



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LARISSA GOMES DE LIMA

**AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE HÍDRICA DOS RESERVATÓRIOS  
ESTRATÉGICOS DA SUB-BACIA DO ALTO PIRANHAS - PB**

João Pessoa - PB

Setembro - 2019

LARISSA GOMES DE LIMA

**AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE HÍDRICA DOS RESERVATÓRIOS  
ESTRATÉGICOS DA SUB-BACIA DO ALTO PIRANHAS - PB**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba, como um dos requisitos obrigatórios para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga.

João Pessoa – PB

Setembro – 2019

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

L732a Lima, Larissa Gomes de.

Avaliação da sustentabilidade hídrica dos reservatórios estratégicos da sub-bacia do Alto Piranhas - PB / Larissa Gomes de Lima. - João Pessoa, 2019. 98 f. : il.

Orientação: Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga. Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Escassez hídrica. 2. Modelos matemáticos. 3. Semiárido nordestino. 4. PISF. I. Braga, Ana Cláudia Fernandes Medeiros. II. Título.

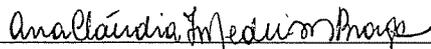
UFPB/BC

## FOLHA DE APROVAÇÃO

LARISSA GOMES DE LIMA

### **AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE HÍDRICA DOS RESERVATÓRIOS ESTRATÉGICOS DA SUB-BACIA DO ALTO PIRANHAS - PB**

Trabalho de Conclusão de Curso em 26/09/2019 perante a seguinte Comissão Julgadora:



Prof.ª. Dr.ª. Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



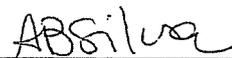
Prof. Dr. Cristiano das Neves Almeida  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



Prof.ª. Andrea Brasiliano Silva  
Matrícula Siape: 1549557  
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

Dedico este trabalho e a conclusão deste curso à minha mãe, mulher batalhadora, que sempre incentivou a educação de suas duas filhas e nunca deixou faltar amor.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pelas oportunidades de aprimorar meus conhecimentos e pela saúde e coragem para concretizar todas as conquistas alcançadas até hoje.

À minha mãe, Rosângela, que deu sempre o seu melhor para me proporcionar uma boa educação, abdicando, muitas vezes, do seu bem-estar em prol do meu.

À minha irmã, Louise, junto à minha mãe, pelo incentivo, amor e compreensão pela minha ausência em muitos momentos ao longo do curso e, em especial, nesta etapa de conclusão, não conseguindo me dedicar tanto quanto elas merecem.

À minha orientadora, Ana Cláudia Fernandes, pelo envolvimento, dedicação, compreensão, disponibilidade e por todo o conhecimento compartilhado ao longo do trabalho.

Aos professores Adriano Rolim e Cristiano Almeida, que se disponibilizaram prontamente a participar da banca examinadora. Um agradecimento especial a Cristiano, por ter contribuído diretamente para a realização deste trabalho, retirando todas as dúvidas que surgiram no seu decorrer.

Aos amigos que cultivei ao longo da graduação, em especial Eduardo Lucena, Bárbara Dantas, Rhoana Zanotelli, Darcy Hannah, Antônio Firmo, César Rodrigues, Roberto Burity, Matheus Assis e Samuel Lustoza. Vocês conseguiram tornar essa caminhada muito mais leve.

Aos meus amigos de longas datas, em especial Ana Clara, Juliana e Raquel, que sempre se fizeram presentes e me apoiaram, até mesmo quando distantes fisicamente.

A Helena e Vanessa, que acompanham minha jornada há menos tempo, mas que se fazem tão especiais quanto os anteriores, compartilhando alegrias e tristezas, além de todo o apoio e carinho que me deram ao longo dessa trajetória.

Ao meu cunhado, Bruno, pelas conversas e conselhos sobre a vida acadêmica e profissional, além dos momentos agradáveis compartilhados.

À Universidade Federal da Paraíba e aos órgãos de fomento à pesquisa, que, mesmo diante de tantos desafios, buscam fornecer uma educação pública de qualidade.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a concretização deste trabalho.

## RESUMO

O semiárido nordestino enfrenta episódios de seca constantemente. Nesse cenário, está inserida a sub-bacia do Alto Piranhas, na Paraíba, que conta com três reservatórios estratégicos: Bartolomeu I, Engenheiro Ávidos e São Gonçalo. Diante disso, o fornecimento de água para importantes municípios como Cajazeiras e Sousa está sendo comprometido, despertando a necessidade de uma gestão eficiente a fim de garantir a oferta de água para as gerações atuais e futuras. Este trabalho tem como objetivo avaliar a sustentabilidade hídrica dos reservatórios estratégicos da sub-bacia do Alto Piranhas, visando fornecer subsídios para os gestores na tomada de decisão quanto à alocação da água. O trabalho teve como motivação o Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu – PRH-PPA (ANA, 2016), cujos estudos hidrológicos compreenderam o período de 1962 a 2009. Entretanto, a pior seca enfrentada pelo Nordeste nos últimos 50 anos deu-se a partir de 2012. Visando abrangê-la, estendeu-se o período de simulação até o ano de 2017. Para a série histórica de precipitação, foram feitas análises das anomalias de chuva para identificação dos anos secos e chuvosos. Também foram definidas as vazões regularizadas com 100%, 99% e 90% de garantia. Foram, então, simulados cinco cenários através do modelo de rede de fluxo AcquaNet. Em alguns destes cenários, foi considerada a conclusão do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional, cujo eixo norte prevê um ponto de entrega de água a montante do reservatório Engenheiro Ávidos. As simulações mostraram a insustentabilidade de Bartolomeu I desde as demandas mais baixas, evidenciaram a importância e urgência da conclusão das obras do PISF para os reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo e chamaram atenção para a necessidade de uma gestão eficiente em São Gonçalo, mesmo com as afluições do PISF, visando evitar o colapso do mesmo. Os resultados desse estudo demonstram a utilidade dos modelos matemáticos para a simulação de reservatórios imersos em cenários de escassez hídrica, podendo nortear os gestores na tomada de decisão na gestão das águas.

Palavras-chave: escassez hídrica, modelos matemáticos, semiárido nordestino, PISF.

## ABSTRACT

The semi-arid region in northeastern Brazil faces drought episodes constantly. The Alto Piranhas Sub-basin, which is located in Paraíba, is inserted in this scenario, containing three strategic reservoirs: Bartolomeu I, Engenheiro Ávidos and São Gonçalo. Given this, the supply of water to important municipalities such as Cajazeiras and Sousa is being compromised, raising the need for efficient management to ensure the supply of water for current and future generations. This work aims to evaluate the water sustainability of strategic reservoirs of the Alto Piranhas Sub-basin, aiming to provide subsidies for managers in decision making regarding water allocation. The Piancó-Piranhas-Açu River Basin Water Resources Plan – PRH-PPA (ANA, 2016) was the motivation of this work, whose hydrological studies covered the period from 1962 to 2009. However, the worst drought faced by the Northeast in the last 50 years started in 2012. In order to cover it, the simulation period was extended to 2017. For the historical series of rainfall, rainfall anomalies were analyzed to identify dry and rainy years. The regularized flow rates with 100%, 99% and 90% guarantee were also defined. Five scenarios were then simulated using the AcquaNet flow network model. In some of these scenarios, the conclusion of the São Francisco River Integration Project with the Northeast Basins was considered, whose northern axis foresees a water delivery point upstream of the Engenheiro Ávidos reservoir. The simulations showed the unsustainability of Bartolomeu I from the lower demands, highlighted the importance and urgency of completing the PISF works for Engenheiro Ávidos and São Gonçalo reservoirs and drew attention to the need for efficient management in São Gonçalo, even with the PISF inflows in order to prevent its collapse. The results of this study demonstrate the usefulness of mathematical models for the simulation of reservoirs immersed in water scarcity scenarios and can guide managers in decision making in water management.

Keywords: water scarcity, mathematical models, northeastern semiarid, PISF.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Dominialidade dos corpos hídricos superficiais e gestão dos reservatórios estratégicos da UPH Alto Piranhas.....	20
Figura 2 - Principais componentes do ciclo hidrológico .....	25
Figura 3 - Fluxograma da metodologia utilizada.....	30
Figura 4 - Bacia do Alto Piranhas .....	32
Figura 5 - Volumes armazenados do reservatório Bartolomeu I nos últimos 10 anos .....	33
Figura 6 - Volumes armazenados do reservatório Engenheiro Ávidos nos últimos 10 anos ...	33
Figura 7 - Volumes armazenados do reservatório São Gonçalo nos últimos 10 anos.....	34
Figura 8 - Estações pluviométricas selecionadas .....	35
Figura 9 - Médias mensais de lâminas evaporadas em Bartolomeu I e Engenheiro Ávidos....	37
Figura 10 - Médias mensais de lâminas evaporadas no açude São Gonçalo.....	37
Figura 11 - Curva Cota-Área-Volume do Açude Bartolomeu I.....	39
Figura 12 - Curva Cota-Área-Volume do Açude Engenheiro Ávidos .....	40
Figura 13 - Curva Cota-Área-Volume do Açude São Gonçalo.....	41
Figura 14 - Exemplo de rede simulada no AcquaNet.....	48
Figura 15 - Anomalia de chuvas nos postos selecionados (1962 – 1989).....	52
Figura 16 - Anomalia de chuvas nos postos selecionados (1990 – 2017).....	52
Figura 17 - Comportamento do reservatório Bartolomeu I no Cenário Atual.....	56
Figura 18 - Comportamento do reservatório Engenheiro Ávidos no Cenário Atual.....	57
Figura 19 - Comportamento do reservatório São Gonçalo no Cenário Atual .....	57
Figura 20 - Atendimento à irrigação difusa no Bartolomeu I no Cenário Atual.....	59
Figura 21 - Atendimento à irrigação difusa no Engenheiro Ávidos no Cenário Atual .....	60
Figura 22 - Comportamento do reservatório Bartolomeu I no Cenário Tendencial - 2022 .....	62
Figura 23 - Comportamento do reservatório Engenheiro Ávidos no Cenário Tendencial - 2022 .....	62
Figura 24 - Comportamento do reservatório São Gonçalo no Cenário Tendencial – 2022 .....	63
Figura 25 - Atendimento à irrigação difusa no Bartolomeu I no Cenário Tendencial - 2022..	65
Figura 26 - Comportamento do reservatório Bartolomeu I no Cenário Crítico x Cenário Tendencial - 2022 .....	66
Figura 27 - Comportamento do reservatório Engenheiro Ávidos no Cenário Crítico x Cenário Tendencial - 2022 .....	67

