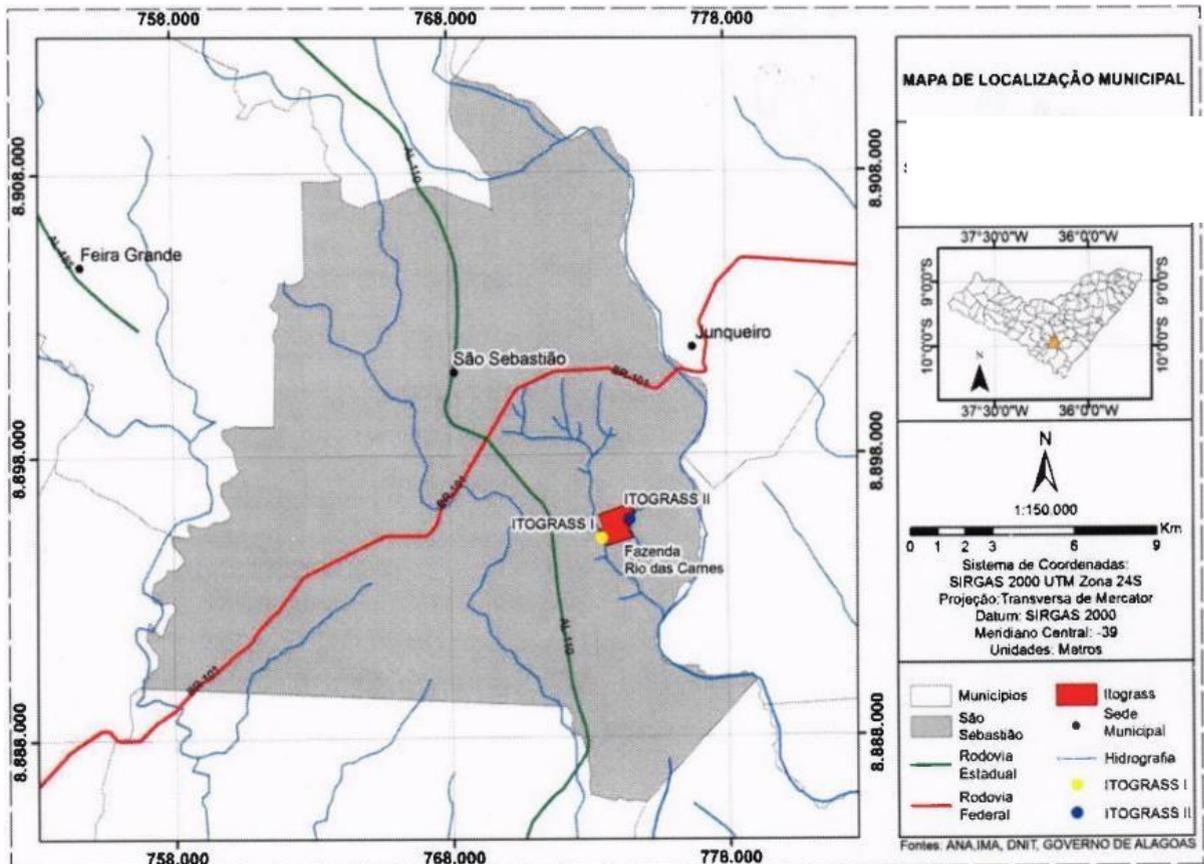
Figura 5: Mapa de localização do município de São Sebastião



Fonte: Autor, 2022

O método Silveira é mais eficaz quando aplicado em bacia de cabeceira (SILVEIRA, 1998). Nessa perspectiva, a área de estudo se refere a uma região localizada nas fazendas Rio das Carnes e São Manoel, situadas no município de São Sebastião, conforme sua localização está disposta na figura 6.

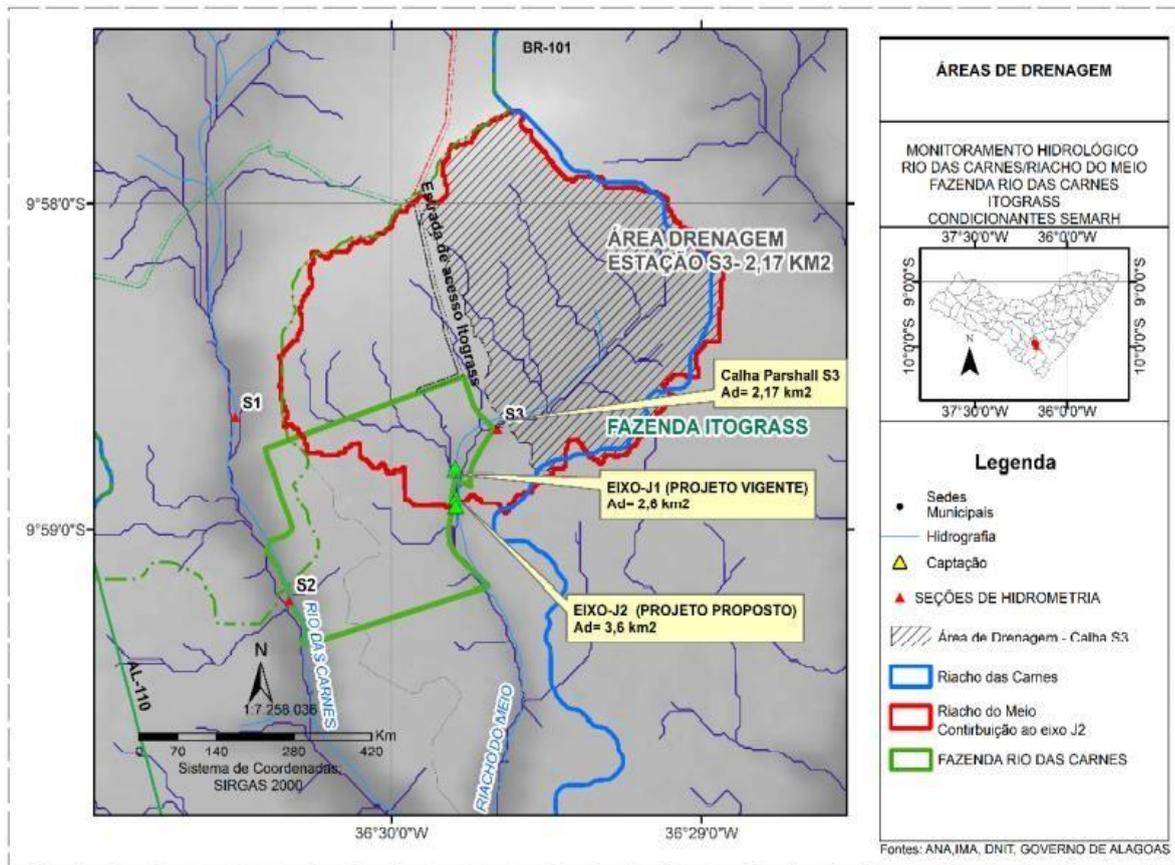
Figura 6: Perímetro da área de estudo



Fonte: SEMARH, 2017

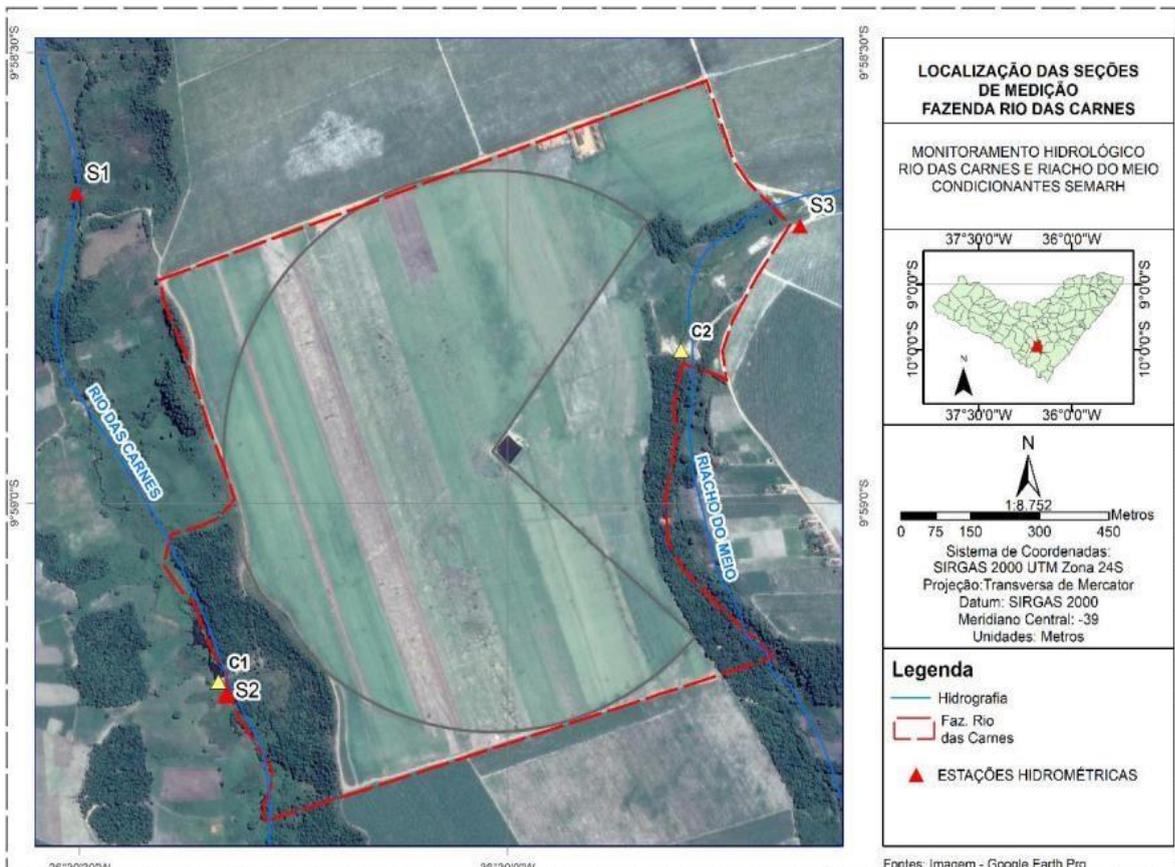
No ano de 2016, uma condição de estiagem foi registrada na localidade que abrange a fazenda Rio das Carnes, o que levou à formulação do projeto de construção da barragem Itograss II. Cabe destacar que essa estrutura está situada na bacia hidrográfica do Riacho do Meio, o principal afluente do rio das Carnes, localizada na região hidrográfica do Piauí. A área abrangida pela barragem, que tem uma extensão de aproximadamente 5,73 km², inclui um curso d'água principal de 3,7 km de comprimento, que deságua no rio das Carnes. Nesse contexto, foram utilizados dados de vazão diária obtidos nas seções S1 e S2, ilustradas nas figuras 7 e 8, bem como informações sobre as chuvas ocorridas na fazenda. Convém salientar que as informações referentes à vazão, para cada seção, serão empregadas para validar o modelo. Duas seções foram utilizadas para evidenciar a eficácia do modelo, pois, quando os resultados obtidos são aceitáveis em mais de uma série, isso indica uma maior eficiência do modelo. Com base nos dados coletados, foi estabelecido que a série temporal a ser utilizada para verificação do modelo neste estudo abrange o período de 01/09/2020 a 30/03/2022.

Figura 7: Localização das seções (S1,S2,S3)



Fonte: SEMARH, 2017

Figura 8: Localização das seções (S1,S2,S3)



Fonte: SEMARH, 2017

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme mencionado anteriormente, o método Silveira requer informações sobre precipitação, evapotranspiração e pelo menos três medidas de vazão para ser aplicado. Com base nesse princípio, utilizamos como referência os dados de precipitação registrados na fazenda Rio das Carnes e as informações de vazão relativas às seções (S1, S2), cuja localização pode ser visualizada na figura 5. Para estimar a evapotranspiração, empregamos o método de Thornthwaite. Esse método é baseado na definição de uma equação que considera o balanço hídrico diário, levando em conta informações sobre a temperatura. Com isso, conseguimos obter uma estimativa da evapotranspiração para a região estudada. Vale ressaltar que a evapotranspiração é um componente essencial no estudo de recursos hídricos, uma vez que é responsável pela perda de água do solo e da vegetação para a atmosfera. Ao utilizar o método de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração, fornecemos informações mais precisas para o estudo da disponibilidade hídrica na região e, conseqüentemente, para a aplicação do método Silveira.

5.1 Estudo da precipitação na fazenda

O clima da região é do tipo Tropical chuvoso com verão seco. Nesse âmbito, o período chuvoso começa no outono, tendo início em fevereiro e o final em outubro (MASCARENHAS, 2005). Com o intuito de proporcionar uma melhor dimensão do período estudado e da quantidade de dados disponíveis, plotamos o diagrama de Gantt correspondente aos dados de precipitação na fazenda com o auxílio da linguagem de programação Python, que está ilustrada na figura 6. Vale ressaltar, que quando ocorre uma variação de cor, significa que existe uma ausência de dados dentre aqueles determinados períodos de dados contínuos.

Gráfico 01: Diagrama de Gantt referente aos dados de precipitação na fazenda.

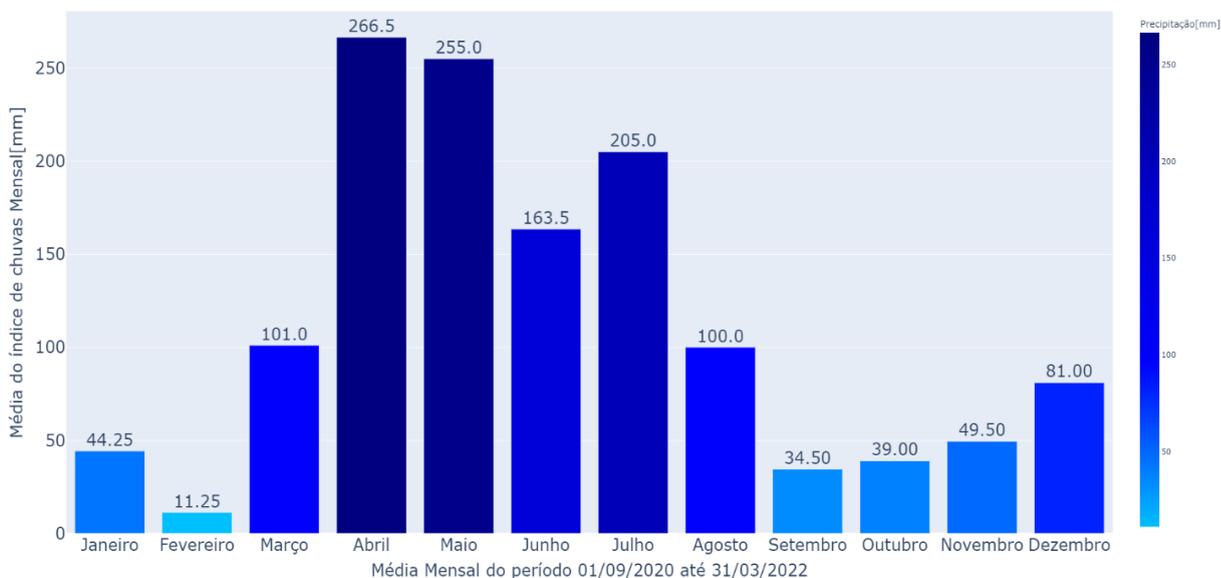


Fonte: Autor, 2022

Além disso, a partir da análise desses dados, constatamos que a precipitação média anual no período de (01/09/2020 até 31/03/2022) foi de 1147,50 mm.

Vale ressaltar que o gráfico representado no gráfico 02 apresenta a média da precipitação em função do mês neste mesmo período.

Gráfico 02: Precipitação mensal média.



Fonte: Autor, 2022

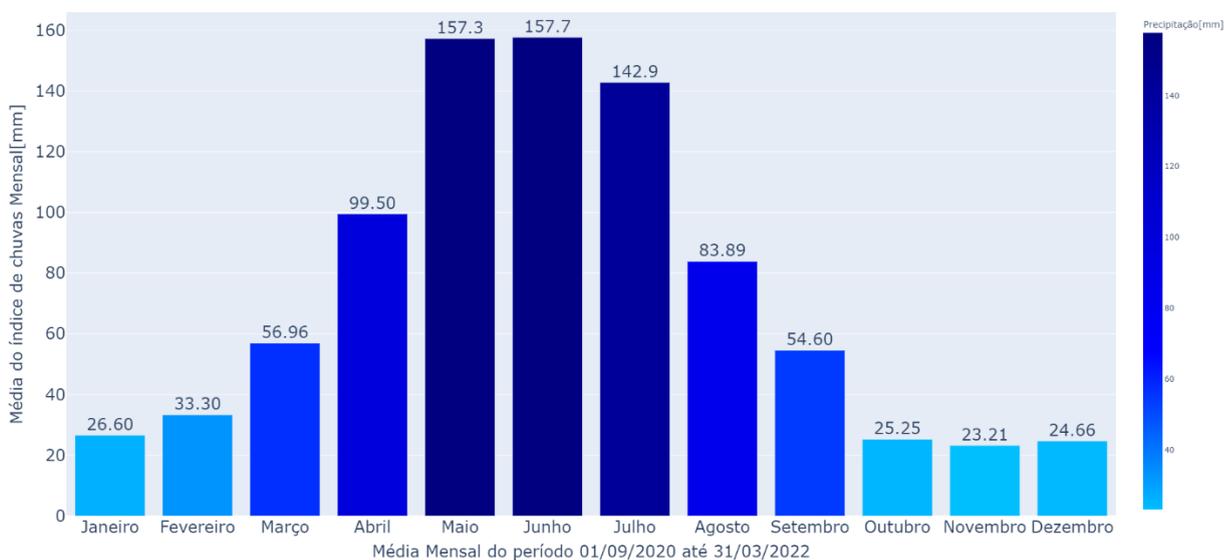
Para fins de comparação mensal de dados pluviométricos, analisamos a precipitação do município de Junqueiro no período de (01/04/1912 até 01/01/2001). Nesse âmbito, adotamos como referência a estação (00936020), localizada no banco de dados da ANA (Agência Nacional de Água), por se tratar de uma estação próxima a área de estudo. Nesse contexto, podemos perceber que os meses que apresentaram menor índice de precipitação são similares. Os gráficos 03 e 04 apresentam o diagrama de Gantt e a precipitação média mensal referente ao município de Junqueiro no período citado respectivamente, onde podemos perceber que não existem falhas de dados neste período.

Gráfico 03: Diagrama de Gantt referente aos dados de precipitação da estação 00936020



Fonte: Autor, 2022

Gráfico 04: Precipitação mensal média do município de Junqueiro.

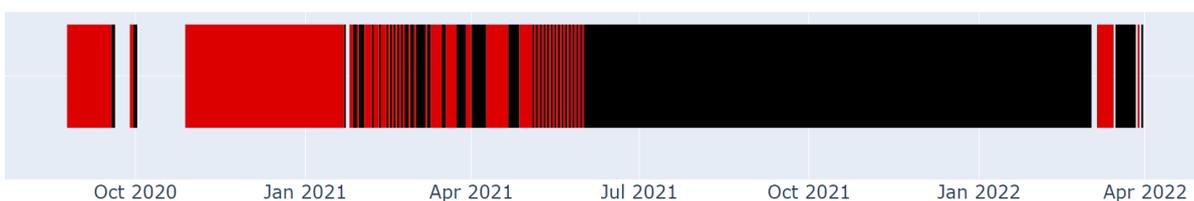


Fonte: Autor, 2022

5.2 Vazão nas Seções S1, S2 e S3

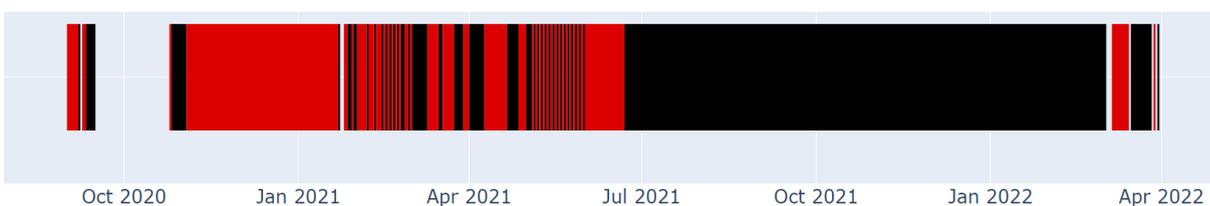
A partir dos dados de vazão de referência localizados nas seções (S1, S2 e S3). Vale ressaltar, que quando ocorre alternância de cor, significa que existe uma ausência de dados entre aquele determinado período.

Gráfico 05: Diagrama de Gantt referente aos dados de vazão da seção S1.



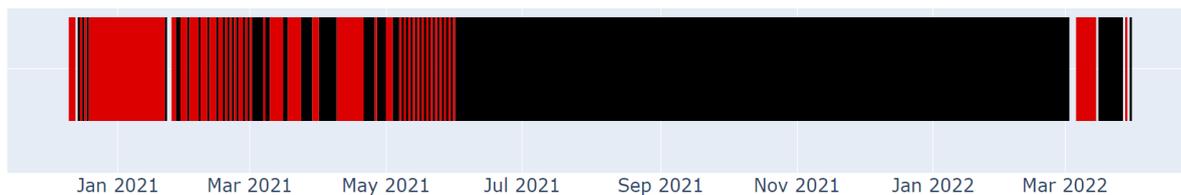
Fonte: Autor, 2022

Gráfico 06: Diagrama de Gantt referente aos dados de vazão da seção S2.



Fonte: Autor, 2022

Gráfico 07: Diagrama de Gantt referente aos dados de vazão da seção S3.



Fonte: Autor, 2022

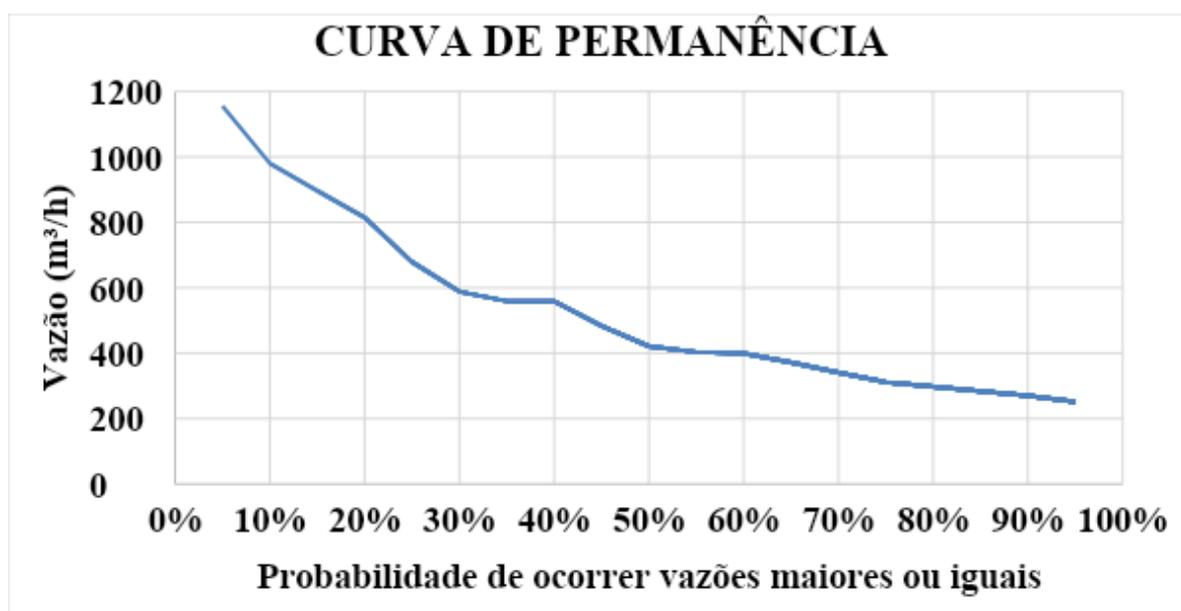
Também plotamos curvas de permanência referentes a cada seção que podem ser visualizadas nos gráficos (08,09,10). Dessa forma, a partir deste gráfico tornamos mais fácil a visualização da frequência em que ocorrem valores superiores ou inferiores da nossa série temporal. Vale ressaltar que a vazão equivalente à estatística aplicada no Estado de Alagoas é a Q90. Além disso, destacamos que a vazão na Seção S2 é menor em relação a Seção S1. Esse fato já era esperado, e pode ser justificado devido à captação da Itograss, que pode ser visualizada na Figura 06.

Tabela 01: Q90 referente a cada seção.

SEÇÃO S1	269,95 m ³ /h
SEÇÃO S2	205,32 m ³ /h
SEÇÃO S3	8,24 m ³ /h

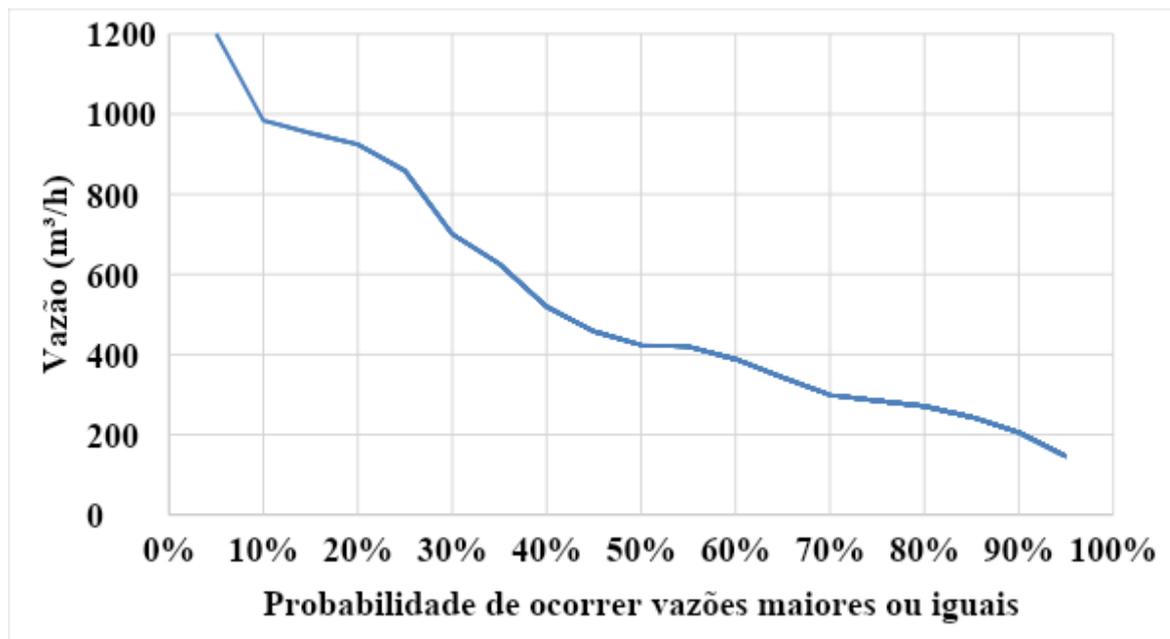
Fonte: Autor, 2022

Gráfico 08: Curva de permanência referente aos dados de vazão da seção S1.