Figura 28 - Comportamento do reservatório São Gonçalo no Cenário Crítico x Cenário Tendencial - 2022 .....	67
Figura 29 - Atendimento à irrigação difusa no Bartolomeu I no Cenário Crítico – 2022.....	69
Figura 30 - Atendimento ao abastecimento humano no Engenheiro Ávidos no Cenário Crítico - 2022 .....	70
Figura 31 - Comportamento do reservatório Bartolomeu I no Cenário Tendencial – 2032.....	71
Figura 32 - Comportamento do reservatório Engenheiro Ávidos no Cenário Tendencial – 2032 .....	72
Figura 33 - Comportamento do reservatório São Gonçalo no Cenário Tendencial – 2032 .....	72
Figura 34 - Atendimento à irrigação difusa no Bartolomeu I no Cenário Tendencial - 2032..	74
Figura 35 - Comportamento do reservatório Bartolomeu I no Cenário Ótimo - 2032.....	76
Figura 36 - Comportamento do reservatório Engenheiro Ávidos no Cenário Ótimo - 2032 ...	76
Figura 37 - Comportamento do reservatório São Gonçalo no Cenário Ótimo - 2032.....	77
Figura 38 - Diagrama de dispersão das vazões afluentes para o açude Bartolomeu I.....	91
Figura 39 - Vazões afluentes médias para o açude Bartolomeu I .....	91
Figura 40 - Diagrama de dispersão das vazões afluentes para o açude Engenheiro Ávidos ....	92
Figura 41 - Vazões afluentes médias para o açude Engenheiro Ávidos.....	92
Figura 42 - Diagrama de dispersão das vazões afluentes para o açude São Gonçalo .....	93
Figura 43 - Vazões afluentes médias para o açude São Gonçalo .....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios de outorga utilizados por alguns órgãos gestores estaduais brasileiros....	22
Tabela 2 - Principais instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos .....	24
Tabela 3 - Evapotranspirações médias (mm/mês).....	36
Tabela 4 - Volumes dos reservatórios estratégicos (Mm <sup>3</sup> ).....	38
Tabela 5 - Cota x Área x Volume do Reservatório Bartolomeu I.....	38
Tabela 6 - Cota x Área x Volume do Reservatório Engenheiro Ávidos .....	39
Tabela 7 - Cota x Área x Volume do Reservatório São Gonçalo.....	40
Tabela 8 - Área da bacia hidrográfica dos reservatórios estratégicos (km <sup>2</sup> ) .....	41
Tabela 9 - Demandas (vazões de retirada) por açude estratégico (m <sup>3</sup> /s).....	42
Tabela 10 - Ordem de prioridades de usos .....	42
Tabela 11 - Resumo dos cenários simulados no AcquaNet.....	50
Tabela 12 - Resumo da primeira tentativa para Bartolomeu I.....	53
Tabela 13 - Vazões regularizadas para os reservatórios estratégicos (m <sup>3</sup> /s) .....	53
Tabela 14 - Vazões regularizadas do açude Bartolomeu I (m <sup>3</sup> /s).....	54
Tabela 15 - Vazões regularizadas do açude Engenheiro Ávidos (m <sup>3</sup> /s).....	54
Tabela 16 - Vazões regularizadas do açude São Gonçalo (m <sup>3</sup> /s) .....	54
Tabela 17 - Resumo do comportamento dos reservatórios para o Cenário Atual .....	55
Tabela 18 - Resumo do atendimento às demandas do Bartolomeu I no Cenário Atual .....	58
Tabela 19 - Resumo do atendimento às demandas do Engenheiro Ávidos no Cenário Atual ..	58
Tabela 20 - Resumo do atendimento às demandas do São Gonçalo no Cenário Atual.....	58
Tabela 21 - Resumo do comportamento dos reservatórios para o Cenário Tendencial - 2022	60
Tabela 22 - Resumo do atendimento às demandas do Bartolomeu I no Cenário Tendencial - 2022 .....	63
Tabela 23 - Resumo do atendimento às demandas do Engenheiro Ávidos no Cenário Tendencial - 2022.....	64
Tabela 24 - Resumo do atendimento às demandas do São Gonçalo no Cenário Tendencial - 2022 .....	64
Tabela 25 - Resumo do comportamento dos reservatórios para o Cenário Crítico - 2022.....	65
Tabela 26 - Resumo do atendimento às demandas do Bartolomeu I no Cenário Crítico - 2022 .....	68
Tabela 27 - Resumo do atendimento às demandas do Engenheiro Ávidos no Cenário Crítico - 2022 .....	68

Tabela 28 - Resumo do atendimento às demandas do São Gonçalo no Cenário Crítico - 2022 .....	69
Tabela 29 - Resumo do comportamento dos reservatórios para o Cenário Tendencial - 2032	70
Tabela 30 - Resumo do atendimento às demandas do Bartolomeu I no Cenário Tendencial - 2032 .....	73
Tabela 31 - Resumo do atendimento às demandas do Engenheiro Ávidos no Cenário Tendencial - 2032 .....	73
Tabela 32 - Resumo do atendimento às demandas do São Gonçalo no Cenário Tendencial - 2032 .....	74
Tabela 33 - Resumo do comportamento dos reservatórios para o Cenário Ótimo - 2032 .....	75
Tabela 34 - Resumo do atendimento às demandas do Bartolomeu I no Cenário Ótimo – 2032 .....	77
Tabela 35 - Resumo do atendimento às demandas do Engenheiro Ávidos no Cenário Ótimo – 2032 .....	78
Tabela 36 - Resumo do atendimento às demandas do São Gonçalo no Cenário Ótimo – 2032 .....	78
Tabela 37 - Parâmetros do Modelo SMAP-M.....	90
Tabela 38 - Coeficientes de correlação entre as vazões afluentes da autora e do PRH-PPA...	90
Tabela 39 - Vazões afluentes ao açude Bartolomeu I (m <sup>3</sup> /s).....	94
Tabela 40 - Vazões afluentes ao açude Engenheiro Ávidos (m <sup>3</sup> /s) .....	96
Tabela 41 - Vazões afluentes ao açude São Gonçalo (m <sup>3</sup> /s) .....	97

## LISTA DE ABREVIATURAS

AESA – *Agência Executiva de Gestão das Águas*

ANA – *Agência Nacional de Águas*

ARS – *Agricultural Research Service*

CAR – *Curvas de Aversão ao Risco*

CBH-PPA – *Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu*

CEPED – *Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil da Universidade Federal de Santa Catarina*

DNOCS – *Departamento Nacional de Obras Contra as Secas*

IBGE – *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*

IPH – *Instituto de Pesquisas Hidráulicas*

PERH-PB – *Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba*

PISF – *Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional*

PISG – *Perímetro Irrigado de São Gonçalo*

PNRH – *Política Nacional de Recursos Hídricos*

PPA – *Piancó-Piranhas-Açu*

PRH-PPA – *Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu*

RMSP – *Região Metropolitana de São Paulo*

SECTMA – *Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente*

SHE – *Systeme Hydrologique European*

SINGREH – *Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos*

SMAP – *Soil Moisture Accounting Procedure*

SSD – *Sistema de Suporte à Decisão*

SWAT – *Soil and Water Assessment Tool*

UPH – *Unidade de Planejamento Hidrológico*

USDA – *United States Department of Agriculture*

WMO – *World Meteorological Organization*

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>18</b>
2.1. Geral.....	18
2.2. Específicos .....	18
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>19</b>
3.1. Gestão de Recursos Hídricos .....	19
3.2. Modelos Hidrológicos .....	24
3.3. Operação de Reservatórios.....	27
3.4. Alocação de Água .....	28
<b>4. METODOLOGIA .....</b>	<b>30</b>
4.1. Caracterização da área de estudo .....	31
4.2. Dados utilizados .....	34
4.2.1. Dados Pluviométricos .....	35
4.2.2. Dados Fluviométricos .....	36
4.2.3. Dados de Evapotranspiração.....	36
4.2.4. Dados Estruturais .....	37
4.2.5. Demandas Hídricas .....	41
4.3. Avaliação da precipitação .....	43
4.4. Cálculo das vazões regularizáveis.....	43
4.5. Alocação de água no AcquaNet .....	45
4.5.1. Modelo AcquaNet.....	45
4.5.2. Cenários de simulação no AcquaNet .....	47
4.5.2.1. Cenário Atual .....	49
4.5.2.2. Cenário Tendencial – 2022 .....	49
4.5.2.3. Cenário Crítico – 2022.....	49
4.5.2.4. Cenário Tendencial – 2032 .....	49

4.5.2.5. Cenário Ótimo – 2032.....	50
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>51</b>
5.1. Anomalia de Chuvas .....	51
5.2. Vazões Regularizadas .....	53
5.3. Simulações no AcquaNet .....	55
5.3.1. Simulação do Cenário Atual .....	55
5.3.2. Simulação do Cenário Tendencial – 2022 .....	60
5.3.3. Simulação do Cenário Crítico – 2022.....	65
5.3.4. Simulação do Cenário Tendencial – 2032 .....	70
5.3.5. Simulação do Cenário Ótimo – 2032.....	75
5.4. Análise integrada dos resultados .....	79
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>80</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>82</b>
<b>APÊNDICE A – CÁLCULO DAS VAZÕES AFLUENTES ATRAVÉS DO SMAP.....</b>	<b>89</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A água tem papel fundamental na preservação e na qualidade da vida no planeta, seja no aspecto de sobrevivência ou no desenvolvimento da sociedade. No entanto, sua disponibilidade é variável nas diferentes partes do mundo, representando um dos grandes desafios para o futuro da humanidade.

Segundo Freitas (2010), uma parcela mundial considerável é pertencente ao que se denomina área de risco à seca. O autor afirma ainda que, nas últimas décadas, as secas têm se tornado cada vez mais recorrentes e vigorosas.

A seca é um dos fenômenos naturais mais complexos, sendo caracterizada pelo baixo índice pluviométrico durante períodos prolongados, desencadeando problemas sociais, econômicos e ecológicos em uma grande parcela mundial (MOREIRA, 2016).

A Agência Nacional de Águas – ANA (2019) reconhece o privilégio do Brasil quanto à disponibilidade hídrica total. No entanto, faz a ressalva das oscilações dessa disponibilidade enfrentadas ao longo do país e do tempo, além das variações das demandas e da falta de infraestruturas apropriadas para o aproveitamento e a conservação desse recurso.

Historicamente, os maiores déficits hídricos, compondo o cenário de escassez, estão presentes especialmente na porção semiárida do Nordeste. Enquanto a região amazônica detém 81% da disponibilidade hídrica nacional e representa apenas 5% da população, o semiárido nordestino concentra 35% da população brasileira com uma disponibilidade de 4% da reserva hídrica nacional. Além disso, o Nordeste enfrentou diversas secas, podendo ser citadas como mais recentes a do período de 1979 a 1983, com maior severidade em 1981 devido à deficiência de chuvas durante o período chuvoso; a seca de 1993 e a do período de 1998 a 1999 (CIRILO, 2015). Em 2012, se estabeleceu a mais atual e ainda vigente seca enfrentada pela região, que foi considerada pela World Meteorological Organization (Organização Mundial Meteorológica) - WMO (2014) como a pior seca enfrentada pelo Nordeste brasileiro nos últimos 50 anos. Seu forte impacto e intensidade resultaram na destruição de grandes áreas de terras agrícolas, prejudicando centenas de cidades e vilas da região semiárida nordestina (MARENGO *et al.*, 2016).

Nesse contexto, está em evidência o semiárido paraibano, onde está localizada uma porção da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu (PPA), que apresenta irregularidade pluviométrica e altas taxas de evaporação durante o ano. A Bacia Hidrográfica do PPA está

distribuída entre os estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte. Além disso, constitui a maior bacia do Estado da Paraíba, possuindo uma extensão de 26.047,49 km<sup>2</sup> dentro deste (AESAs, 2006).

Apesar da bacia em questão ser federal, a Unidade de Planejamento Hidrológico (UPH) de estudo, Alto Piranhas, está inteiramente localizada no Sertão paraibano, tendo sido escolhida devido aos recorrentes episódios de seca por ela enfrentados e pela relevância de seus reservatórios no abastecimento de cidades paraibanas importantes como Cajazeiras e Sousa, além de Bonito de Santa Fé, Nazarezinho, Marizópolis e os distritos de São Gonçalo e Engenheiro Ávidos. A escolha teve também como motivação a seca vigente, iniciada em 2012, e o estudo realizado pelo Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu - PRH-PPA (ANA, 2016) para seus reservatórios estratégicos, que ainda não abrangia essa seca.

Dessa forma, para o estudo do Alto Piranhas, foram considerados os reservatórios estratégicos<sup>1</sup> no âmbito do PRH-PPA (ANA, 2016) para a sub-bacia: Bartolomeu I, Engenheiro Ávidos e São Gonçalo, que estão localizados nos municípios de Bonito de Santa Fé, Cajazeiras e Sousa, respectivamente.

A intensificação da crise hídrica, unida ao aumento da demanda devido ao crescimento populacional acelerado, é preocupante, pois resulta em conflitos nos diversos usos da água, que podem ser para irrigação, abastecimento humano, dessedentação animal, geração de energia, indústrias, mineração, aquicultura, navegação, turismo e lazer.

Visando amenizar as condições de escassez hídrica, foi iniciado, em 2007, o Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional (PISF), que abrange quatro Estados nordestinos: Paraíba, Pernambuco, Ceará e Rio Grande do Norte. A transposição é dividida nos eixos leste e norte. Apesar do governo ter afirmado que todo o eixo leste da transposição irá funcionar normalmente, a previsão de disponibilidade de água no Sertão Paraibano pelo eixo norte é somente para 2021, já que ficou definido que, por enquanto, a estrutura do eixo irá apenas até o reservatório de Jati, no Ceará (AZEVEDO, 2019). O eixo norte do PISF prevê dois pontos de entrega de água para a bacia do Piancó-Piranhas-Açu, sendo um pelo rio Piranhas, a montante do açude Engenheiro Ávidos, partindo deste para São Gonçalo e prosseguindo até o Rio Piranhas-Açu, em direção ao Estado do Rio Grande do Norte, e outra

---

<sup>1</sup> O PRH-PPA considera como estratégicos 51 açudes da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu com capacidade individual de acumulação superior a 10 hm<sup>3</sup>.

pelo açude Lagoa do Arroz, por meio do riacho Cacaré. A vazão firme total prevista para esses dois pontos é de 2,7 m<sup>3</sup>/s, sendo 1,7 m<sup>3</sup>/s designados ao abastecimento do Rio Grande do Norte e 1 m<sup>3</sup>/s para a Paraíba. É importante ressaltar que, mesmo com as águas transpostas, em períodos secos, haverá ainda a necessidade de medidas de gestão bastante assertivas para que os usos da água sejam preservados em outras regiões da bacia além de Engenheiro Ávidos e São Gonçalo, incluindo o Rio Grande do Norte (ANA, 2016).

Dessa forma, é revelada a necessidade da gestão dos recursos hídricos, buscando a conservação da água e evitando condições de racionamento e colapso dos reservatórios, a fim de garantir os usos múltiplos desse recurso.

Frente à necessidade de gestão, existem, atualmente, diversas ferramentas que permitem a construção de modelos computacionais de simulação para auxiliar em problemas de tomada de decisão. Um deles é o AcquaNet, que pode ser utilizado para simulações de reservatórios, sendo bastante relevante diante de problemas de gestão de alocação da água em situações de crise hídrica.

Albano (2004) cita como principal vantagem do uso de softwares que utilizam a simulação matemática através de modelos de rede de fluxo, como o AcquaNet, a de permitir uma representação de sistemas complexos através de modelos computacionais, fornecendo um conjunto de soluções que dão suporte à tomada de decisão.

Sendo assim, o presente trabalho utiliza o modelo AcquaNet para a simulação dos reservatórios estratégicos da UPH Alto Piranhas, tendo como principal objetivo avaliar a sustentabilidade hídrica destes frente às suas demandas e entender a importância do PISF perante as recorrentes crises hídricas enfrentadas na região. Além do AcquaNet, foi utilizada uma Planilha eletrônica de Simulação da Operação de Reservatórios, também de fácil manuseio. O melhor entendimento do comportamento dos reservatórios visa auxiliar os gestores na tomada de decisão quanto à gestão dos recursos hídricos.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Geral**

Avaliar a sustentabilidade hídrica dos reservatórios estratégicos da sub-bacia do Alto Piranhas, sendo estes o Bartolomeu I, Engenheiro Ávidos e São Gonçalo, quanto ao atendimento dos seus múltiplos usos, incluindo o período de seca mais recente do semiárido.

### **2.2. Específicos**

- Analisar a anomalia de chuva anual das estações pluviométricas selecionadas a partir dos dados de série histórica para os 56 anos de período de estudo (1962 – 2017);
- Determinar as vazões regularizáveis de 100%, 99% e 90% de garantia dos reservatórios através de uma Planilha Excel de Simulação da Operação de Reservatórios;
- Avaliar o comportamento do sistema hídrico a partir das simulações no modelo de rede de fluxo AcquaNet quanto aos seus volumes finais e frente às suas demandas nos diferentes cenários elaborados.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. Gestão de Recursos Hídricos

A Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba – AESA (2007) define a gestão dos recursos hídricos como o composto de medidas que, seguindo a legislação e normas relacionadas, regulam o uso, controlam e protegem os recursos hídricos.

Um grande marco nacional na gestão dos recursos hídricos foi a Lei das Águas, instituída pela Lei Nº 9.433/1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), a qual estabelece instrumentos para a gestão dos recursos hídricos sob domínio federal e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (SINGREH).

A PNRH é considerada uma lei moderna que proporcionou meios de identificar conflitos pelo uso da água através dos planos de recursos hídricos das bacias hidrográficas e arbitrar conflitos no âmbito administrativo. Além disso, é considerada inovadora pela instalação de comitês de bacias hidrográficas que permite a união dos poderes públicos, sociedade civil e usuários na gestão dos recursos hídricos (ANA, 2018). Um dos seus importantes fundamentos é que se prioriza o uso da água para o consumo humano e a dessedentação animal, nos casos de escassez hídrica, para que possa ser garantida a estes não somente água na quantidade necessária, como também na qualidade apropriada (BRASIL, 1997).

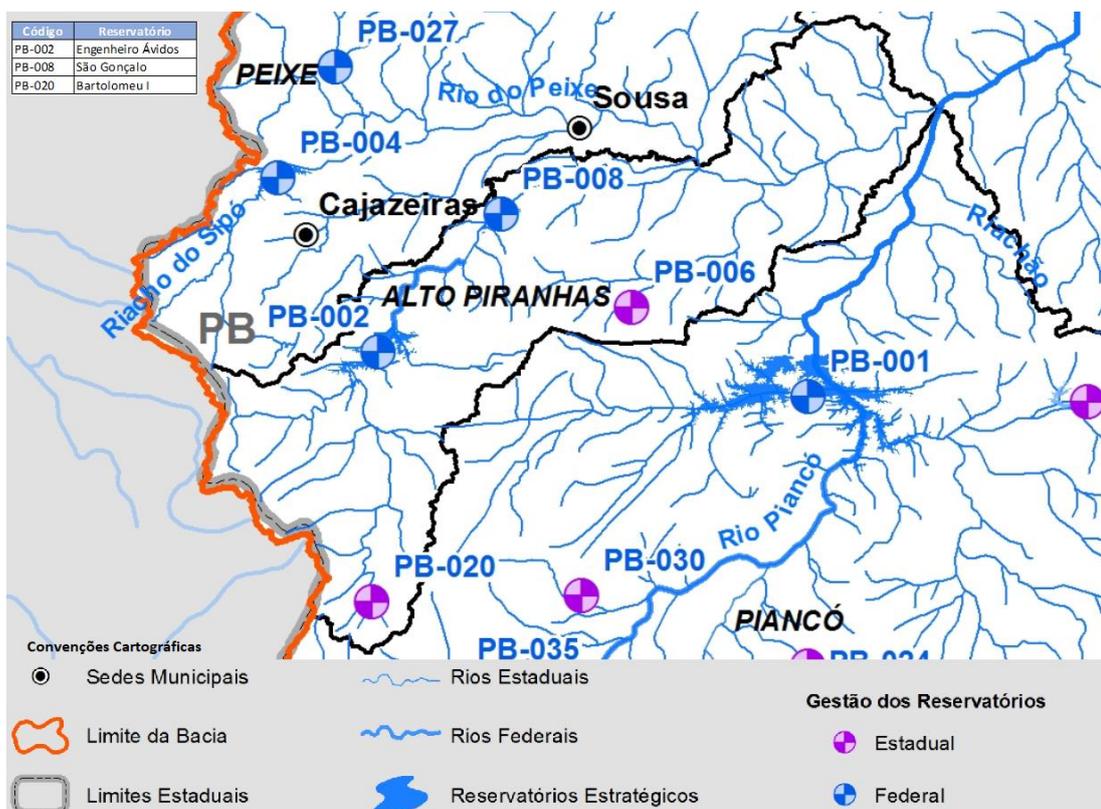
O SINGREH, por sua vez, segundo a Agência Nacional de Águas – ANA (2017b), é caracterizado pelo conjunto de órgãos e colegiados que concebe e implementa a Política Nacional das Águas e tem como responsabilidade fazer a gestão dos usos da água de forma democrática e participativa.

Na Paraíba, território da bacia de estudo, a gestão de recursos hídricos é regulamentada pela Lei Nº 6.308/1996, que delinea a Política Estadual dos Recursos Hídricos da Paraíba (PARAÍBA, 1996). O órgão gestor responsável pelos recursos hídricos paraibanos é a Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba – AESA, criada pela Lei Nº 7.779/2005, sob a forma jurídica de uma Autarquia, vinculada à Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente – SECTMA (PARAÍBA, 2005). O Art. 3º desta lei determina que:

São objetivos da AESA o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais de domínio do Estado da Paraíba, de águas originárias de bacias hidrográficas localizadas em outros Estados que lhe sejam transferidas através de obras implantadas pelo Governo Federal e, por delegação, na forma da Lei, de águas de domínio da União que ocorrem em território do Estado da Paraíba.

O Rio Piranhas-Açu, principal rio da bacia hidrográfica, está sob domínio federal, já que é um rio interestadual, que percorre a Paraíba e se estende até o Rio Grande do Norte, tendo seus recursos hídricos geridos através da Agência Nacional de Águas – ANA, pela União, em parceria com os Órgão Gestores de Recursos Hídricos dos Estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte e do DNOCS (ANA, 2005). Além disso, segundo a ANA (2016), os açudes Engenheiro Ávidos e São Gonçalo estão sob gestão federal, enquanto o reservatório Bartolomeu I está sob gestão estadual, como pode ser visto através da Figura 1.

Figura 1 - Dominialidade dos corpos hídricos superficiais e gestão dos reservatórios estratégicos da UPH Alto Piranhas



Fonte: Adaptado de ANA (2016).

A Política Nacional de Recursos Hídricos, segundo o artigo 5º da Lei 9.433/1997, apresenta os seguintes instrumentos de gestão:

I - os Planos de Recursos Hídricos;

II - o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água;

III - a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos;

IV - a cobrança pelo uso de recursos hídricos;

V - a compensação a municípios;

VI - o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

Dentre os principais instrumentos determinados pela PNRH, está a Outorga de Direitos de uso de Recursos Hídricos, regime que tem como finalidade controlar quantitativa e qualitativamente o uso da água, além de garantir o direito ao seu acesso (BRASIL, 1997). A outorga é o ato administrativo através do qual é concedido ao outorgado o direito de uso de recurso hídrico, garantindo a este a disponibilidade de água como insumo básico de processo produtivo, por prazo determinado e conforme os termos e condições estabelecidas (BRASIL, 2011).

Está sujeito à outorga, portanto, qualquer uso em um corpo d'água que altere a qualidade ou quantidade da água, desde a sua extração até o lançamento de esgotos em corpos d'água, sendo indispensável para a regularização do uso da água e administração dos conflitos entre os seus diversos usos, já que é fornecida levando em consideração seus usos prioritários.

A outorga é concedida aos usuários após definir-se a vazão ecológica, que é a quantidade mínima de água vital para a manutenção dos ecossistemas fluviais, ou seja, é a quantidade de água que deve permanecer no leito dos rios para atendimento das demandas do ecossistema aquático, para a preservação da flora e da fauna relacionada ao corpo hídrico (MEDEIROS *et al.*, 2011).

Em casos de existência de reservatórios de regularização de vazão, pelo aumento na disponibilidade hídrica em que resultam, são adotados diferentes critérios de outorga por alguns órgãos (LOPES e FREITAS, 2007).

Na Paraíba, o critério utilizado para outorga é a adoção da vazão média anual outorgável como sendo 90% (noventa por cento) da vazão regularizada pelos reservatórios, com 90% (noventa por cento) de garantia. Os demais critérios adotados por alguns órgãos gestores brasileiros são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Critérios de outorga utilizados por alguns órgãos gestores estaduais brasileiros

Região	Unidade da Federação	Vazão mínima de referência	Limite de uso na bacia	Limite de uso individual
Nordeste	Bahia	Q <sub>90</sub>	80%	20%
	Alagoas	Q <sub>90</sub>	90%	-
	Ceará	Q <sub>90</sub>	90%	-
	Rio Grande do Norte	Q <sub>90</sub>	90%	-
	Paraíba	Q <sub>90</sub>	90%	-
	Pernambuco	Q <sub>90</sub>	90%	-
	Sergipe	Q <sub>90</sub>	100%	30%
Sudeste	Minas Gerais	Q <sub>7,10</sub>	30% (fio d'água)	-
	São Paulo	Q <sub>7,10</sub>	50%	20%
	Rio de Janeiro	Q <sub>7,10</sub>	80%	-
Centro-Oeste e Norte	Distrito Federal	Q <sub>90</sub>	80%	-
	Goiás	Q <sub>95</sub>	70%	-
	Tocantins	Q <sub>90</sub>	75%	25%
Sul	Paraná	Q <sub>95</sub>	50%	-

**Limites de uso na bacia:** fração da vazão mínima de referência que pode ser alocada na bacia aos usos da água por meio de outorgas, ou seja, a soma de todas as vazões outorgadas não pode ser superior ao limite de uso na bacia.

**Limite de uso individual:** fração da vazão mínima de referência que pode ser alocada a cada usuário de água por meio de outorga, ou seja, a vazão outorgada de cada usuário não pode ser superior ao limite de uso individual.

**Q<sub>90</sub>:** em 90% do tempo as vazões são iguais ou superiores à Q<sub>90</sub>.

**Q<sub>95</sub>:** em 95% do tempo as vazões são iguais ou superiores à Q<sub>95</sub>.

**Q<sub>7,10</sub>:** vazão mínima média, ao longo de 7 dias, com tempo de retorno de 10 anos.

Fonte: Lopes e Freitas (2007).

Para a outorga, o balanço hídrico é o método de cálculo mais utilizado por grande parcela dos estados brasileiros, no qual se considera a vazão outorgável como a vazão de referência local ou uma porcentagem deste valor subtraído dos valores já outorgados a montante. Além disso, o valor outorgado não deve acarretar impactos nas outorgas já concedidas a jusante (GARCIA, 2011).