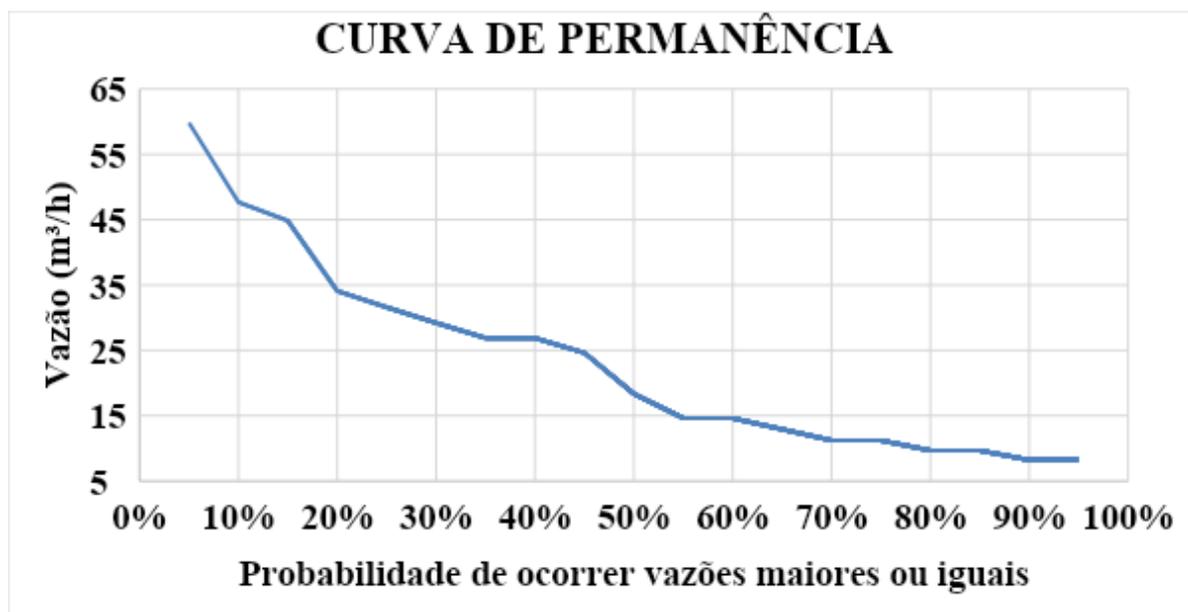
Fonte: Autor, 2022

Gráfico 09: Curva de permanência referente aos dados de vazão da seção S2.



Fonte: Autor, 2022

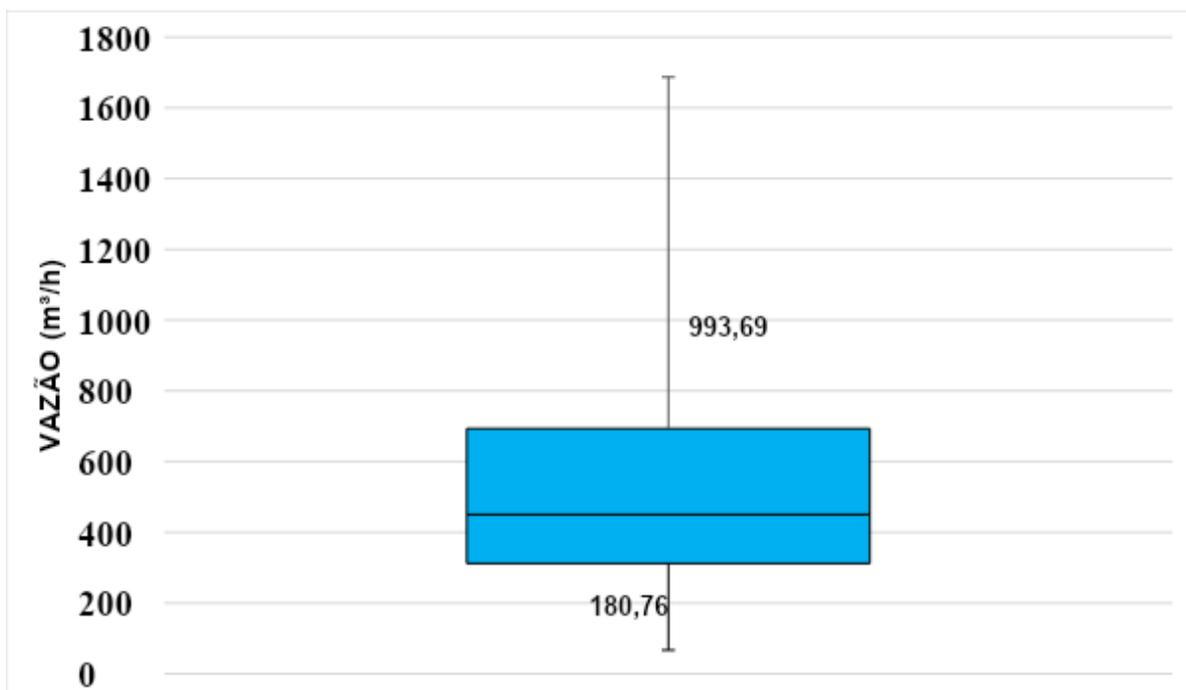
Gráfico 10: Curva de permanência referente aos dados de vazão da seção S3.



Fonte: Autor, 2022

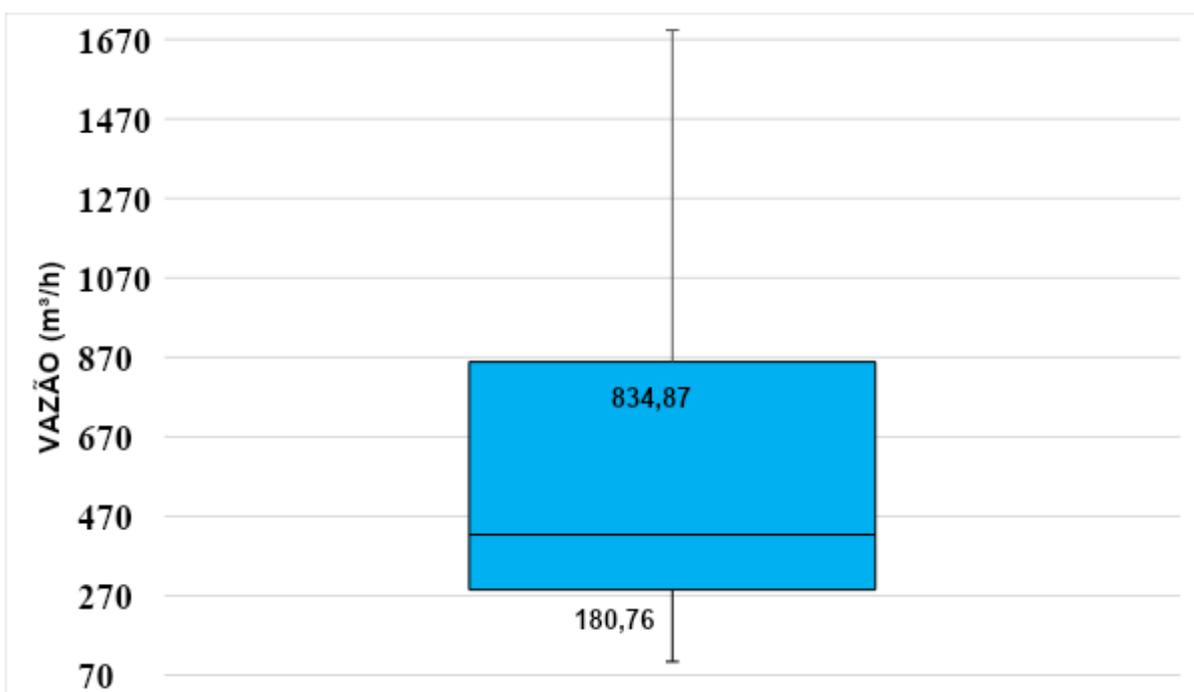
Com o intuito de identificar dados atípicos, utilizamos um método que se baseia na distância de valores lidos em relação à amplitude interquartil (IQR). Os dados obtidos a partir da aplicação deste método estão dispostos no BoxPlot apresentado nos gráficos 11, 12 e 13.

Gráfico 11: Boxplot referente aos dados de vazão da seção S1.



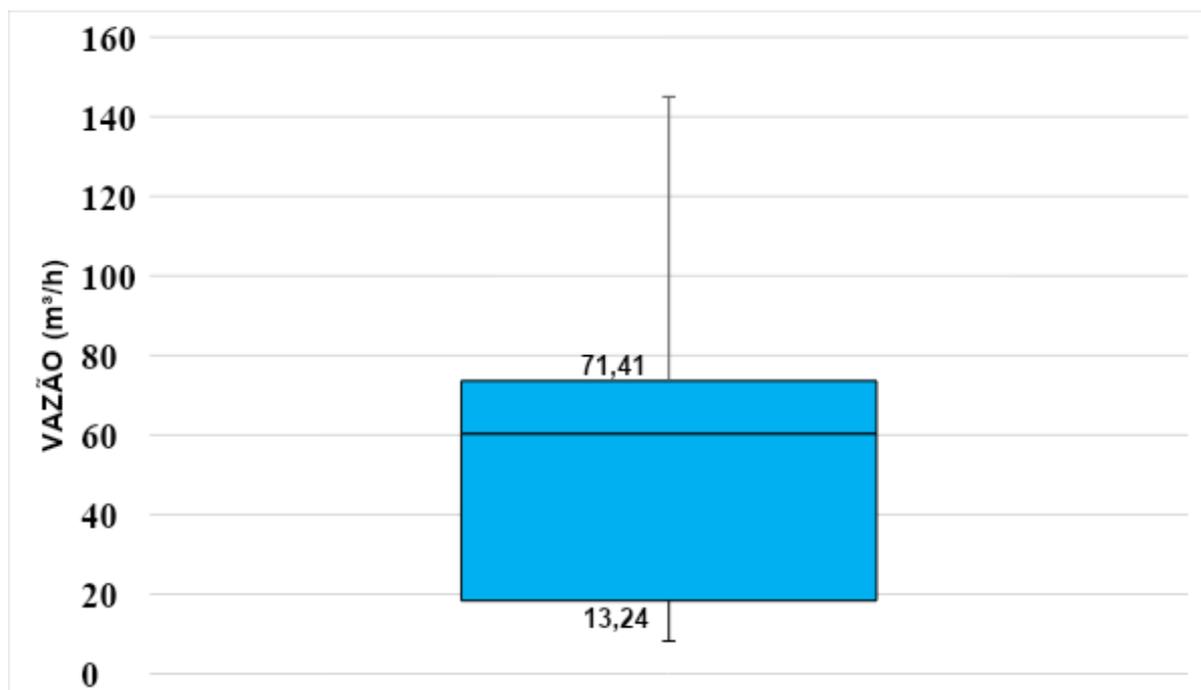
Fonte: Autor, 2022

Gráfico 12: Boxplot referente aos dados de vazão da seção S2.



Fonte: Autor, 2022

Gráfico 13: Boxplot referente aos dados de vazão da seção S3.



Fonte: Autor, 2022

5.3 Estimativa da Evapotranspiração

Com o auxílio do método de Thornthwaite, efetuamos a estimativa da evapotranspiração. A tabela 01 apresenta os valores usados na correção da nossa estimativa. Vale ressaltar, que os dados do fator de correção disponibilizados na tabela 1, estão em função da latitude da região, conforme pode ser visualizado na figura 5.

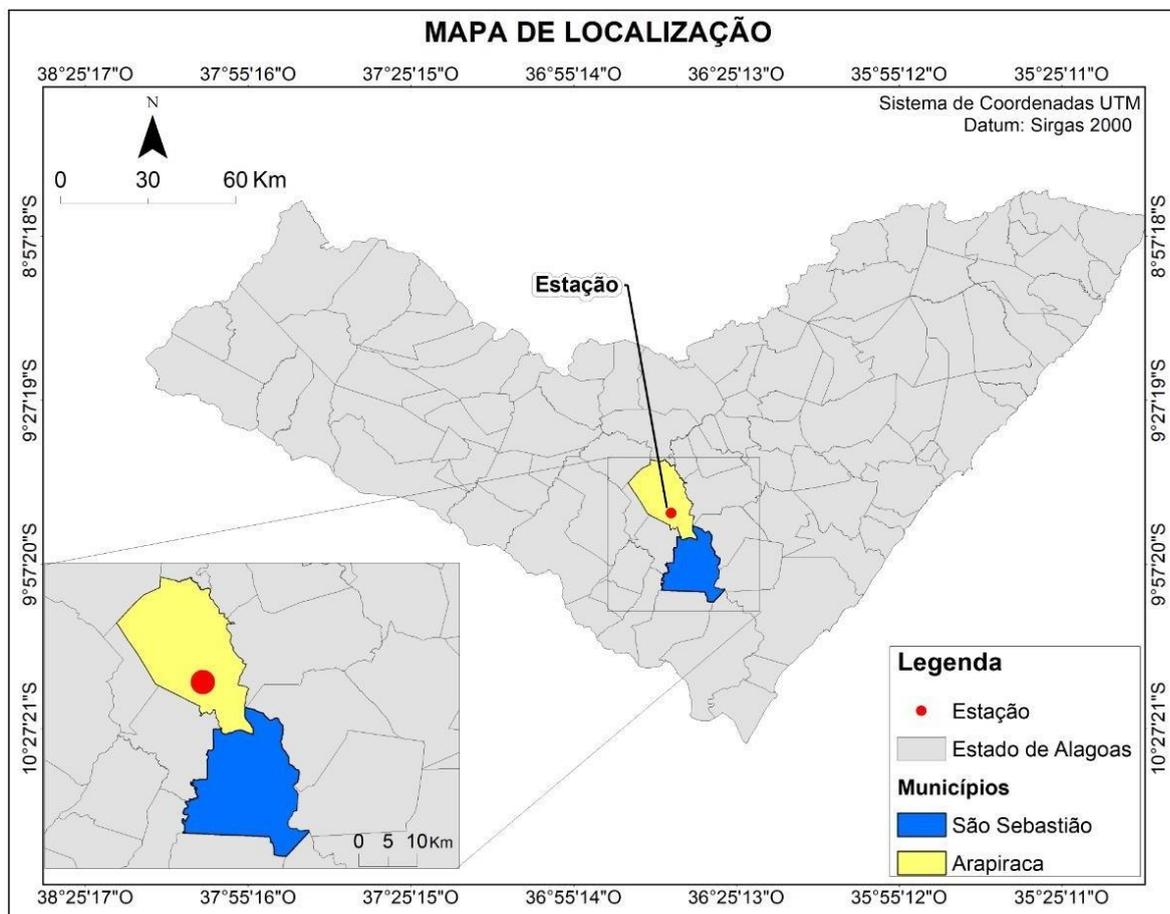
Tabela 02: Fator de correção usado na estimativa da evapotranspiração.