Entretanto, os cenários enfrentados na realidade pelos órgãos gestores são bastante complexos. Carrijo e Reis (2006) atribuem a complexidade dos sistemas de abastecimento de água e a dificuldade na sua operacionalidade ao crescimento caótico das cidades, além da lacuna de investimentos no setor de saneamento básico no Brasil.

Garcia (2011) julga que, para casos complexos como o de outorga, somente balanços hídricos simples não são suficientes, sendo necessárias medidas que auxiliem na gestão da alocação da água para suas variadas demandas e, portanto, devem ser utilizadas as informações disponíveis através de cadastros, dados observados ou simulações para que seja efetuado um estudo das melhores alternativas, a fim de utilizar a água racionalmente e promover o desenvolvimento econômico da bacia hidrográfica.

Nesse sentido, a AESA (2007) aponta, além da outorga da água, estando caracterizada como um instrumento de gestão operacional, os modelos matemáticos de qualidade e de fluxos (simulação) como instrumentos de gestão na categoria de planejamento. Apresenta, ainda, os sistemas de suporte à decisão como um dos instrumentos de informação. Esses modelos e sistemas são ferramentas que permitem análises mais aprofundadas e têm grande valor quando empregados como instrumentos de apoio à tomada de decisão. Os instrumentos de gestão classificados pela AESA (2007) em quatro categorias principais podem ser vistos na Tabela 2. Dessa forma, verifica-se que a simulação com modelos matemáticos está prevista como instrumento de planejamento.

Tabela 2 - Principais instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos

<b>Categoria</b>	<b>Instrumentos</b>
Instrumentos Legais, Institucionais e de Articulação com a Sociedade	Arcabouço legal (leis, decretos, portarias, resoluções); órgão gestor; conselhos de recursos hídricos; sistemas de gestão; comitês de bacias; agências de bacias; associações de usuários de água; campanhas educativas; e mobilização social e comunitária.
Instrumentos de Planejamento	Planos estaduais de recursos hídricos; planos de bacias; enquadramento de cursos d'água; modelos matemáticos de qualidade e de fluxos (simulação); e programas de economia e uso racional de água.
Instrumentos de Informação	Sistemas de informação; redes de monitoramento quantitativo e qualitativo de água; redes hidro-meteorológicas; cadastros de usuários de água; cadastros de infra-estrutura hídrica; e sistemas de suporte à decisão.
Instrumentos Operacionais	Outorga de água; licença para obra hídrica; cobrança; fiscalização dos usos da água; operação de obras de uso múltiplo; manualização da gestão e da operação; manutenção e conservação de obras hídricas; proteção de mananciais; e controle de eventos críticos, entre outros.

Fonte: Adaptado de AESA (2007).

### 3.2. Modelos Hidrológicos

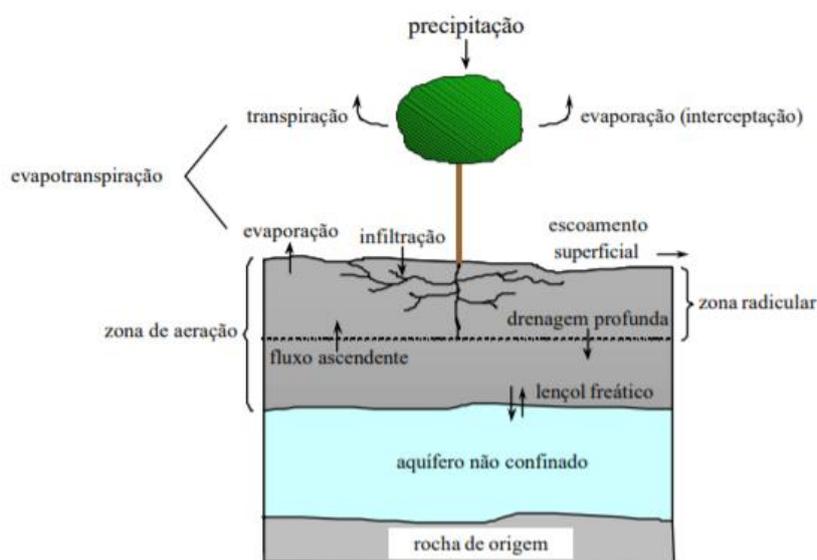
Nas últimas décadas, o processo de planejamento passou por uma transformação bastante significativa, principalmente devido ao desenvolvimento contínuo de tecnologias computacionais e variados modelos de simulação e otimização de recursos hídricos associados aos seus bancos de dados e interfaces de fácil utilização. O planejamento, atualmente, é profundamente dependente do uso de modelos computacionais de previsão de impacto, que são utilizados para auxiliar na identificação e na avaliação de alternativas para alcançar os objetivos de planejamento e gerenciamento, pois fornecem um método eficiente de analisar dados espaciais e temporais a fim de prever a interação e os impactos, através do tempo e espaço, de vários componentes de bacias hidrográficas sob projetos e políticas operacionais alternativas (LOUCKS e BEEK, 2005).

De acordo com Moradkhani e Sorooshian (2009), os modelos hidrológicos são uma

representação simplificada de um sistema da vida real. Os autores relatam que muitos modelos são utilizados apenas para aprimorar o conhecimento e o entendimento sobre os processos hidrológicos, enquanto outros são desenvolvidos e empregados como ferramentas para a simulação e previsão, possibilitando decisões mais efetivas para o planejamento e a operação, considerando a interação de aspectos físicos, ecológicos, sociais e econômicos de um sistema real.

Tucci (1998) também define os modelos hidrológicos, descrevendo-os como uma ferramenta que possibilita a simulação, a representação e o entendimento dos eventos em uma bacia hidrográfica através da transformação dos processos em equações matemáticas. Sendo assim, os fenômenos presentes no ciclo hidrológico (Figura 2) como a precipitação, a evapotranspiração, a interceptação, a infiltração e o escoamento superficial são representados através de equações, expressões lógicas e relações entre variáveis e parâmetros, o que possibilita a aplicação do modelo.

Figura 2 - Principais componentes do ciclo hidrológico



Fonte: Rennó e Soares (2000).

Como desafios da modelagem, Loucks e Beek (2005) apontam o fato de que o usuário deve possuir não somente habilidades matemáticas e sistemáticas, mas deve compreender a engenharia ambiental, os aspectos econômicos, culturais, políticos e sociais envolvidos em situações de planejamento de recursos hídricos.

É importante ressaltar a necessidade de uso de parâmetros em diversos modelos, que

podem ser obtidos através de experimentos; a partir da literatura, de trabalhos já efetuados na bacia de estudo ou região semelhante; ou parâmetros obtidos através de calibração com base em dados observados, para que se possa obter uma reprodução mais precisa das características e processos físicos da bacia em estudo (SANTOS, 2009).

Dessa forma, o melhor modelo pode ser definido como aquele que, com menor complexidade, fornece os resultados mais próximos da realidade utilizando a menor quantidade de parâmetros. Esses modelos possuem grande importância por não acarretarem interferências no sistema físico real, permitindo a elaboração de cenários diversos para a previsão de comportamentos diante das condições estabelecidas, além de comparações com os dados observados.

Além disso, apesar de se tratarem apenas de uma representação aproximada, já que é inviável exprimir em termos matemáticos todas as variáveis presentes em uma bacia hidrográfica (RENNÓ e SOARES, 2000), os modelos hidrológicos apresentam resultados bastante análogos à realidade.

Dentre alguns modelos hidrológicos de destaque, Devi *et al.* (2015) citam o modelo *SWAT (Soil and Water Assessment Tool)*, que foi desenvolvido pelo Dr. Jeff Arnold para o Serviço de Pesquisa Agrícola do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (*USDA Agricultural Research Service - ARS*) (NEITSCH *et al.*, 2002), para testar e prever a circulação da água e dos sedimentos e a produção agrícola com produtos químicos em bacias não monitoradas e tem como dados de entrada os dados de chuva diários, temperaturas do ar máxima e mínima, irradiação solar, umidade do ar e velocidade do vento. Outro modelo citado é o *MIKE SHE (Système Hydrologique Européen)* (ABBOT *et al.*, 1986), que abrange vários processos do ciclo hidrológico, sendo capaz de simular o movimento da água superficial e subterrânea, suas interações, transporte de sedimentos, nutrientes e pesticidas e vários problemas de qualidade da água, podendo ser aplicados em grandes bacias hidrográficas. Já o *TOPMODEL* (BEVEN e KIRKBY, 1979), pode ser utilizado em sub-bacias simples ou múltiplas, utilizando dados de elevação para a área de captação. Ele é útil na previsão de escoamento nas bacias, tendo como fatores principais a topografia da bacia e a transmissividade do solo.

No contexto nacional, tem sido bastante difundido o uso de modelos hidrológicos chuva-vazão, como o IPH II – Instituto de Pesquisas Hidráulicas (TUCCI *et al.*, 1981; TUCCI e CAMPANA, 1993) e o SMAP – *Soil Moisture Accounting Procedure* (LOPES *et al.*, 1981).

O modelo SMAP foi desenvolvido em 1981 por Lopes J.E.G., Braga B.P.F. e Conejo J.G.L. É um modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão. Para isso, o modelo tem como dados de entrada os de dados de chuva, evaporação de tanque classe A e vazões médias para um período mínimo necessário para a calibração (LOPES, 1999). Esse foi um dos modelos hidrológicos utilizados no presente trabalho, tendo proporcionado a geração das vazões afluentes aos reservatórios de estudo.

Em situações relacionadas à alocação de água e tomada de decisão na gestão desse recurso, Silva *et al.* (2017a) afirmam que modelos hidrológicos são fortes aliados, podendo ser bastante úteis, portanto, na operação de reservatórios.

### **3.3. Operação de Reservatórios**

A operação de reservatórios tem como finalidade fornecer o atendimento das demandas de água outorgadas à população. Em regiões de chuvas irregulares e evaporação intensa, como a da UPH Alto Piranhas em estudo, o uso de reservatórios para a regularização da vazão de abastecimento é bastante comum, visando garantir o atendimento mesmo em épocas de baixo índice pluviométrico.

Na expansão e operação dos sistemas de reservatórios, deve-se levar em consideração todos os usos que serão beneficiados pelo sistema, visando erradicar conflitos que possam surgir devido à deficiência no atendimento às demandas dos usuários de determinado sistema, devendo-se avaliar sua potencialidade e determinar regras operativas de liberação de água para atender as demandas, com um grau de confiabilidade desejado (ARAGÃO, 2008).

Diante das incertezas hidrológicas, da diminuição das disponibilidades hídricas e do crescente aumento das demandas, a sustentabilidade dos reservatórios submetidos a múltiplos usos tem gerado uma grande preocupação nos últimos tempos, sendo o gerenciamento hídrico de fundamental importância para alocação de água no presente e para o não comprometimento do atendimento às demandas futuras (CASTRO e MEDEIROS, 2016).

Nesse sentido, em períodos de estiagem, é realizado o racionamento, no qual a água é economizada. Entretanto, a armazenagem dessa água nos reservatórios por períodos maiores pode acarretar em grande perda por evaporação, podendo se concretizar em uma regra de operação ineficiente (FREITAS, 2010).

Outro agravante para a redução da quantidade de água disponível nos reservatórios é o impacto de pequenos açudes a montante dos reservatórios principais. Esses açudes, apesar de cumprirem papel importante como fonte hídrica para diversas comunidades e propriedades rurais ao longo da bacia, armazenam parte da água que deveria estar disponível no reservatório principal (ANA, 2016). Além disso, por concentrarem um pequeno volume de água quando comparados aos reservatórios estratégicos, aumentam significativamente as taxas de evaporação, elevando ainda mais as perdas.

Desse modo, a operação dos reservatórios deve ser definida através de estudo das características e particularidades de cada um deles, tornando o uso da água eficiente. Essa importância é ainda mais acentuada no semiárido nordestino, devido às características climáticas e ambientais da região. Nesse aspecto, ferramentas que forneçam suporte à tomada de decisão podem ser de grande valia ao operador.

### **3.4. Alocação de Água**

A alocação de água se refere às regras e procedimentos através dos quais o acesso à água é determinado para uso coletivo ou individual, estando relacionados à sua disponibilidade. Em regiões imersas em cenários de escassez hídrica, devido às variabilidades de precipitação e aumento das demandas, as regras de alocação de água e seus procedimentos tornam-se ainda mais importantes, servindo como mecanismos de prevenção de conflitos quanto aos seus diversos usos (ROA-GARCÍA, 2014).

O grande desafio da alocação de água é tornar seu uso sustentável, sendo este definido como aquele que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer as gerações futuras. Dessa forma, a sustentabilidade em recursos hídricos somente é atingida quando a água é utilizada e alocada de modo que os sistemas hídricos permaneçam dentro da sua capacidade de regeneração, preservando os ecossistemas e suas funções, exigindo, para isso, a adoção de medidas estratégicas (SILVA *et al.*, 2017b).

Nesse sentido, muitos autores utilizaram o Sistema de Suporte à Decisão AcquaNet, sendo essa uma das principais ferramentas utilizadas neste trabalho para a avaliação da sustentabilidade dos reservatórios.

Carvalho *et al.* (2009) utilizaram o modelo IrrigaLS, que integra a base de modelos do

AcquaNet, para subsidiar a análise de alocação de água para irrigação, comprovando a capacidade do modelo em simular problemas complexos de recursos hídricos e sua aptidão em contribuir em situações de planejamento e tomada de decisão.

Bacalhau (2015) fez uso do AcquaNet para simular a disponibilidade hídrica dos reservatórios de Pirapama e Sicupema e propor regras de operação a fim de evitar condições de racionamento e colapso nos mesmos, localizados na bacia do Pirapama, que abastece a Região Metropolitana do Recife. O AcquaNet foi utilizado no módulo de análise de Curvas de Aversão ao Risco – CAR, considerando como base para as simulações o biênio de vazões afluentes mais crítico da série histórica. As regras de operação obtidas através da simulação, quando aplicadas ao reservatório Pirapama, reduziram as condições de racionamento de 39 para 7 meses, validando o modelo como uma excelente ferramenta de apoio à tomada de decisão.

Farias *et al.* (2017) utilizaram o modelo AcquaNet para simular as perdas hídricas das águas da transposição do PISF, permitindo concluir que a construção de adutoras para a realização da transposição proporciona perdas hídricas menores do que a realização da transposição através do leito do Rio Paraíba, como era a proposta inicial do Ministério da Integração Nacional, já que, neste cenário, ocorre maior evaporação, infiltração e transbordamento.

Faro e Garcia (2017) simularam, através do AcquaNet, o cenário hidrológico do Sistema Cantareira, que abastece, dentre outras regiões, a Região Metropolitana de São Paulo, e compararam os resultados com seu atual processo de outorga, validando o programa como ferramenta de suporte à decisão para avaliação de problemas complexos de alocação de água.

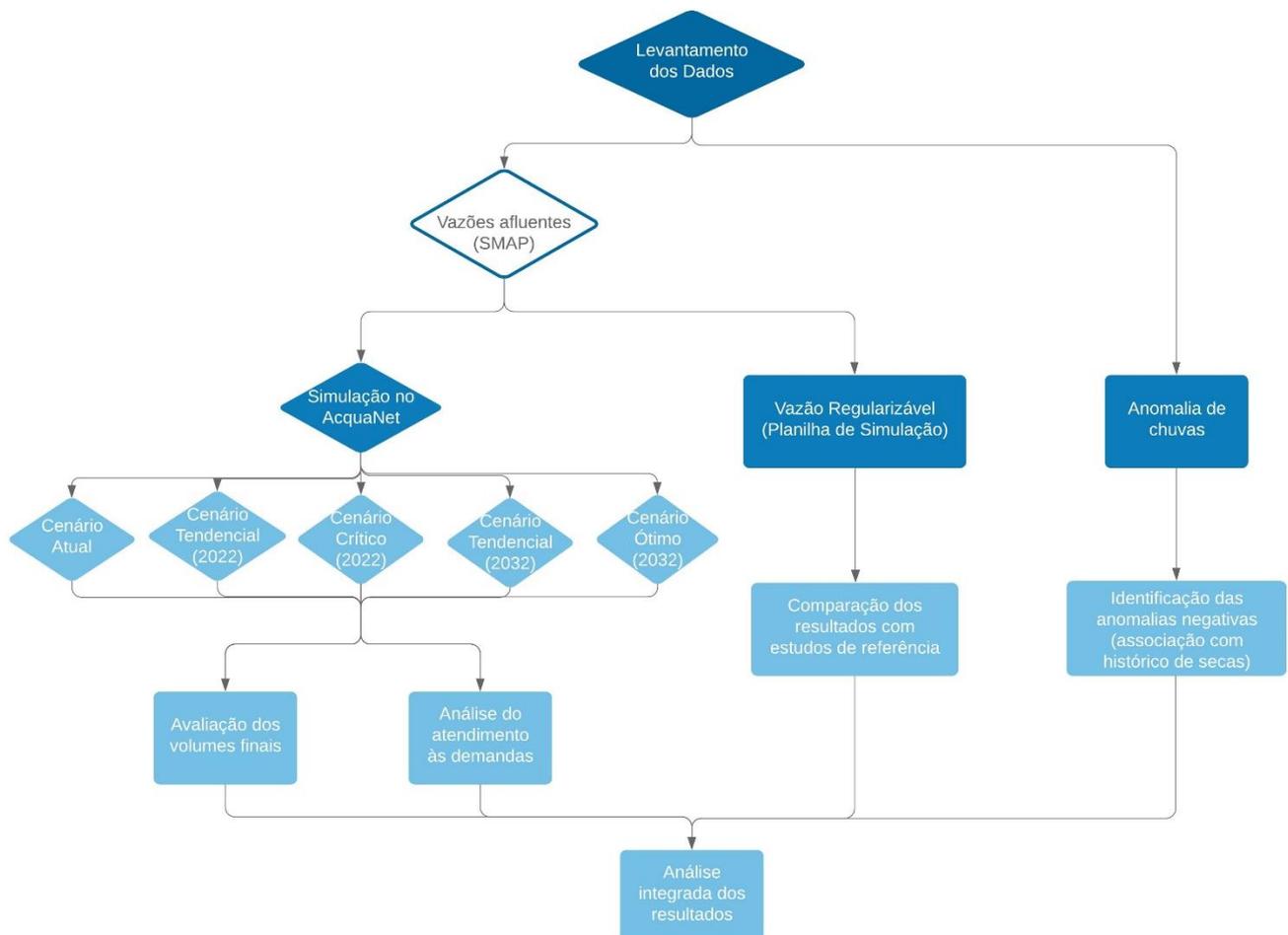
Silva *et al.* (2019) também fizeram uso do software, simulando o sistema Jaguaribe-Metropolitano, no Ceará, para avaliar suas vulnerabilidades hídricas através da identificação de falhas de abastecimento, possibilitando a proposição de um modelo de gestão integrada de águas urbanas como estratégia para a redução da vulnerabilidade hídrica.

Além dos diversos usos citados, o AcquaNet é um software bastante utilizado também em Planos de Recursos Hídricos, a exemplo do Plano Diretor de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de São Paulo – RMSP (SABESP, 2015) e do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Piancó-Piranhas-Açu (ANA, 2016).

#### 4. METODOLOGIA

Nesta etapa do trabalho, é descrita a metodologia utilizada para a realização das simulações dos reservatórios estratégicos da sub-bacia do Alto Piranhas. A princípio, foi realizado um levantamento dos dados necessários para as simulações. Após o levantamento dos dados, foi necessário gerar as vazões afluentes a cada reservatório a partir dos dados pluviométricos utilizando o modelo hidrológico SMAP. As vazões afluentes possibilitaram as simulações dos cenários elaborados no AcquaNet (item 4.5.2). Também possibilitaram, em paralelo, o cálculo das vazões regularizadas para cada reservatório estratégico, sendo utilizada, para isso, uma Planilha de Simulação da Operação de Reservatórios. Foi possível, então, analisar os resultados das anomalias de chuva e os resultados obtidos a partir das simulações, realizando, por fim, uma análise integrada entre eles. O fluxograma da metodologia utilizada pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma da metodologia utilizada



Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.1. Caracterização da área de estudo

A área de estudo consiste nos três reservatórios estratégicos da sub-bacia do Alto Piranhas: Bartolomeu I, Engenheiro Ávidos e São Gonçalo. Esses reservatórios são responsáveis por abastecer importantes cidades paraibanas como Cajazeiras e Sousa. A área de simulação inicia no reservatório Bartolomeu I e tem como exutório um ponto que antecede a entrada da bacia do Rio do Peixe, ficando esta fora da simulação.

Segundo a ANA (2016), o reservatório Engenheiro Ávidos e o Curema/Mãe d'Água, na Paraíba, junto ao Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves, no Rio Grande do Norte, representam, aproximadamente, 70% da capacidade de armazenamento da Bacia Hidrográfica do Piancó-Piranhas-Açu. Eles são encarregados de perenizar trechos de rio e, dentre os diversos usos da água, têm como destaque o abastecimento humano e a irrigação. O Engenheiro Ávidos, portanto, um dos reservatórios em estudo, tem grande relevância para a região.

A sub-bacia do Alto Piranhas está localizada entre as latitudes  $6^{\circ} 36' 47''$  e  $7^{\circ} 22' 56''$  Sul e as longitudes  $37^{\circ} 48' 15''$  a  $38^{\circ} 38' 15''$  Oeste. As bacias que a limitam são a do Rio Piancó ao Sul e Leste, a bacia do Rio do Peixe ao Norte, o Médio Piranhas a Nordeste e o Estado do Ceará a Oeste, possuindo uma extensão de  $2.518 \text{ km}^2$  (SCIENTEC, 1997).

Está inserida no território semiárido e possui precipitações médias anuais que variam de 400 a 800 mm, estando concentradas entre os meses de fevereiro e maio. Além da chuva concentrada nesses períodos do ano, a região apresenta solos rasos formados sobre um substrato cristalino, ocasionando uma baixa capacidade de armazenamento e resultando na intermitência de seus rios. Outro agravante são as evapotranspirações bastante elevadas na região, podendo atingir valores superiores a 2000 mm/ano (CBH-PPA, 2008).

O reservatório Bartolomeu I, construído de 1985 a 1986, está localizado no município de Bonito de Santa Fé, na Paraíba, cuja economia gira em torno da agricultura, sendo responsável pelo seu abastecimento. Apresenta latitude  $07^{\circ} 18' 45,58''$  Sul e longitude  $38^{\circ} 28' 48,98''$  Oeste (ANA, 2017a). Os usos identificados no açude são abastecimento humano, dessedentação animal, irrigação e aquicultura (ANA, 2016).

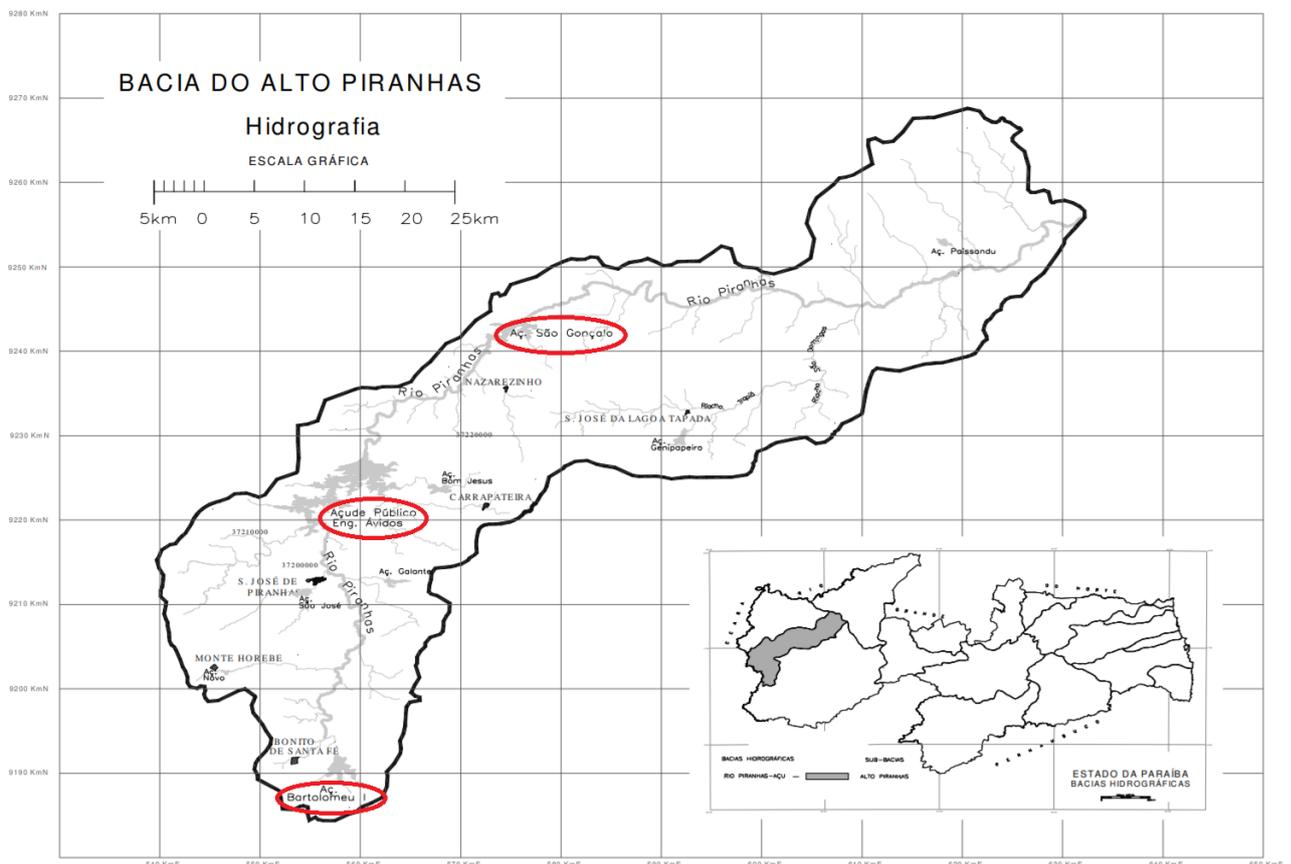
A barragem Engenheiro Ávidos situa-se no município de Cajazeiras/PB, com latitude  $06^{\circ} 59' 12,87''$  S e longitude  $38^{\circ} 27' 14,30''$  W. Segundo o Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS, 2003), sua construção se iniciou em 1932 pelo engenheiro Moacir