Mês	Fator Correção
Janeiro	1,0792
Fevereiro	0,9692
Março	1,0496
Abril	0,9904
Mai	1,0104
Junho	0,9612
Julho	1,0008
Agosto	1,0108
Setembro	1,0000
Outubro	1,0596
Novembro	1,0492
Dezembro	1,0984

Fonte: (Thornthwaite, 1948)

Adotamos como referência dados meteorológicos da estação (A353) localizada em Arapiraca-AL (Figura 8), por ser a mais próxima do município de São Sebastião.

Figura 8: Mapa de localização da estação A353



Fonte: Autor, 2022

Em posse destes dados de temperatura média mensal, aplicamos as equações (8,9,10,11,12) e estimamos a evapotranspiração.

Tabela 03: Dados obtidos de evapotranspiração adquiridos a partir da aplicação do método de Thornthwaite.

Mês	Temperatura (°C)	Índice de calor	Evapotranspiração potencial	Fator Correção	Evapotranspiração potencial corrigida
Janeiro	26,376	12,402	133,503	1,0792	144,182
Fevereiro	26,499	12,489	135,450	0,9692	131,381
Março	26,463	12,463	134,876	1,0496	141,616
Abril	26,087	12,196	128,989	0,9904	127,692
Mai	24,443	11,052	105,309	1,0104	106,360
Junho	23,061	10,119	87,835	0,9612	87,831
Julho	21,517	9,111	70,769	1,0008	70,763
Agosto	22,120	9,501	77,145	1,0108	77,912
Setembro	22,378	9,669	79,979	1,0000	79,978
Outubro	23,677	10,531	95,356	1,0596	101,073
Novembro	25,390	11,706	118,551	1,0492	124,477
Dezembro	26,221	12,291	131,063	1,0984	144,169

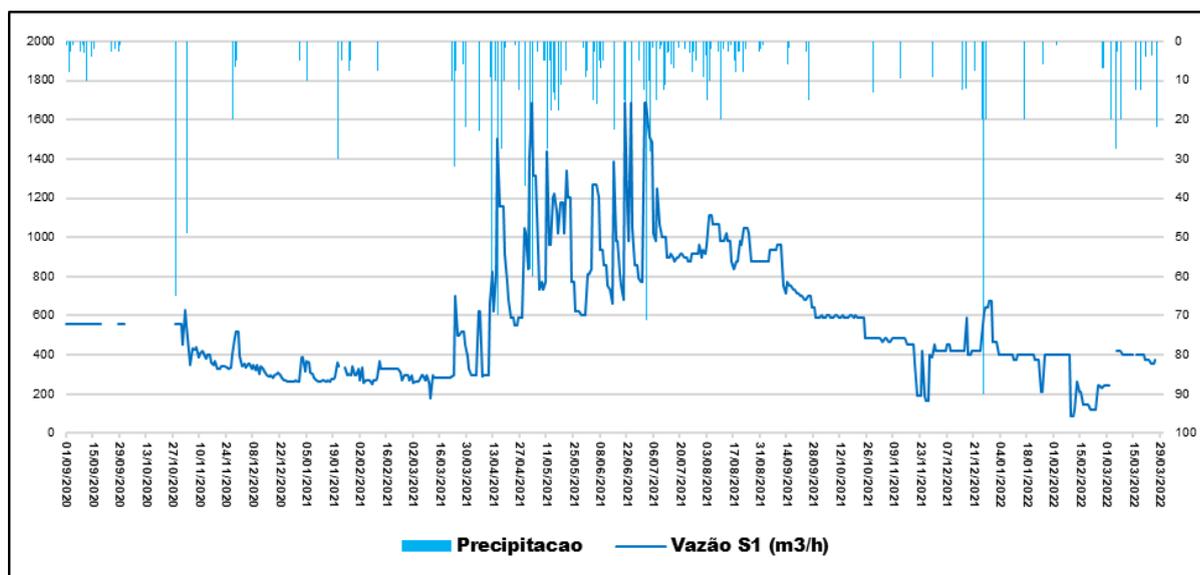
Somatório do índice de calor	133,532
------------------------------	---------

Fonte: Autor, 2022

5.4 Identificação do período de estiagem

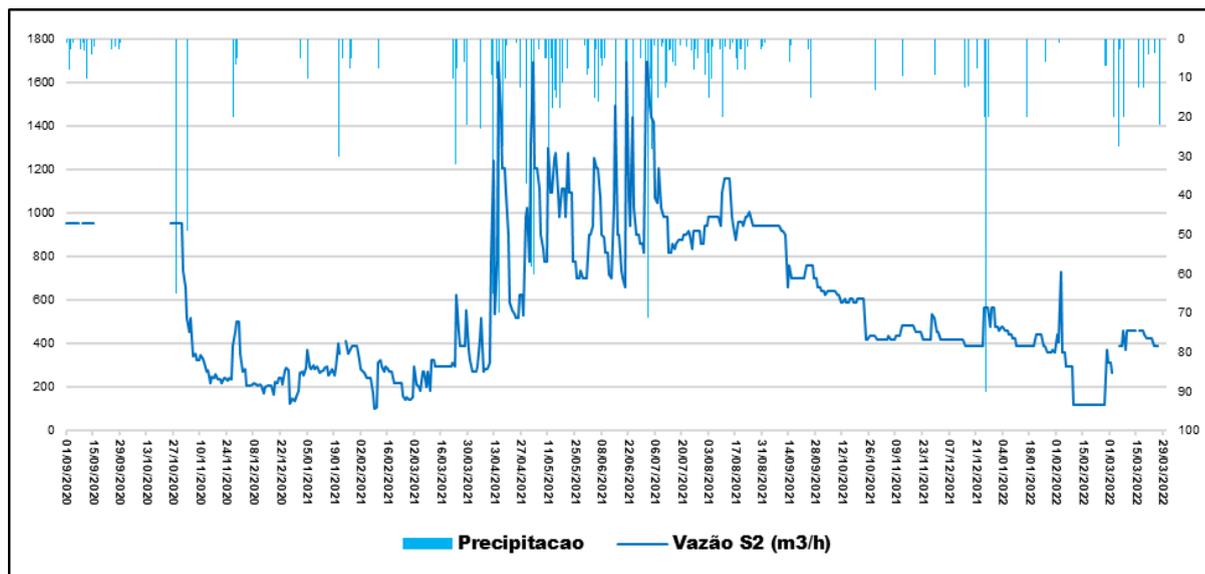
Como citado anteriormente, o método Silveira é baseado no comportamento da bacia no período de estiagem. Podemos admitir que o deplecionamento fluvial de uma determinada bacia hidrográfica é um retrato do seu comportamento após a ocorrência de precipitações. Nessa perspectiva, em pequenas bacias o processo de depleção é mais marcante devido à resposta rápida da bacia a estímulos de precipitações, em função do seu pequeno tempo de concentração (Silveira, 1998). Dessa maneira, com o intuito de identificar o período de estiagem nas seções S1, S2 e S3, plotamos fluviogramas correspondente aos dados de precipitação e vazão referentes à fazenda Rio das Carnes, conforme está demonstrado nos gráficos 14, 15 e 16.

Gráfico 14: Fluviograma referente a seção S1



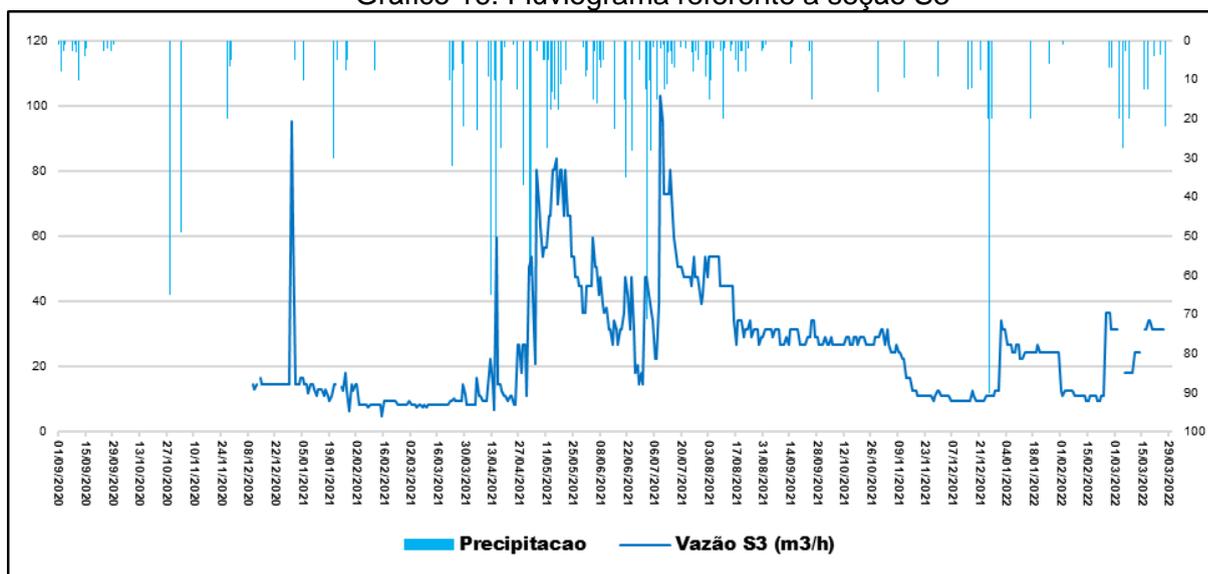
Fonte: Autor, 2022

Gráfico 15: Fluviograma referente a seção S2



Fonte: Autor, 2022

Gráfico 16: Fluviograma referente a seção S3



Fonte: Autor, 2022

A identificação do período de estiagem foi obtida a partir da análise visual direta dos fluviogramas apresentados, que podem ser observados em conjunto com os dados de precipitação referente a fazenda Rio das Carnes. Com o intuito de minimizar a subjetividade da escolha e efetuar uma melhor caracterização do processo de depleção, estabelecemos como critério que o período de estiagem sorteado deve ser selecionado a partir de um número mínimo de 2 dias antecedentes e consecutivos sem chuva.

Além disso, a condição mínima para a aplicação desta metodologia foi estabelecida como sendo o conhecimento de pelo menos três medições locais de vazão, avaliadas a cada três-quatro dias. A justificativa para este intervalo de tempo pequeno entre as medições (3-4 dias), é devido à caracterização de um intervalo inicial para a aplicação do procedimento. Vale ressaltar que intervalos maiores entre as

medições locais (8 dias, por exemplo) seriam melhores para a caracterização do deplecionamento fluvial na estiagem, em função da melhor estabilização do processo. A restrição ao aumento do intervalo de tempo entre as medições locais é devido a ocorrência de precipitações que descaracterizaram a estiagem, provocando as perdas das medições anteriores. Ademais, na identificação do período de estiagem, priorizamos os meses que tiveram menor precipitação de acordo com o gráfico 02 (setembro, outubro, novembro, janeiro, fevereiro) apresentado no item 5.1. As tabelas 4 e 5 apresentam o período de estiagem utilizado nas seções S1 e S2.

O método Silveira é baseado no período de depleção. Nesse âmbito, para a eficácia do método é fundamental que ocorra uma resposta da vazão em função da precipitação, motivo pelo qual, o método é recomendando para pequenas Bacias, visto que, essa resposta é mais evidente. No entanto, a seção S3 não apresentou resposta satisfatória. A questão é que dados diários em bacias com tempo de concentração subsidiário leva a não captar a depleção/recessão do hidrograma, mas ter informação de contribuição de vazão superficial em um dia e somente de subterrânea no dia seguinte. Desse modo, descartamos a seção S3 e aplicamos o modelo apenas nas seções S1 e S2.

Tabela 4: Período de estiagem referente a seção S1

Data	Vazão (m ³ /h)
06/11/2020	436,84
10/11/2020	410,349
13/11/2020	379,364
17/11/2020	349,028
20/11/2020	327,049

Fonte: Autor, 2022

Tabela 5: Período de estiagem referente a seção S2

Data	Vazão (m ³ /h)
05/11/2020	520,94
10/11/2020	348,10
13/11/2020	272,90
18/11/2020	258,45
22/11/2020	244,47

Fonte: Autor, 2022

Com o intuito de facilitar a visualização dos dados de vazão e precipitação referentes a seção S1, S2 e S3, elaboramos um Dashboard com o auxílio do software Power bi. Desse modo, é possível filtrar a seção e obter o gráfico de (vazão e precipitação vs tempo) e a respectiva vazão máxima, vazão mínima, vazão média e a

quantidade de medições de vazão correspondente. Também é possível filtrar por data. Vale ressaltar que o Dashboard é totalmente responsivo, e na medida em que é feito qualquer filtro, as variáveis supracitadas e os gráficos são atualizados de forma imediata.