Ávidos e foi finalizada em 1936, pelo engenheiro Sílvio Aderne. Tem como finalidade o abastecimento de Cajazeiras e Nazarezinho, dos distritos Engenheiro Ávidos e Gravatá, além da regularização da vazão do rio Piranhas. Tem como usos da água o abastecimento humano, dessedentação animal, irrigação e indústria (ANA, 2016). O município de Cajazeiras, onde está situado, apresenta destaque no sertão como centro de educação e cultura.

O açude São Gonçalo, por sua vez, teve sua construção concluída em 1936. Está situado no município de Sousa e possui latitude de  $6^{\circ} 50' 40,34''$  Sul e longitude  $38^{\circ} 18' 55,53''$  Oeste. É responsável por abastecer as sedes municipais de Marizópolis/PB e Sousa/PB, além do distrito de São Gonçalo e do Perímetro Irrigado de São Gonçalo (PISG). Apresenta os mesmos usos da água identificados no Engenheiro Ávidos. Segundo dados do IBGE (2019), Sousa é o sexto município mais populoso do Estado da Paraíba e o primeiro de sua microrregião.

A UPH Alto Piranhas pode ser vista na Figura 4, na qual seus reservatórios estratégicos estão destacados.

Figura 4 - Bacia do Alto Piranhas



Fonte: Adaptado de Silans *et al.* (1998) *apud* Farias (2004).

Esses reservatórios, na mais recente crise hídrica enfrentada, que se iniciou em 2012 e perdura até os dias atuais, atingiram volumes tão baixos quanto 2,73% da sua capacidade no açude São Gonçalo, em fevereiro de 2016; 0,18% da sua capacidade no reservatório Bartolomeu I, no final de 2016 e 3,24% no Engenheiro Ávidos, em janeiro de 2018 (AESAs, 2019). Seus volumes armazenados nos últimos 10 anos podem ser vistos através das Figuras 5, 6 e 7 a seguir, com decréscimo marcante nos volumes a partir de 2012.

Figura 5 - Volumes armazenados do reservatório Bartolomeu I nos últimos 10 anos



Fonte: AESA (2019).

Figura 6 - Volumes armazenados do reservatório Engenheiro Ávidos nos últimos 10 anos



Fonte: AESA (2019).

Figura 7 - Volumes armazenados do reservatório São Gonçalo nos últimos 10 anos



Fonte: AESA (2019).

Essa queda nos volumes armazenados é fruto da crise hídrica iniciada em 2012 que ainda está sendo vivenciada pelos reservatórios, tendo sido uma das motivações para a realização deste trabalho. A inspiração partiu do Plano de Recursos Hídricos do Piancó-Piranhas-Açu, que avalia o comportamento dos reservatórios considerando a série histórica de afluências até 2009. Visando abranger a crise iniciada em 2012, a série histórica foi estendida até 2017.

É importante ressaltar que o PRH-PPA (ANA, 2016) determina que, para fins de gestão, deve-se considerar o açude Engenheiro Ávidos e o São Gonçalo como reservatórios integrados. A ANA (2017a) verifica, em sua avaliação dos reservatórios, que São Gonçalo e Engenheiro Ávidos têm forte dependência. Enquanto Engenheiro Ávidos opera com conforto hídrico quando isolado, São Gonçalo tem dificuldade em atender suas demandas nessa situação, constatando que a operação conjunta traz benefícios para o balanço hídrico local através da transferência de águas do Engenheiro Ávidos para o reservatório de jusante, que conta com demandas significativas para o Perímetro Irrigado de São Gonçalo, mesmo que essa transferência ainda não seja suficiente para garantir o atendimento pleno de suas demandas.

#### 4.2. Dados utilizados

Para a avaliação da precipitação, cálculo das vazões regularizáveis através da planilha de simulação e alocação de água com o uso do SSD AcquaNet, foram necessários alguns dados

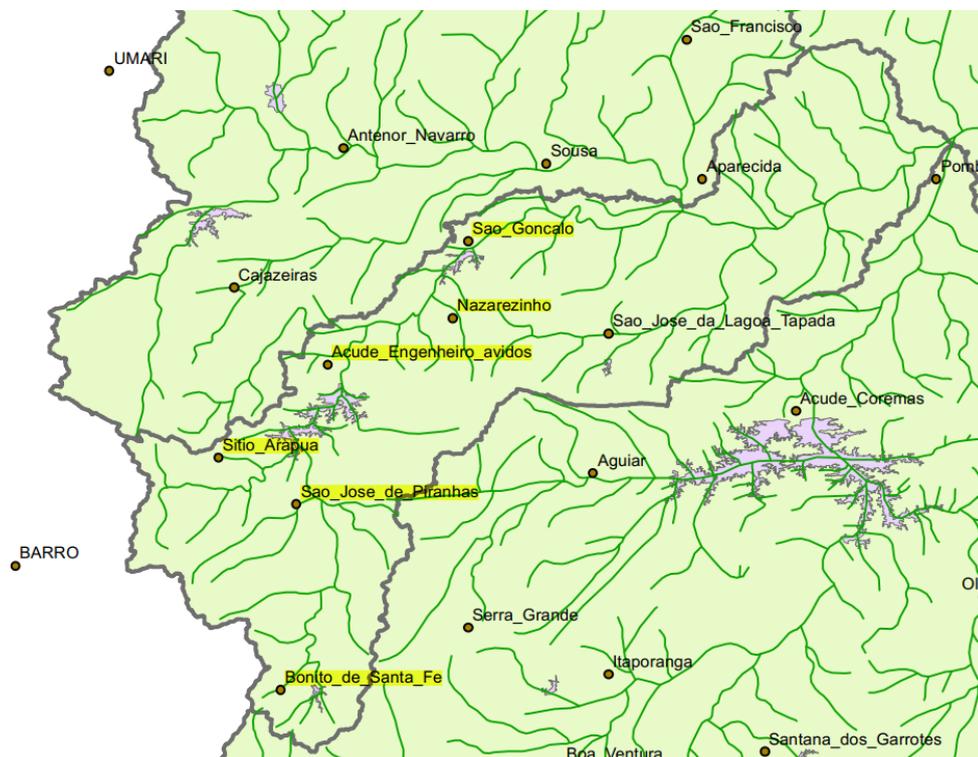
de entrada, conforme estão descritos nos itens a seguir.

#### 4.2.1. Dados Pluviométricos

Os dados pluviométricos utilizados foram os dados diários corrigidos e homogeneizados da atualização do Plano Estadual de Recursos Hídricos da Paraíba, que ainda está em desenvolvimento. Quanto aos postos pluviométricos, foram selecionados aqueles que possibilitariam o cálculo das precipitações médias sobre cada açude, tendo sido escolhidas as estações mais próximas de cada um deles.

Dessa forma, para o açude Bartolomeu I, considerou-se unicamente os dados pluviométricos da Estação Bonito de Santa Fé (3842698), pela sua grande proximidade com o reservatório. Para o Engenheiro Ávidos, foram considerados o São José de Piranhas (3843202), Bonito de Santa Fé, Sítio Arapuã (3842185) e Açude Engenheiro Ávidos (3833908). Por fim, para São Gonçalo, foram considerados os postos pluviométricos Nazarezinho (3833835), Açude Engenheiro Ávidos e São Gonçalo (3833639) (Figura 8).

Figura 8 - Estações pluviométricas selecionadas



Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.2.2. Dados Fluviométricos

Como os dados fluviométricos não são medidos diretamente, foi necessário obtê-los através das precipitações médias sobre cada açude. As precipitações médias foram calculadas com base nos dados pluviométricos das estações mais próximas de cada açude, conforme mencionado no item 4.2.1.

Foram geradas, então, as vazões mensais afluentes a cada reservatório. Para isso, foi utilizado o modelo chuva-vazão *Soil Moisture Accounting Procedure* - SMAP, que consiste em uma planilha de Excel. O detalhamento do cálculo de vazões através do SMAP, os parâmetros utilizados e os resultados das vazões afluentes encontram-se no Apêndice A deste trabalho.

#### 4.2.3. Dados de Evapotranspiração

Os dados de evapotranspiração utilizados foram os mesmos considerados pelo PRH-PPA (ANA, 2016), que obteve as informações através do banco de dados FAOCLIM, que realiza o cálculo de evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith.

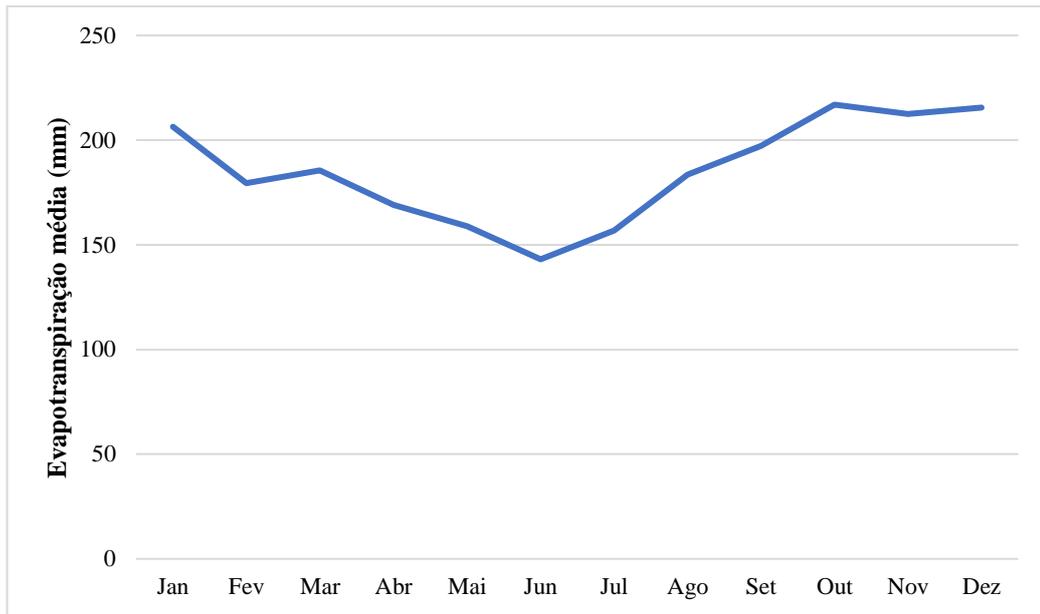
O PRH-PPA adota, para cada reservatório, a série de evapotranspirações da estação FAOCLIM mais próxima do açude, sendo esta a consideração feita neste trabalho. As evapotranspirações médias mensais podem ser vistas na Tabela 3 e Figuras 9 e 10.