Figura 9: Dashboard que contém os dados de vazão real e vazão modelada



Fonte: Autor, 2022

Ademais, no Dashboard também é possível filtrar os dados obtidos referentes a vazão modelada, que serão apresentados em etapa posterior.

Segue o link WEB onde o Dashboard pode ser acessado:

<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNGViNTg2MDMtZjhIMi00ZGNiLWE3MGUtYjY0ODczZDQxMTZjliwidCI6IjY1OGFkZDc1LTAwMTgtNDI1OC05MmI4LWI0ZDYxYzFkZDIhMyJ9>

5.5 Elaboração do modelo

Adotando o método Silveira como referência, criamos um modelo capaz de avaliar a disponibilidade hídrica fluvial de pequenas bacias hidrográficas, partindo do princípio que temos uma carência de dados fluviométricos. Nesse âmbito, a partir de algumas medições de vazão que reproduzem o comportamento da bacia em época de estiagem, buscamos representar como se dá a sua resposta através da simulação da precipitação em vazão.

O modelo necessita de pelo menos três medições de vazões em período de estiagem para ser eficaz.

A amostragem reduzida de vazões objetiva dar uma vinculação local às estimativas, funcionando como ancoragem hidrológica aos procedimentos de simulação. A caracterização preliminar do deplecionamento fluvial em termos de magnitude e taxa de decaimento das vazões, exige um mínimo de três medições de descargas na seção de interesse, espaçadas de alguns dias, em período de estiagem, de modo a se avaliar a estabilidade do decaimento de vazões (Silveira, 1998). O modelo proposto neste estudo possui as seguintes premissas:

- Apresenta o menor número de parâmetros possíveis;
- Permite estimar série de vazões médias diárias em pequenas bacias hidrográficas;
- Permite fácil ajuste;
- Possibilita uma fácil extensão de séries.

Em posse de dados de precipitação, evapotranspiração e vazão (pelo menos 3 medições em período de estiagem) iniciamos a criação do modelo. Aplicamos a equação 1 e calculamos a precipitação total diária, onde subtraímos a precipitação P_t (mm), em cada intervalo de tempo (diário) pela da evapotranspiração potencial E_t (mm), estimada utilizando o método de Thornthwaite (Item 5.3). Vale salientar que se a precipitação total diária apresentar um valor negativo, significa que a precipitação correspondente não foi suficiente para gerar escoamento. Assim como, nos casos em que a precipitação total diária é positiva, podemos admitir que uma determinada parcela da precipitação irá proporcionar escoamento. Posteriormente, utilizamos a equação 2 e encontramos a precipitação efetiva que representa o volume de água que irá drenar pela superfície terrestre, quando não mais infiltrará, logo é a água que está diretamente relacionada com o movimento de cheias e enchentes dos corpos hídricos (LEAL et al, 2017). Vale ressaltar que a precipitação efetiva está em função do coeficiente de infiltração. Por definição, o coeficiente de infiltração representa o número de litros que 1m^2 de área de infiltração do solo é capaz de absorver em um dia.

Originalmente, o coeficiente de infiltração é calibrado de maneira interativa. O ajuste (calibração) deste parâmetro se dá manualmente, por meio de um processo de tentativa e erro (TAMIOSSO, 2012). Ademais, para minimizar as incertezas referentes ao coeficiente de infiltração, recomendamos verificar no período de avaliação, se a vazão específica média gerada é da mesma ordem de grandeza das observadas na região. Desta forma, o modelo não estaria gerando valores acima ou abaixo em termos médios. Em posse do coeficiente de infiltração, calculamos o volume de infiltração

utilizando a equação 3 que representa o potencial que o solo tem em absorver água pela sua superfície. Além disso, segundo Silveira (1998), o volume de infiltração é considerado o volume alimentado diretamente no aquífero, desprezando-se a variabilidade da camada superior do solo associada a períodos úmidos e geralmente de pequena profundidade na cabeceira das bacias. A equação 4 nos permite encontrar a vazão de contribuição de base para determinado dia T, onde a partir da medição de vazão no período anterior Q(T-1), podemos encontrar a vazão referente ao dia posterior Q(T). O coeficiente KB apresentado na equação 7 representa o tempo de esvaziamento do reservatório em segundos. Calculamos este coeficiente a partir de medições de vazões conhecidas a partir das equações abaixo, onde Q1, Q2, Q3, Qn são vazões conhecidas e Δt é o intervalo de tempo entre as medições de vazões conhecidas em dias.

$$Q_2 = Q_1 * e^{-\Delta t/K_{1b}} \quad (15)$$

$$Q_3 = Q_2 * e^{-\Delta t/K_{2b}} \quad (16)$$

$$Q_n = Q_{(n-1)} * e^{-\Delta t/K_{nb}} \quad (17)$$

$$K_{1b} = \Delta t * \ln\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right) \quad (18)$$

$$K_{2b} = \Delta t * \ln\left(\frac{Q_2}{Q_3}\right) \quad (19)$$

$$K_{nb} = \Delta t * \ln\left(\frac{Q_{(n)}}{Q_{(n-1)}}\right) \quad (20)$$

$$K_b = \frac{K_{1b} + K_{2b} + \dots + K_{nb}}{n} \quad (21)$$

Vale ressaltar, que o valor deste parâmetro depende diretamente das medições de vazões conhecidas. Além disso, ele pode variar entre o período chuvoso e a estiagem, à medida que diferentes partes da bacia contribuem para a vazão de saída.

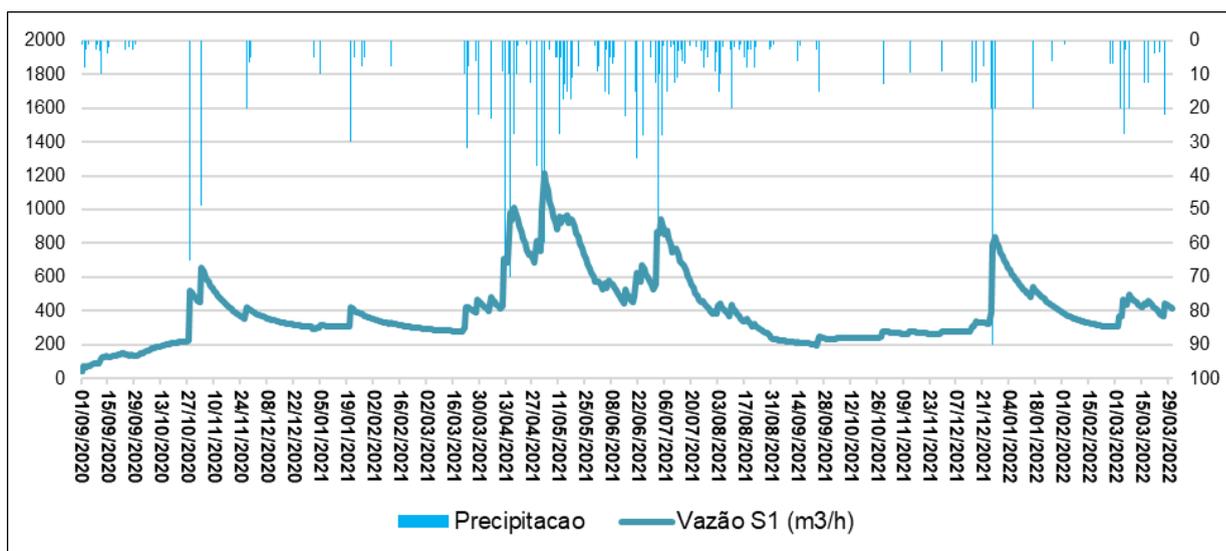
Ademais, o parâmetro K_b deve representar o decaimento do hidrograma. Diante do fato, devemos buscar vazões crescentes, tais como $Q_1 > Q_2 > Q_3 > Q_n$. Analisando as equações (19,20,21,22) podemos perceber que se as vazões forem decrescentes, tais como $Q_1 < Q_2$, o resultado do K_b será negativo e isto acarretará em um resultado inadequado para a vazão modelada. Analogamente, também se produz efeito inadequado, quando temos vazões iguais, tais como $Q_1 = Q_2$. Vale ressaltar que em

teoria o valor de K_b não necessita ser corrigido, caso ocorram resultados inadequados, é coerente que se procure outro período de estiagem.

5.6 Aplicação do modelo

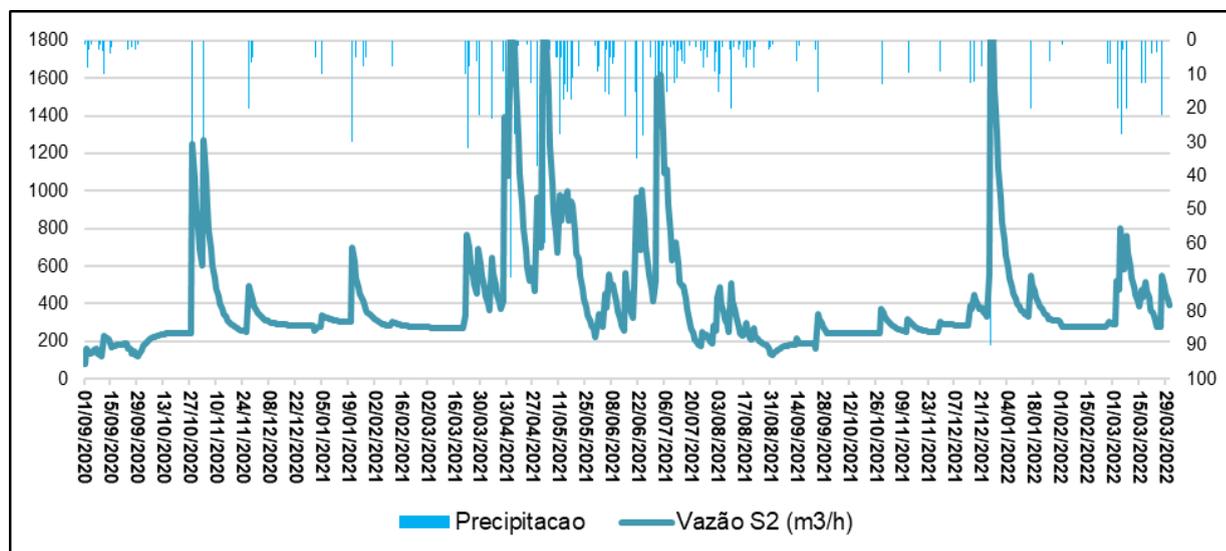
Efetuamos a aplicação do modelo adotando como referência dados de precipitação e vazão localizados no perímetro da fazenda Rio das Carnes. A partir da visualização dos gráficos 17 e 18, podemos observar o resultado desta modelagem nas seções S1 e S2, onde está demonstrado a precipitação e a vazão modelada. Vale ressaltar que na aplicação deste modelo utilizamos dados de precipitação, evapotranspiração e apenas 3 medições de vazões, onde adotamos como referência o método Silveira.

Gráfico 17: Resultado da modelagem na seção S1.



Fonte: Autor, 2022

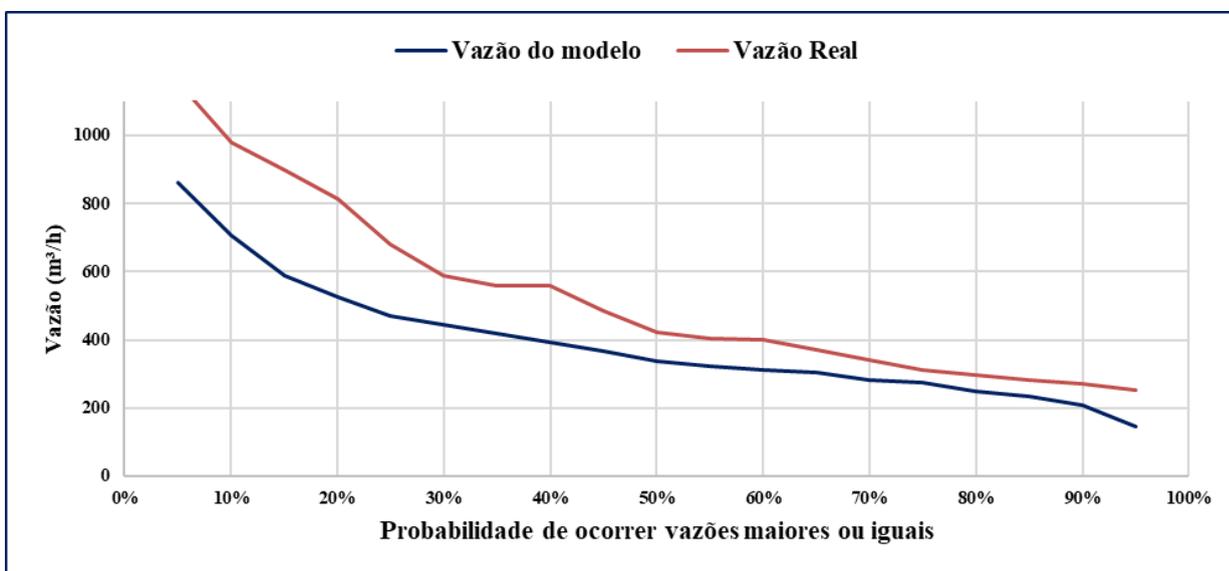
Gráfico 18: Resultado da modelagem na seção S2.



Fonte: Autor, 2022

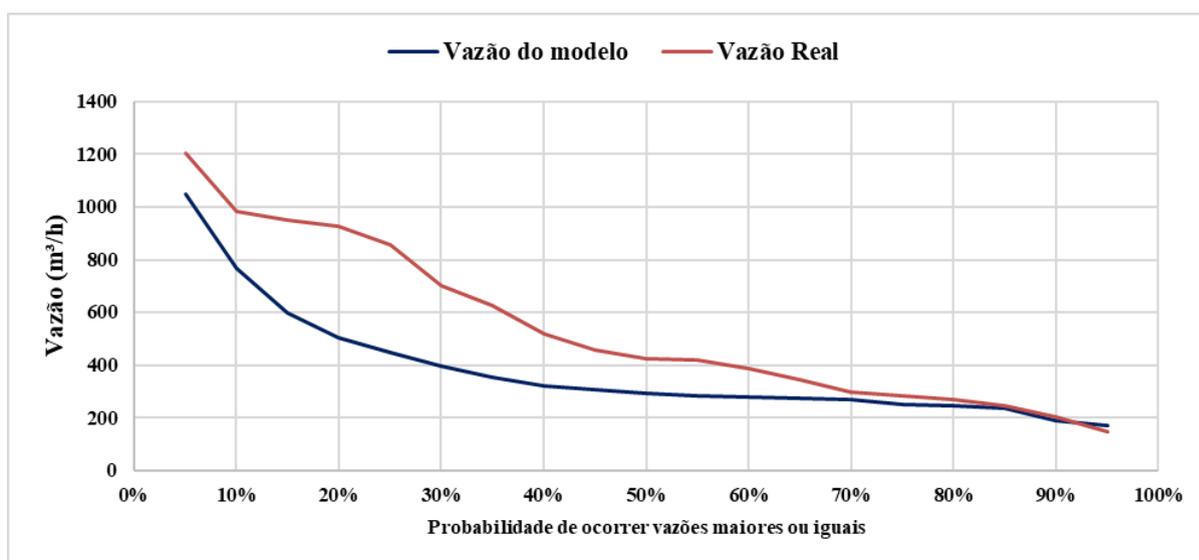
Analisando os gráficos 17 e 18 podemos constatar que é notável a resposta da vazão modelada em função da precipitação. Também foi possível gerar a curva de permanência nas seções S1 e S2. Os gráficos 19 e 20 apresentam a curva de permanência gerada pelo modelo e a curva de permanência gerada pelas medições de vazões de referência para fins de comparação.

Gráfico 19: Curva de permanência apresentando a vazão gerada pelo modelo e a vazão real na seção S1.



Fonte: Autor, 2022

Gráfico 20: Curva de permanência apresentando a vazão gerada pelo modelo e a vazão real na seção S2.



Fonte: Autor, 2022

Tabela 6: Q90 gerada pelo modelo e Q90 referente às medições reais.

	Q90 Real	Q90 do modelo	Erro relativo
SEÇÃO S1	269,95 m ³ /h	209,95 m ³ /h	22,22%
SEÇÃO S2	205,32 m ³ /h	189,49 m ³ /h	7,71%

Fonte: Autor, 2022

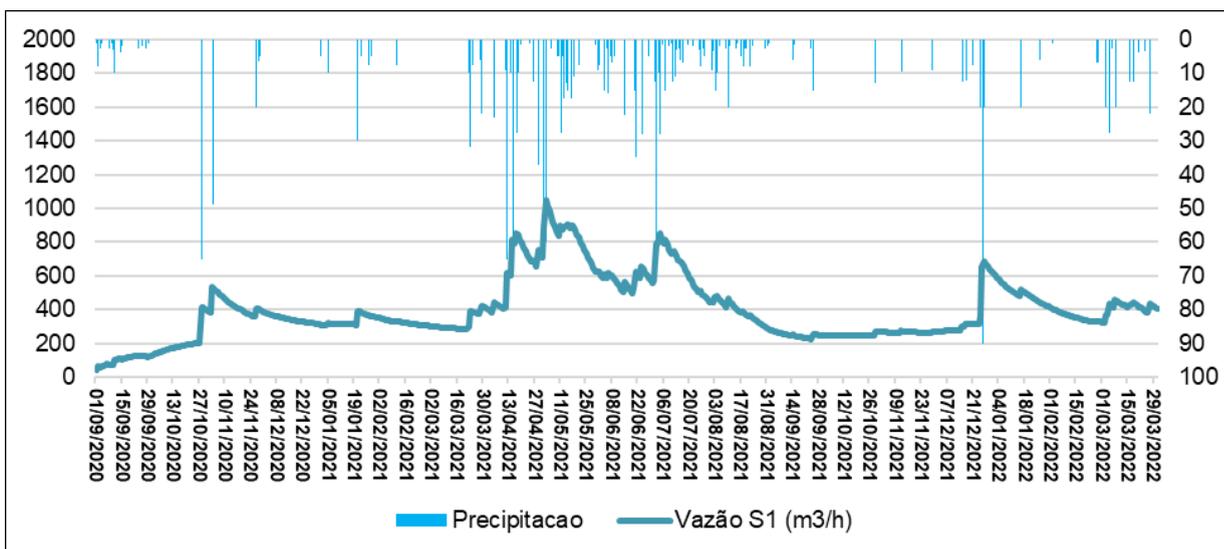
A partir dos resultados obtidos estimamos que a vazão de referência simulada (Q90) referente à seção S1 correspondeu a 209,95 m³/h, valor 22,22% inferior em relação à vazão observada. A questão é que às 3 medições de vazões sorteadas tem grande influência nos resultados obtidos, podendo ocorrer o fato, das medições sorteadas se apresentarem como inferiores em relação a média da série de vazão de referência. Perceba que as medições sorteadas (Tabela 4), estão todas abaixo da média da série de vazão de referência (567,25 m³/h).

Na seção 2, a Q90 do modelo apresentou um valor de 189,49 m³/h, com um erro relativo de 7,71%. Nesse âmbito, (SILVEIRA, 1998) aplicou o modelo em 6 bacias localizadas no Rio Grande do Sul, e encontrou erros na ordem de 20%. Além disso, (POGIAN, 2016), executou o modelo em 8 bacias localizadas nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, e também encontrou erros próximos a 20%. Ademais, observamos no gráfico 19, que as vazões com probabilidade entre 70 a 95% apresentaram bom ajuste em relação à curva de permanência com medições reais, enquanto que para probabilidades inferiores a 70% as vazões mais uma vez, foram subestimadas. Vale ressaltar, que o modelo é extremamente sensível aos dados de vazão referentes ao período de estiagem, caso fossem utilizados outros dados os resultados seriam diretamente afetados.

5.7 Melhoria da estimativa a partir da assimilação de novos dados.

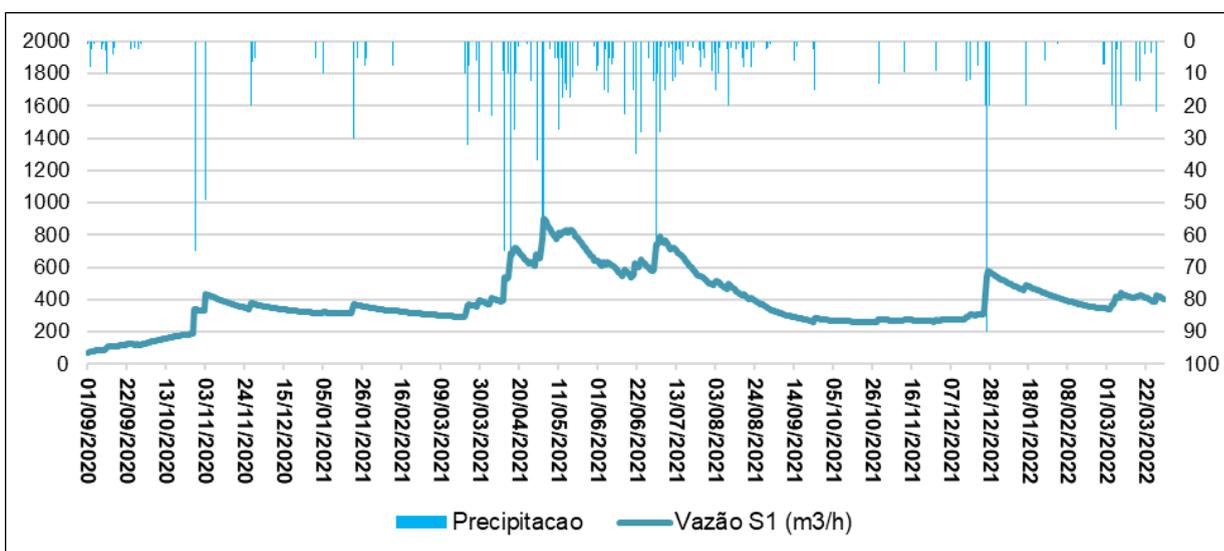
O método Silveira necessita de pelo menos 3 medições de vazões para ser eficaz. No item 5.6 efetuamos a aplicação do método utilizando 3 medições. Neste item, aplicamos o modelo utilizando 4 e 5 medições, com o intuito de estudar a melhoria da estimativa do modelo quando adicionamos novos dados. Os gráficos abaixo apresentam os resultados obtidos. Reiteramos que os gráficos apresentados, podem ser melhor visualizado no Dashboard que disponibilizamos o link no item 7.4.

Gráfico 21: Precipitação e Vazão modelada na seção S1, usando 4 medições de vazões.



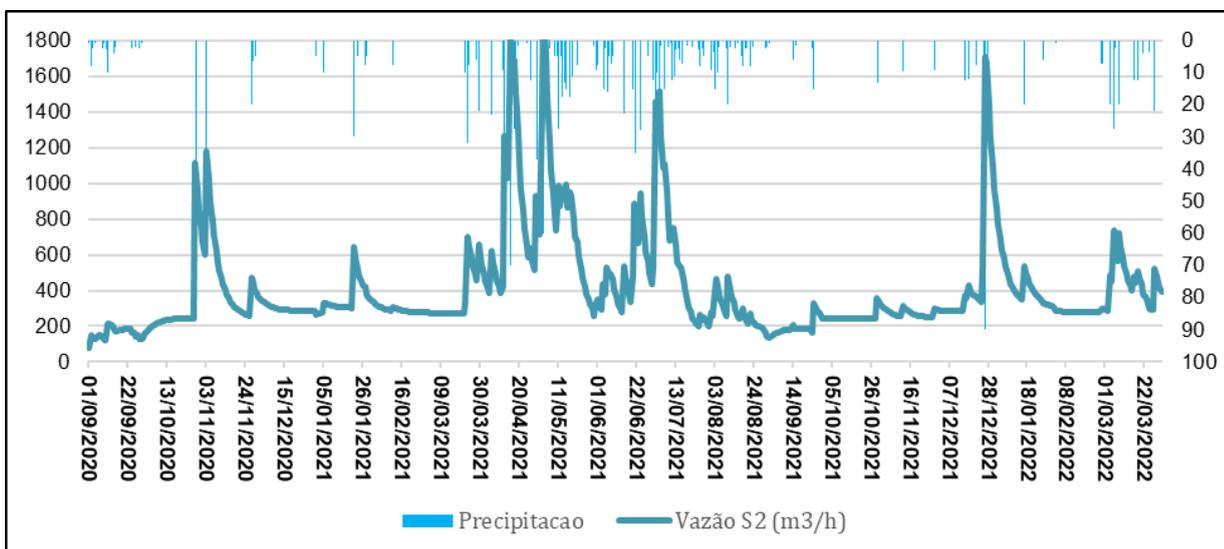
Fonte: Autor, 2022

Gráfico 22: Precipitação e Vazão modelada na seção S1, usando 5 medições de vazões.



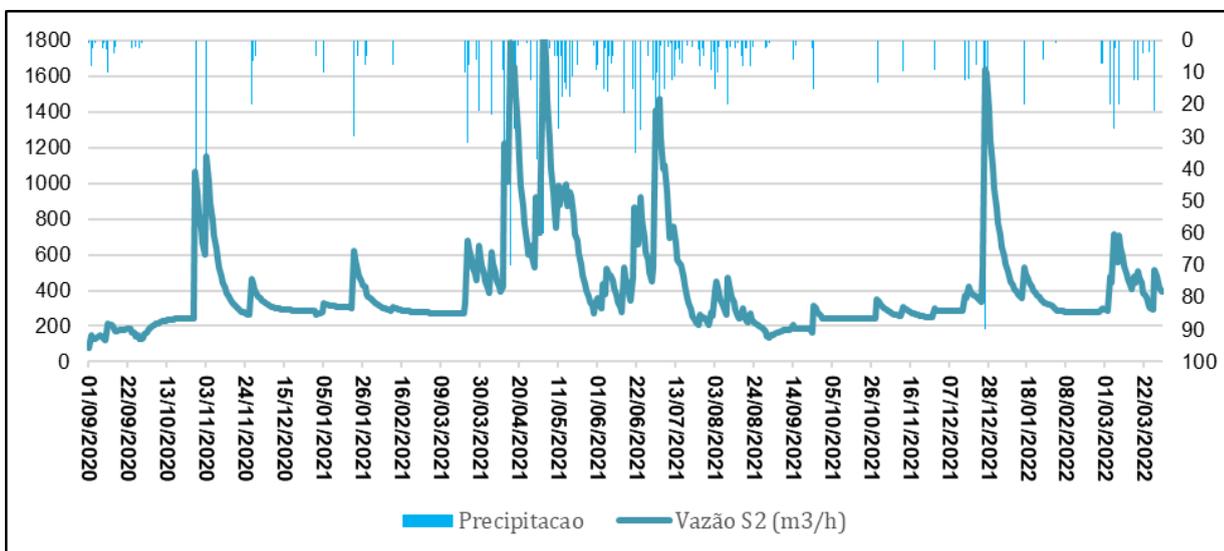
Fonte: Autor, 2022

Gráfico 23: Precipitação e Vazão modelada na seção S2, usando 4 medições de vazões.