Tabela 3 - Evapotranspirações médias (mm/mês)

Açudes	Taxa de evapotranspiração média (mm/mês)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Bartolomeu I	206,35	179,41	185,45	169,02	158,79	143,09	156,80	183,44	197,21	216,97	212,48	215,51
Engenheiro Ávidos	206,35	179,41	185,45	169,02	158,79	143,09	156,80	183,44	197,21	216,97	212,48	215,51
São Gonçalo	210,17	183,14	189,44	172,97	164,29	148,12	162,42	189,07	202,03	221,52	216,59	219,65

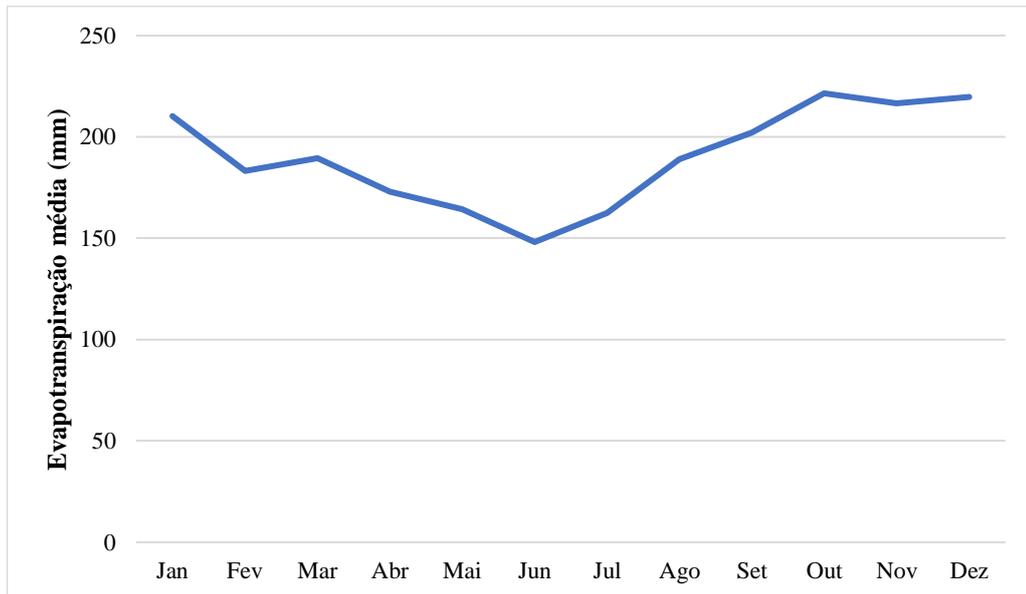
Fonte: ANA (2016).

Figura 9 - Médias mensais de lâminas evaporadas em Bartolomeu I e Engenheiro Ávidos



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 10 - Médias mensais de lâminas evaporadas no açude São Gonçalo



Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.2.4. Dados Estruturais

Para os volumes inicial, mínimo e máximo e curvas cota-área-volume de cada reservatório, necessários para a simulação, considerou-se os valores utilizados pelo PRH-PPA (ANA, 2016). Este considera que todos os reservatórios iniciam a simulação com 50% do seu

volume máximo. Os volumes inicial, mínimo e máximo para cada reservatório podem ser vistos na Tabela 4 a seguir. Os dados estruturais de curva cota-área-volume de cada reservatório podem ser vistos da Tabela 5 até a Tabela 7 e da Figura 11 até a Figura 13. Observa-se, também, a área da bacia hidrográfica de cada reservatório na Tabela 8.

Tabela 4 - Volumes dos reservatórios estratégicos (Mm<sup>3</sup>)

<b>Volumes</b>	<b>Bartolomeu I</b>	<b>Engenheiro Ávidos</b>	<b>São Gonçalo</b>
<b>Máximo (Mm<sup>3</sup>)</b>	17,600	255,000	44,600
<b>Mínimo (Mm<sup>3</sup>)</b>	0,351	27,968	2,982
<b>Inicial (Mm<sup>3</sup>)</b>	8,800	127,500	22,300

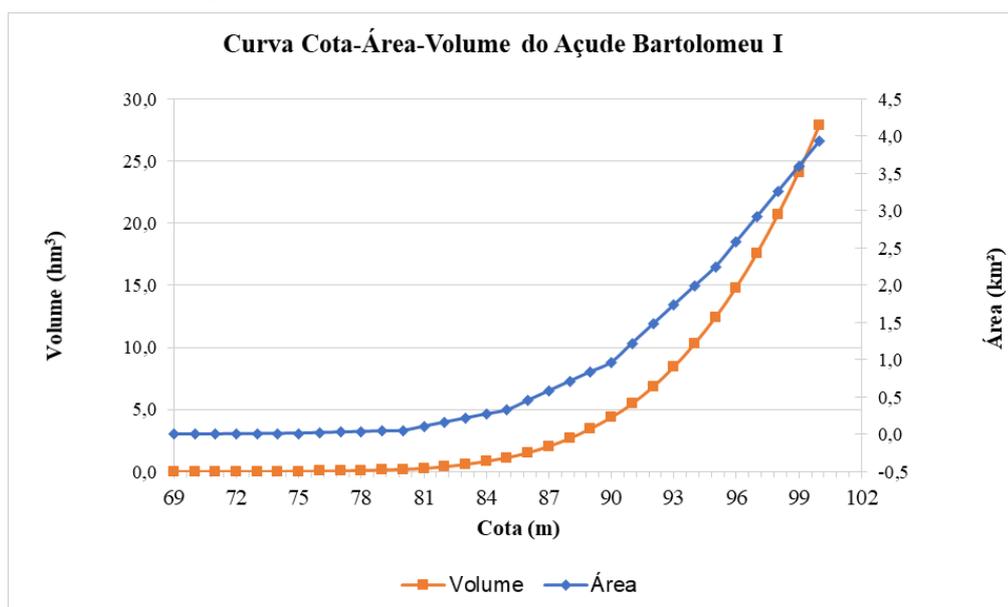
Fonte: ANA (2016).

Tabela 5 - Cota x Área x Volume do Reservatório Bartolomeu I

<b>Cota (m)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cota (m)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>
69,00	0	0	85,00	327.000	1.133.700
70,00	200	100	86,00	454.840	1.524.620
71,00	2.664	1.532	87,00	582.680	2.043.380
72,00	5.128	5.428	88,00	710.520	2.669.980
73,00	7.592	11.788	89,00	838.360	3.464.420
74,00	10.056	20.612	90,00	966.200	4.366.700
75,00	12.520	31.900	91,00	1.222.440	5.461.020
76,00	20.136	48.228	92,00	1.478.660	6.811.580
77,00	27.752	72.172	93,00	1.734.920	8.418.380
78,00	35.368	103.732	94,00	1991160	10.281.240
79,00	42.984	142.908	95,00	2.247.400	12.400.700
80,00	50.600	189.700	96,00	2.584.928	14.816.864
81,00	105.880	267.940	97,00	2.922.456	17.570.556
82,00	161.160	401.460	98,00	3.259.984	20.661.776
83,00	216.440	590260	99,00	3.597.512	24.090.524
84,00	271.720	834.340	100,00	3.935.040	27.856.800

Fonte: ANA (2016).

Figura 11 - Curva Cota-Área-Volume do Açude Bartolomeu I



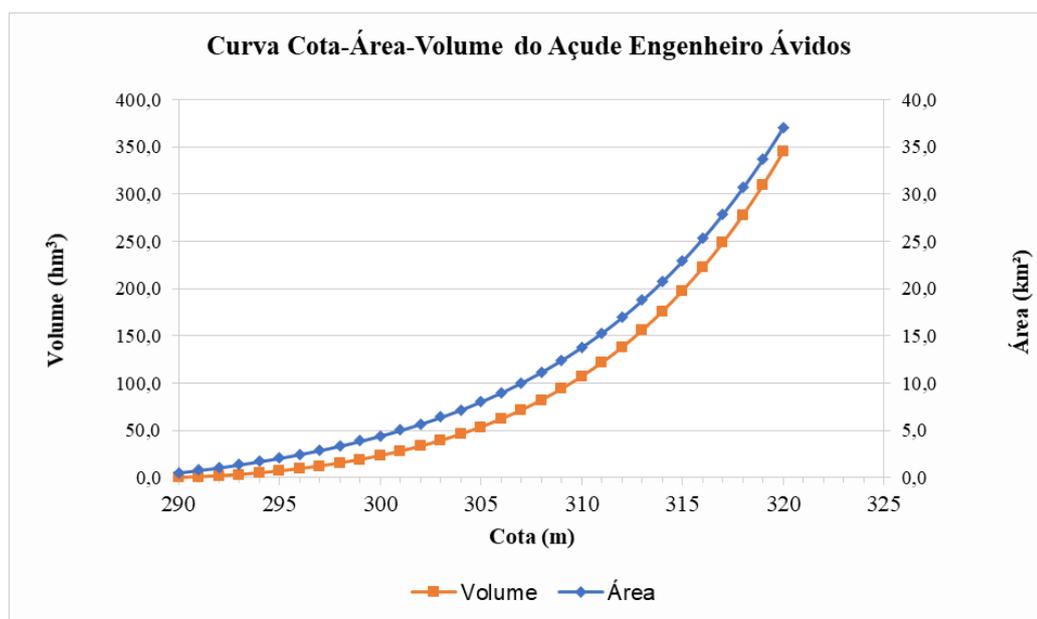
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 6 - Cota x Área x Volume do Reservatório Engenheiro Ávidos

Cota (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Cota (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
290,00	560.192	160.100	306,00	9.006.142	61.939.700
291,00	812.942	852.800	307,00	10.044.883	71.410.000
292,00	1.092.616	1.891.800	308,00	11.185.712	81.999.000
293,00	1.399.312	3.268.800	309,00	12.438.542	93.818.600
294,00	1.733.742	4.983.500	310,00	13.813.897	106.988.700
295,00	2.097.230	7.042.600	311,00	15.322.912	121.636.500
296,00	2.491.712	9.460.700	312,00	16.977.341	137.896.400
297,00	2.919.742	12.259.800	313,00	18.789.549	155.911.000
298,00	3.384.483	15.469.400	314,00	20.772.512	175.829.600
299,00	3.889.712	19.126.400	315,00	22.939.821	197.809.700
300,00	4.439.822	23.275.200	316,00	25.305.683	222.016.100
301,00	5.039.816	27.968.100	317,00	27.884.911	248.620.800
302,00	5.695.312	33.264.600	318,00	30.692.941	277.803.800
303,00	6.412.542	39.231.600	319,00	33.745.816	309.752.400
304,00	7.198.359	45.943.200	320,00	37.060.192	344.661.000
305,00	8.060.192	53.483.300			

Fonte: ANA (2016).

Figura 12 - Curva Cota-Área-Volume do Açude Engenheiro Ávidos



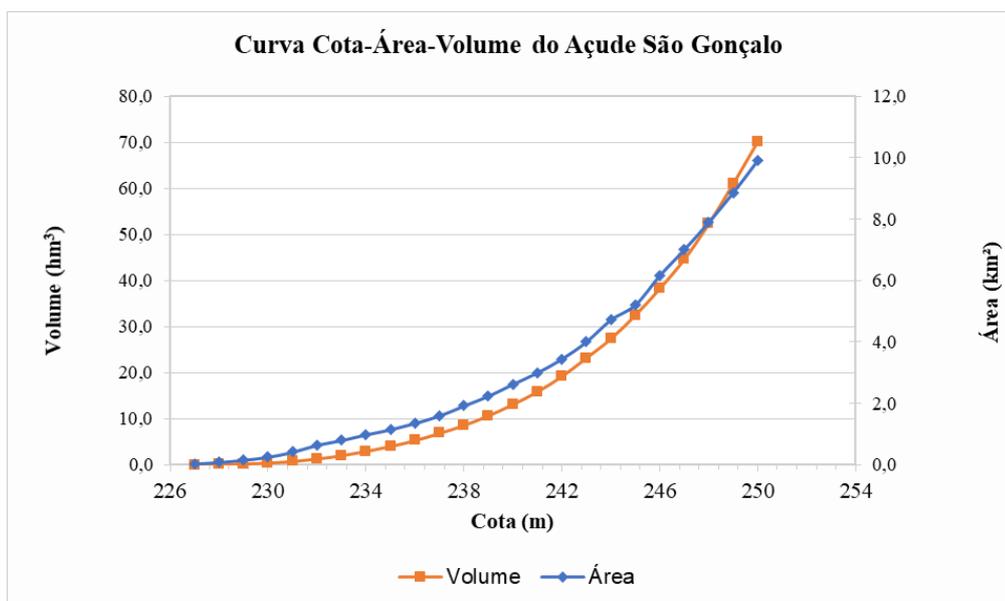
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 7 - Cota x Área x Volume do Reservatório São Gonçalo

Cota (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Cota (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
226,00	10.000	-	239,00	2.240.000	10.700.000
227,00	40.000	22.000	240,00	2.626.000	13.152.000
228,00	86.000	96.000	241,00	3.000.000	15.900.000
229,00	160.000	250.000	242,00	3.444.000	19.222.000
230,00	260.000	442.000	243,00	4.000.000	23.200.000
231,00	420.000	780.000	244,00	4.716.000	27.382.000
232,00	646.000	1.348.000	245,00	5.200.000	32.500.000
233,00	800.000	2.050.000	246,00	6.158.000	38.256.000
234,00	988.000	2.982.000	247,00	7.000.000	44.600.000
235,00	1.150.000	4.050.000	248,00	7.890.000	52.304.000
236,00	1.356.000	5.326.000	249,00	8.850.000	61.000.000
237,00	1.600.000	6.900.000	250,00	9.896.000	70.090.000
238,00	1.922.000	8.604.000			

Fonte: ANA (2016).