Fonte: Autor, 2022

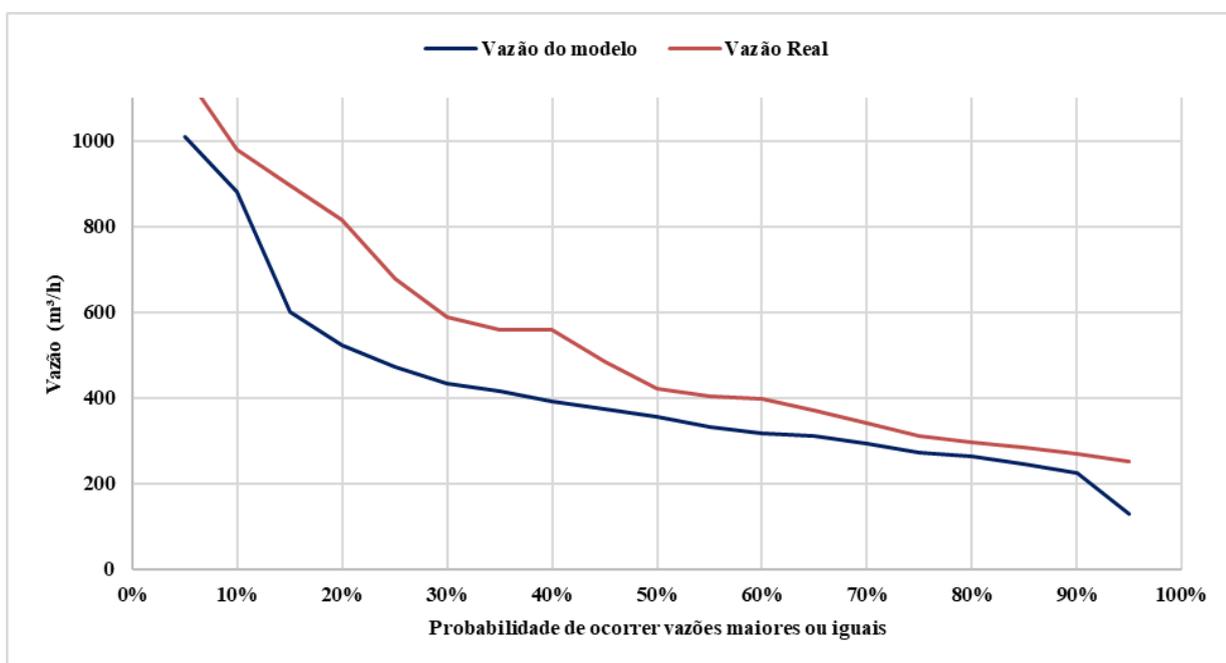
Gráfico 24: Precipitação e Vazão modelada na seção S2, usando 5 medições de vazões.



Fonte: Autor, 2022

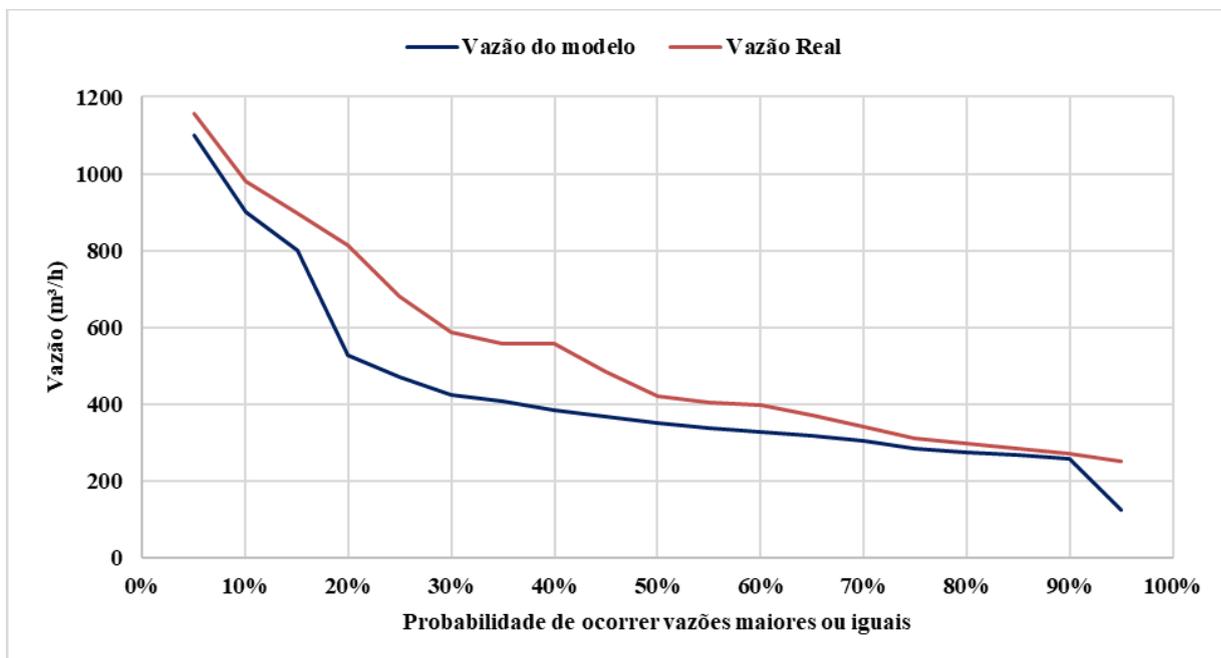
Os gráficos abaixo apresentam uma comparação entre a curva de permanência gerada pelo modelo utilizando 4 e 5 medições de vazão com a curva de permanência gerada pelas medições reais.

Gráfico 25: Curva de permanência apresentando a vazão gerada pelo modelo e a vazão real na seção S1 usando 4 medições de vazões.



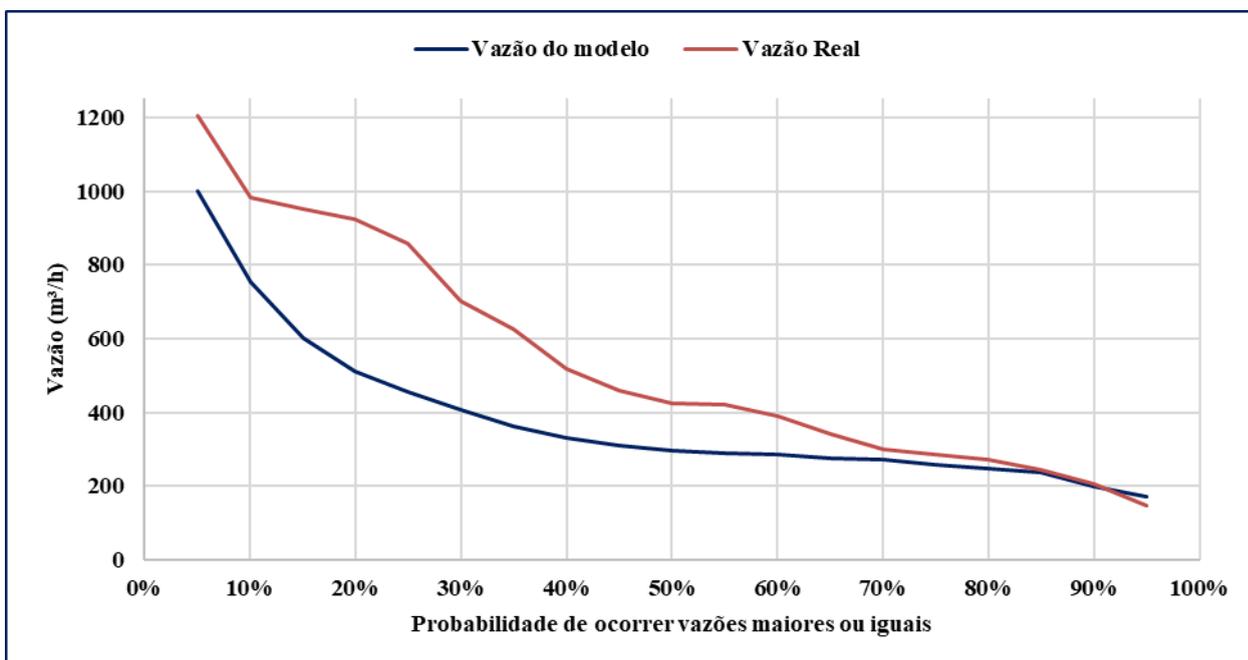
Fonte: Autor, 2022

Gráfico 26: Curva de permanência apresentando a vazão gerada pelo modelo e a vazão real na seção S1 usando 4 medições de vazões.



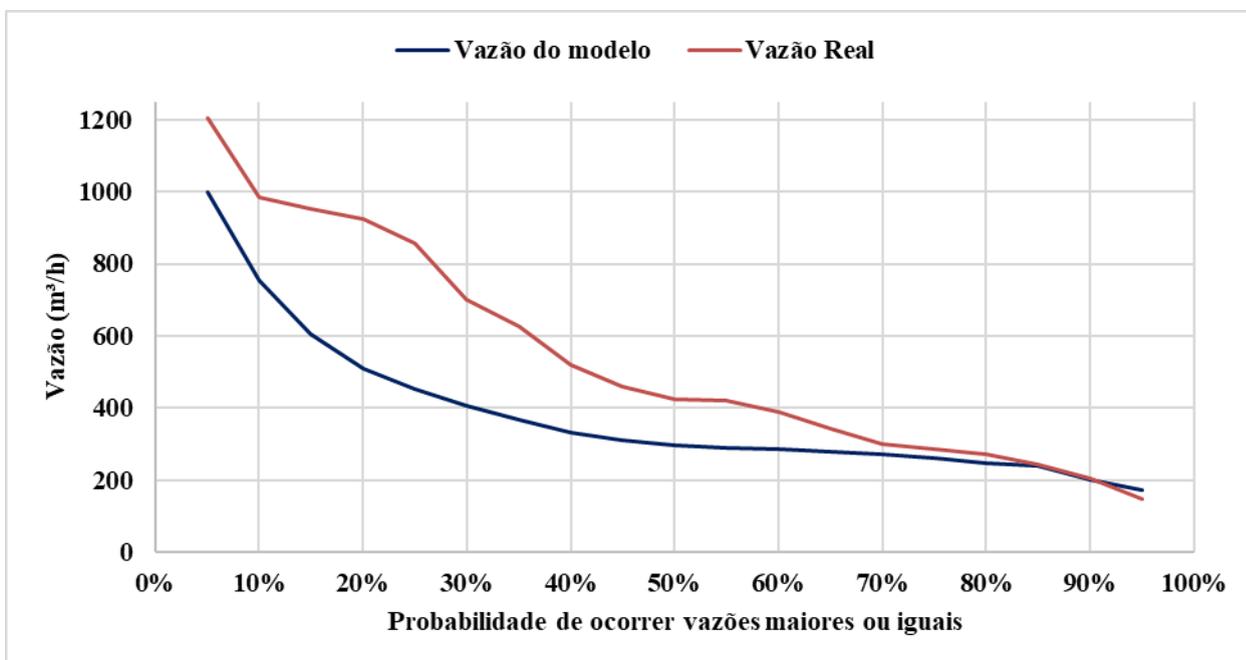
Fonte: Autor, 2022

Gráfico 27: Curva de permanência apresentando a vazão gerada pelo modelo e a vazão real na seção S2 usando 4 medições de vazões.



Fonte: Autor, 2022

Gráfico 28: Curva de permanência apresentando a vazão gerada pelo modelo e a vazão real na seção S2 usando 5 medições de vazões.



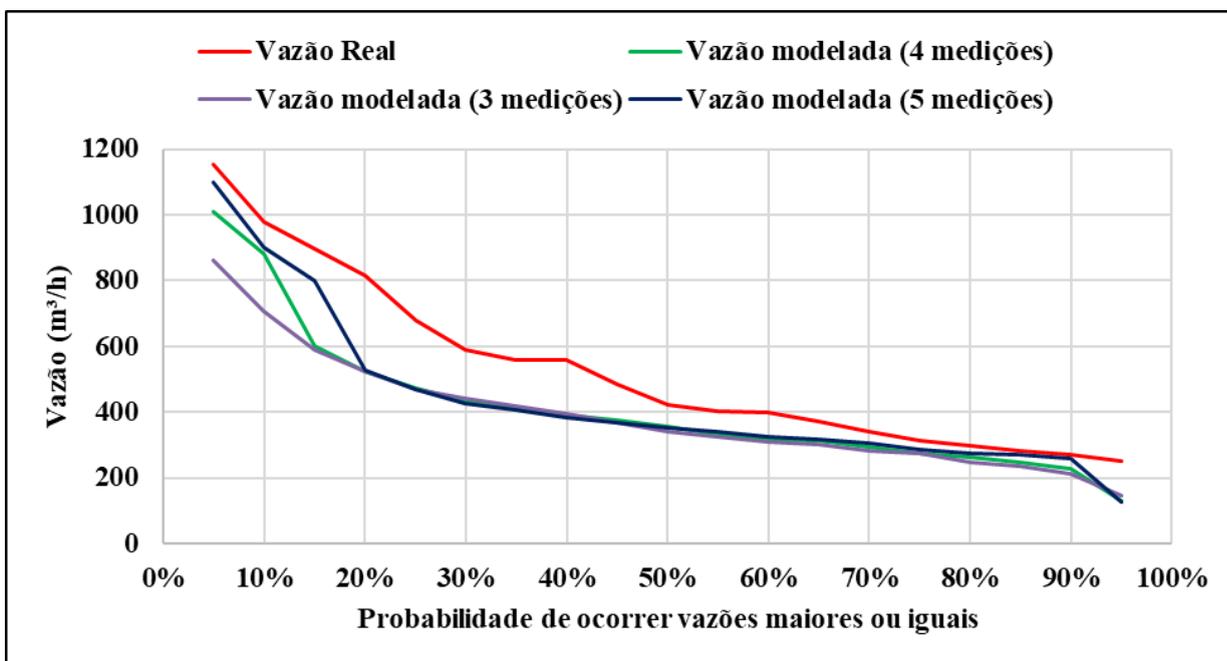
Fonte: Autor, 2022

Tabela 7: Q90 gerada pelo modelo e Q90 referente às medições reais.

SEÇÃO	Q90 Real	Q90 do modelo	Erro relativo
S1 (3 medições)	269,95 m³/h	209,95 m³/h	22,22%
S1 (4 medições)	269,95 m³/h	225,88 m³/h	16,32%
S1 (5 medições)	269,95 m³/h	259,24 m³/h	3,97%
S2 (3 medições)	205,32 m³/h	189,49 m³/h	7,71%
S2 (4 medições)	205,32 m³/h	197,95 m³/h	3,59%
S2 (5 medições)	205,32 m³/h	198,79 m³/h	3,18%

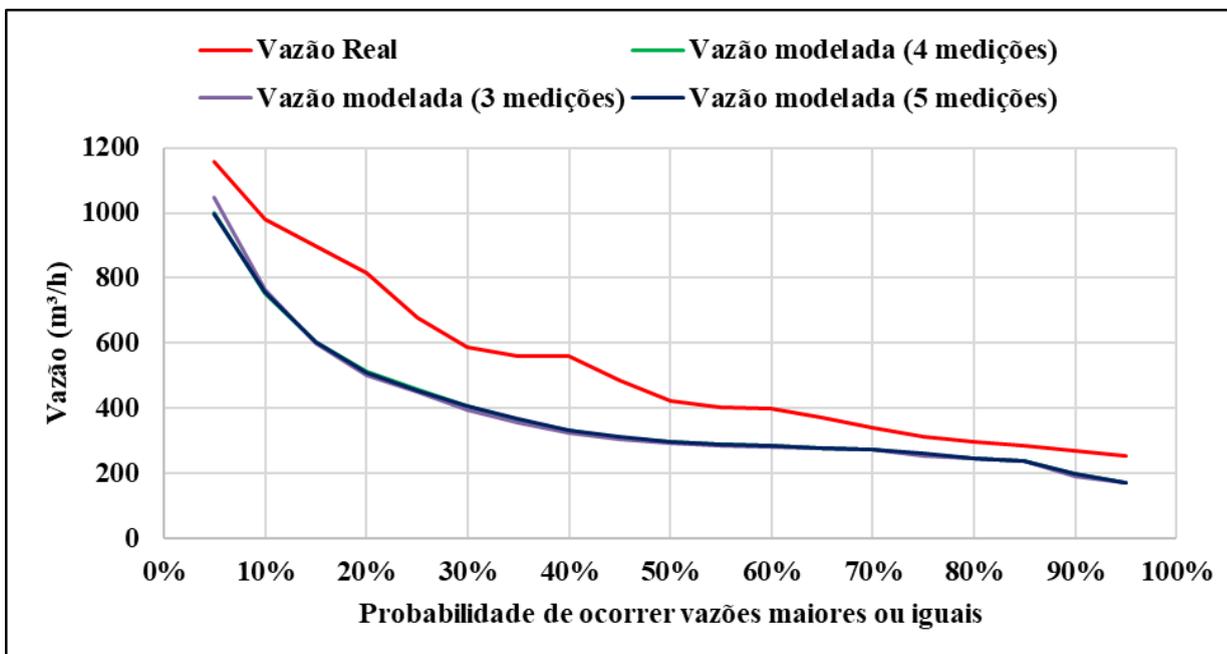
Fonte: Autor, 2022

Gráfico 29: Curvas de permanência de todas as medições Seção S1.



Fonte: Autor, 2022

Gráfico 30: Curvas de permanência de todas as medições Seção S2.



Fonte: Autor, 2022

Analisando a tabela 6 podemos perceber que na medida em que adicionamos novas medições de vazões, a Q90 referente a vazão modelada, se aproxima mais da Q90 da vazão real. Fato que também pode ser evidenciado pela diminuição do erro relativo, quando ocorre a assimilação de novos dados. Desse modo, o efeito ocorrido quando adicionamos novos dados se mostrou considerável. Visto que quanto a

aproximação com as medições reais é diretamente proporcional ao número de medições, o que justifica todo o esforço em adicionar no modelo, o maior número de medições possível.

6 CONCLUSÕES

Utilizando o método Silveira como referência, desenvolvemos um modelo chuva-vazão que permite estimar a vazão de um rio. Para construir esse modelo, utilizamos informações sobre evapotranspiração (calculada com base no Método de Thornthwaite), dados de precipitação e pelo menos três medições de vazão. É importante destacar que o método Silveira é mais eficiente quando aplicado em regiões de cabeceira de rios, ou seja, em suas nascentes. Por isso, aplicamos o modelo no Rio das Carnes, localizado no município de São Sebastião. Para validar o modelo, selecionamos aleatoriamente três medições de vazão obtidas por meio de duas réguas localizadas no Rio das Carnes, que foram identificadas como Seção S1 e Seção S2. Inicialmente, tínhamos a intenção de validar o modelo utilizando também a Seção S3. No entanto, após analisar os dados, não encontramos uma boa relação entre os dados de precipitação e vazão nessa seção. É importante ressaltar que as medições de vazão foram sorteadas e foram selecionadas durante um período de estiagem, para garantir que o modelo fosse validado em condições hidrológicas semelhantes.

Aplicamos o modelo e obtivemos como produto séries de vazão modelada referentes às duas seções, onde plotamos a curva de permanência correspondente. Com o intuito de verificar a assertividade do modelo, comparamos a curva de permanência gerada pela série de vazão modelada com a curva de permanência gerada pela série de vazão real. Nessa perspectiva, constatamos que as vazões com probabilidade entre 70 a 95% na seção S2 apresentaram bom ajuste em relação à curva de permanência com medições reais, enquanto que para probabilidades inferiores a 70% as vazões foram subestimadas. Além disso, a Q90 apresentou valores aceitáveis nas seções S1 e S2, principalmente a seção S2 que apresentou um erro de 7,71%.

Executamos simulações no modelo com o intuito de caracterizar a melhoria da estimativa a partir da assimilação de novos dados. Nesse contexto, efetuamos novas aplicações no modelo, só que desta vez, utilizamos 4 e 5 medições de vazões de entrada. Percebemos uma melhoria nas estimativas, quando calibramos o modelo adicionando novos dados, fato evidenciado pela diminuição do erro referente a Q90. Vale ressaltar que para proporcionar uma melhor visualização da série de vazão modelada, elaboramos um Dashboard e disponibilizamos o link (BULHOES, 2022).

Recomenda-se em futuros estudos a aplicação do modelo em bacias hidrográficas diferentes, a fim de caracterizar a melhoria das estimativas de vazão em função da região geográfica em que o método é aplicado. Seria interessante avaliar a eficácia do método em regiões de cabeceira e verificar como as estimativas de vazão são aprimoradas nessas áreas. Além disso, um estudo relevante seria investigar até que ponto o tempo de concentração é um fator determinante para a aplicação efetiva do método Silveira.

7 REFERÊNCIAS

- Amorim, E.L.C.; Oliveira Netto, A.P. ; Menciondo, E.M.. ESTUDO DE MÉTODOS PARA REGIONALIZAÇÃO DE VAZÃO. 2005.
- Agência Nacional de Águas. Disponível em: <hidroweb.com> Acesso em 15/01/2022. Agência Nacional de Águas. Outorgas dos direitos de uso de recursos hídricos, 2019.
- CESAR, Pedro Igor; HORA, Mônica. REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÍNIMAS DA BACIA DO RIO POMBA, 2016.
- COLLISCHONN, Bruno; LOPEZ, Alan. SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA ANÁLISE DE OUTORGA NA BACIA DO RIO PARANÁ, 2016.
- CAROLO, Fabiana. Outorga de direito de uso de recursos hídricos: Instrumento para o desenvolvimento sustentável? Estudo das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá. jan. 2007.
- CRUZ, J.C. Disponibilidade hídrica para outorga: avaliação de aspectos técnicos e conceituais. Tese de Doutorado. Programa de pós-graduação em engenharia de recursos hídricos e saneamento ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 189p. 2001.
- FONTOURA, Fontoura et al. DETERMINAÇÃO DE CURVA DE PERMANÊNCIA EM PEQUENAS BACIAS UTILIZANDO O MÉTODO SILVEIRA. 2016.
- HORN, João. Estimativa de vazão com dados escassos: novas hipóteses para o método Silveira, 2016.
- LEAL, Darione et al. DETERMINAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO EFETIVA EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA EXPERIMENTAL. PPGMQ – Universidade Federal de Uberlândia, 2017.
- MAIOLI, Mayara. INFERÊNCIA BAYESIANA COMO UM PROCEDIMENTO DE DECISÃO, 2014.
- MASCARENHAS, João; BELTRÃO, Breno; JUNIOR, Luiz. DIAGNÓSTICO DO MUNICÍPIO DE SÃO SEBASTIÃO. PROJETO CADASTRO DE FONTES DE ABASTECIMENTO POR ÁGUA SUBTERRÂNEA ESTADO DE ALAGOAS, [S. I.], ago. 2005.
- MAXIM, Laura; SLUIJS, Jeroen P. van der Sluijs. Quality in environmental science for policy: Assessing uncertainty as a component of policy analysis. p. 482-492, 21 mar. 2011.
- MONTEIRO, Kleython; SANTOS, Jardel. CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CORURUPE. 2019.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL. PROJETO CADASTRO DE FONTES DE ABASTECIMENTO POR ÁGUA SUBTERRÂNEA. p. 1-21, ago. 2005.
- PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. (org.). Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: ABRH, 2003.
- PESSOA, Margarita. OBTENÇÃO DE VAZÕES EM LOCAIS SEM MONITORAMENTO ATRAVÉS DE UM MODELO HIDROLÓGICO COM ASSIMILAÇÃO DE DADOS, 2017.
- PEREIRA, Guilherme; CAVALCANTI, Bruna. SIGA: O NOVO SISTEMA DE SUPORTE À DECISÃO PARA GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS. Recursos Hídricos, 2016.
- POGIAN, Mauricio. ESTIMATIVA DE VAZÃO MÍNIMA EM PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS. 2016.

REVISTA BRASILEIRA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL. Estimativas de vazões mínimas mediante dados pluviométricos na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Santa Bárbara, Goiás. v. 15, p. 9-15, 2011.

SEMARH. Superintendência de Recursos Hídricos. MANUAL TÉCNICO DE OUTORGA, v. 1º Versão, 2012.

SILVA, Údson. EFEITO DAS INCERTEZAS DA ESTIMATIVA DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA SUPERFICIAL POR MODELAGEM HIDROLÓGICA NA APLICAÇÃO DA OUTORGA DE DIREITO DE USO DE RECURSOS HÍDRICOS. 2019.

SILVA JÚNIOR, C. A. Análise regional de funções hidrológicas aplicáveis à avaliação de vazões mínimas nas bacias hidrográficas dos rios Itapemirim e Itabapoana (ES). 2014. 238 fls. – Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

SILVEIRA, A. L.L & TUCCI, C. E. M. Quantificação de Vazão em Pequenas Bacias sem Dados. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. V.3 n.3, p.111 – 131. 1998.

SILVEIRA, A.L.L. Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica. In: TUCCI, C.E.M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. Porto Alegre: UFRGS/ABRH. 4ª Ed. Cap. 2, p35-51. 2009.

SILVEIRA, A.L.L.; LOUZADA, J.A.; BELTRAME, L.F. Infiltração e Armazenamento no solo. In: TUCCI, C.E.M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. Porto Alegre: UFRGS/ABRH. 4ª Ed. Cap. 9, p335-372. 2009.

SILVEIRA, A.L.L.; SILVEIRA, G.L. Vazões mínimas. In: PAIVA, J.B.D; PAIVA, E.M.C.D. Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: ABRH. 2001. Cap. 5, p125-163.

SILVEIRA, Geraldo; TUCCI, Carlos; SILVEIRA, André. QUANTIFICAÇÃO DE VAZÃO EM PEQUENAS BACIAS SEM DADOS, 1998.

SILVEIRA, G.L. Quantificação de vazão em pequenas bacias carentes de dados. Porto Alegre: UFRGS – Curso de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 1997. 180f. Tese de Doutorado.

SILVEIRA, G.L.; TUCCI, C.E.M. Monitoramento em pequenas bacias para a estimativa de disponibilidade hídrica. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Vol. 3, n.3, p97-110. 1998.

SILVEIRA, R.L. da, Proposição de um modelo determinista de simulação hidrológica para bacias hidrográficas com dados pluvio-hidrométricos escassos. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre. IPH/UFRGS. 1974.

TAMIOSSO, M. F. Avaliação do método Silveira com uso de dois modelos chuva-vazão para estimativa de disponibilidade hídrica em pequenas bacias com pequena amostragem de vazão. 2012. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

THORNTHWAITTE, C.W., HOLZMAN, B. 1939. The Determination of evaporation from land and water surfaces. Monthly Weather Review. v67, p.4-11.

TUCCI, C.E.M. Modelos hidrológicos. 2a ed. Porto Alegre: Ed. da UFRGS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2005.

TUCCI, C. E.M. 2002. Regionalização de vazões. Editora da Universidade. UFRGS. 1º edição. Porto Alegre.

WESLLEY BULHOES, 2022. Dashboard com os dados da Vazão Real e Modelada, referente as seções S1,S2 e S3. Disponível em:

<<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoieGViNTg2MDMtZjhIMi00ZGNiLWE3MGUtYjY0ODczZDQxMTZjliwidCI6IjY1OGFkZDc1LTAwMTgtNDI1OC05MmI4LWI0ZDYxYzFkZDIhMyJ9>>.