Figura 13 - Curva Cota-Área-Volume do Açude São Gonçalo



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 8 - Área da bacia hidrográfica dos reservatórios estratégicos (km<sup>2</sup>)

Reservatório	Área da bacia hidrográfica (km <sup>2</sup> )
Bartolomeu I	118,0
Engenheiro Ávidos	935,0
São Gonçalo	315,0

Fonte: ANA (2016).

#### 4.2.5. Demandas Hídricas

Para as demandas hídricas dos reservatórios, foram utilizadas as demandas futuras estimadas pelo PRH-PPA, que considera, para as projeções, os padrões de crescimento demográfico e econômico. As demandas adotadas foram as projetadas para os cenários Tendencial/Crítico para os anos de 2017, 2022 e 2032. A Tabela 9 resume as vazões utilizadas por açude estratégico.

Tabela 9 - Demandas (vazões de retirada) por açude estratégico (m<sup>3</sup>/s)

UPH/Açudes	Demandas (m <sup>3</sup> /s)																	
	Abastecimento Humano			Pecuária			Irrigação			Industrial			Aquicultura			Total		
	2017	2022	2032	2017	2022	2032	2017	2022	2032	2017	2022	2032	2017	2022	2032	2017	2022	2032
Alto Piranhas																		
Bartolomeu I	0,025	0,027	0,029	0,006	0,008	0,012	0,238	0,282	0,394	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,270	0,318	0,436
Engenheiro Ávidos	0,185	0,186	0,192	0,018	0,022	0,035	0,128	0,151	0,195	0,025	0,030	0,042	0,000	0,000	0,000	0,356	0,389	0,464
São Gonçalo	0,175	0,180	0,186	0,004	0,006	0,009	2,488	3,014	4,248	0,043	0,052	0,074	0,000	0,000	0,000	2,710	3,252	4,517

Fonte: Adaptado de ANA (2016).

Para a simulação, foi considerado que o exutório está localizado antes da entrada do Rio do Peixe. Entretanto, sua localização real é após essa entrada, abrangendo uma área maior do que no local de simulação, o que resulta em maiores demandas difusas. Dessa forma, foi adotado que as demandas difusas no exutório sofriam influência de uma área com proporção de 20% da área na localização real.

Além disso, para as simulações no AcquaNet, é necessário determinar as prioridades de atendimento para cada demanda, sendo que as de menor número são atendidas primeiro que as de número subsequente. A priorização de atendimento às demandas adotada respeita a determinação da Política Nacional de Recursos Hídricos, que estabelece que o abastecimento humano e a dessedentação animal são usos prioritários. Sendo assim, as demandas foram priorizadas da seguinte forma (Tabela 10):

Tabela 10 - Ordem de prioridades de usos

Prioridade	Tipo de uso
1	Abastecimento humano
1	Dessedentação animal
2	Aquicultura
2	Indústria
2	Irrigação Concentrada
3	Irrigação Difusa
4	Outros usos
5	Reservatórios

Fonte: Elaborado pela autora.

### 4.3. Avaliação da precipitação

A partir dos dados de precipitação de 1962 a 2017 (item 4.2.1), foi realizada uma análise da anomalia das chuvas em cada posto pluviométrico selecionado para cada ano da série, a fim de identificar os anos mais chuvosos e mais secos, aprimorando a compreensão do comportamento dos reservatórios no período estudado. Os seis postos analisados foram: Bonito de Santa Fé, São José de Piranhas, Sítio Arapuã, Açude Engenheiro Ávidos, Nazarezinho e São Gonçalo (Figura 8, item 4.2.1).

Os dados de precipitação diários de cada posto foram transformados em dados anuais para o cálculo das anomalias de chuva, que foi realizado para cada estação através da Equação 1:

$$a = \frac{P_i - \bar{P}}{\bar{P}} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

- $a$  – anomalia, em porcentagem;
- $P_i$  – precipitação total no ano  $i$  ( $mm$ );
- $\bar{P}$  – média pluviométrica anual de todos os anos no posto em questão ( $mm$ ).

Para cada posto, o ano  $i$  varia de 1962 a 2017. As anomalias negativas são aquelas que representam os anos de baixos índices pluviométricos com relação à média do posto em estudo, enquanto as anomalias positivas representam os anos de índices pluviométricos superiores à média naquele posto.

### 4.4. Cálculo das vazões regularizáveis

A vazão regularizada por um reservatório é obtida a partir da simulação da operação deste, a qual se baseia na equação do balanço hídrico. Para a realização da simulação, são utilizadas séries de vazões naturais afluentes. A vazão regularizada está associada a um nível de garantia, que é determinado a partir do número de falhas que ocorrem no período simulado, e é, portanto, uma medida de confiabilidade. Para gestão operacional de reservatórios, a vazão

de referência é a  $Q_{90}$  anual, que é a vazão contínua anual liberada que apresenta falhas em apenas 10% do tempo de operação. A vazão regularizada com 100% de garantia é denominada vazão firme (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2004; ANA, 2016).

Com o intuito de obter as vazões regularizadas para os reservatórios em estudo, foi utilizada uma planilha de Excel programada para a Simulação da Operação de Reservatórios (ALMEIDA, 2006).

A planilha utiliza a equação do balanço de massa para a simulação, que considera como entradas a precipitação sobre a bacia hidráulica do açude e a vazão afluente. Como saídas, considera a evaporação sobre a bacia hidráulica do reservatório e suas demandas. A planilha permite que o usuário divida as demandas em abastecimento humano e irrigação, onde a irrigação só passa a ser atendida após o atendimento do abastecimento humano, que tem prioridade superior (ALMEIDA, 2006). Diferentemente do AcquaNet, a planilha utilizada não realiza a otimização na alocação da água, tendo sido essa a razão da sua utilização para a regularização dos reservatórios.

Para a simulação, foi necessário o fornecimento dos seguintes dados de entrada: série de vazões afluentes ( $m^3/s$ ), precipitação (mm), evaporação (mm), demandas (vazões de retirada) ( $m^3/s$ ), área da bacia hidrográfica ( $km^2$ ), curva cota-área-volume, volumes inicial, máximo e mínimo ( $m^3$ ), cotas inicial, máxima e mínima (m).

Os dados de precipitação média dos reservatórios, calculados conforme pode ser visto no Apêndice A, para cada um dos meses do período de estudo, os dados fluviométricos, dados de evaporação e dados estruturais utilizados foram os dados descritos nos itens 4.2.1 ao 4.2.4, possuindo o período de simulação de 56 anos (1962 – 2017).

Um dos resultados fornecidos automaticamente pela planilha são as garantias para as demandas informadas, que consistem no percentual de tempo em que não ocorreram falhas ao longo da simulação. Além da garantia, a planilha ainda fornece os seguintes resultados para cada mês de cada ano, todos em  $m^3/mês$  (ALMEIDA, 2006):

- Volume no início do mês simulado;
- Volume afluente ao reservatório;
- Demanda para irrigação;

- Demanda para abastecimento;
- Volume precipitado sobre a área da bacia hidráulica do reservatório;
- Volume evaporado sobre a área da bacia hidráulica do reservatório;
- Volume vertido (sangrado);
- Volume no final do mês simulado;
- Falhas para a irrigação e para o abastecimento humano, sendo escrito valor 1 (um) quando naquele mês o reservatório falhar e 0 (zero) quando não houver falha.

Através do método de tentativa e erro, os reservatórios foram simulados para diferentes demandas. A simulação foi realizada para cada reservatório separadamente, partindo do reservatório de cabeceira. Dessa forma, foi possível obter os volumes vertidos após a regularização do reservatório em simulação. Esses volumes foram transformados em vazões sangradas, que foram somadas às vazões afluentes na simulação do reservatório subsequente, repetindo o processo até chegar ao exutório. Dessa forma, foram calculadas a vazão de referência para gestão operacional de reservatórios, sendo esta a  $Q_{90}$ , e a vazão firme ( $Q_{100}$ ). Calculou-se também a  $Q_{99}$  para fins comparativos com valores encontrados em outros estudos de referência.

#### **4.5. Alocação de água no AcquaNet**

##### **4.5.1. Modelo AcquaNet**

O modelo utilizado neste trabalho para a simulação de volumes e atendimento às demandas do sistema de reservatórios estratégicos integrados foi o AcquaNet, já que é um modelo que possibilita a simulação de sistemas de recursos hídricos de forma bastante detalhada e simples.

O atual modelo conhecido nacional e internacionalmente como AcquaNet foi, a princípio, inspirado no modelo de rede de fluxo desenvolvido por John W. Labadie (Labadie, 1988), o MODSIM. Segundo Labadie (2006), o MODSIM foi projetado para desenvolver

estratégias a nível de bacia hidrográfica para gestão da água de curto prazo, planejamento operacional de longo prazo, planejamento diante de eventos de secas, análise dos direitos da água e resolução de conflitos nos âmbitos urbanos, agrícolas e ambientais.

O AcquaNet foi desenvolvido pelo Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões (LabSid) Aplicados à Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). É uma estrutura modular, onde o SSD AcquaNet é o módulo base, responsável por integrar quatro módulos que permitem avaliar a qualidade da água, realizar cálculos de alocação de água, irrigação e geração de curvas de aversão ao risco. (LABSID, 2013). O modelo utiliza o algoritmo *Out-of-Kilter* para a otimização de rede de fluxo eficiente, o qual possibilita o tratamento de sistemas grandes e complexos em microcomputadores comuns (SCHARDONG *et al.*, 2009). Usa também um algoritmo de balanço de massa para a simulação (ALBANO e PORTO, 2003 *apud* ALBANO, 2004).

Lucena (2018) destaca, dentre as características mais importantes do AcquaNet, o fato da sua modelagem não ser complicada, pois diversas funções comuns na simulação de bacias hidrográficas já são incorporadas automaticamente no modelo e o usuário não precisa se preocupar em programá-las, sendo as principais:

- Pode-se utilizar quantos nós de demanda forem necessários na bacia (consuntivas ou não). Cada demanda será atendida seguindo a ordem de prioridade de 1 a 99, atribuída pelo usuário, onde 1 é a maior prioridade e, caso ocorram déficits, as demandas com menor prioridade são reduzidas em primeiro lugar;
- O reservatório é operado através do conceito de volume meta ou nível meta, sendo uma prioridade atribuída a este. Quando o volume armazenado for menor que o volume meta, o reservatório guardará água se as outras prioridades da rede foram menores;
- As perdas por evaporação dos reservatórios são consideradas através de processo iterativo.

Segundo Barbosa (2008), o AcquaNet pode ser utilizado na opção de simulação contínua, que realiza os cálculos sequencialmente no tempo, ou na opção de planejamento tático, de maneira estatística. Na simulação contínua, que foi a utilizada neste trabalho, o número total de anos (NT) é a variável mais importante e os cálculos são realizados de forma contínua, para todos os anos, tendo como base os dados fornecidos de séries de vazões afluentes mensais com duração igual a NT. Os cálculos ocorrem da seguinte forma:

- Partindo do volume inicial informado para o reservatório, fornece o cálculo para o final deste ano, que será o volume inicial do ano seguinte;
- O cálculo se repete até NT;
- Os resultados são apresentados para todos os anos, continuamente.

Dentre os quatro módulos que compõem o AcquaNet, foi utilizado o módulo de alocação de água. De acordo com Porto *et al.* (2003), este módulo analisa problemas de alocação de água, considerando a sua disponibilidade, demandas atuais e futuras, prioridades de uso, restrições operacionais, etc., avaliando os déficits e riscos associados à operação do sistema.

Para isso, o modelo requer que o usuário informe alguns dados de entrada, sendo estes os mesmos descritos do item 4.2.2 ao item 4.2.5: série histórica de vazões afluentes para o período simulado; dados de evaporação; dados estruturais, incluindo o volume inicial, volume mínimo e volume máximo para cada reservatório; e as demandas adotadas, com suas respectivas prioridades. Além disso, é necessário informar o tempo de duração da simulação, que teve início em janeiro de 1962 e término em dezembro de 2017, o que consiste em um período de 56 anos.

#### 4.5.2. Cenários de simulação no AcquaNet

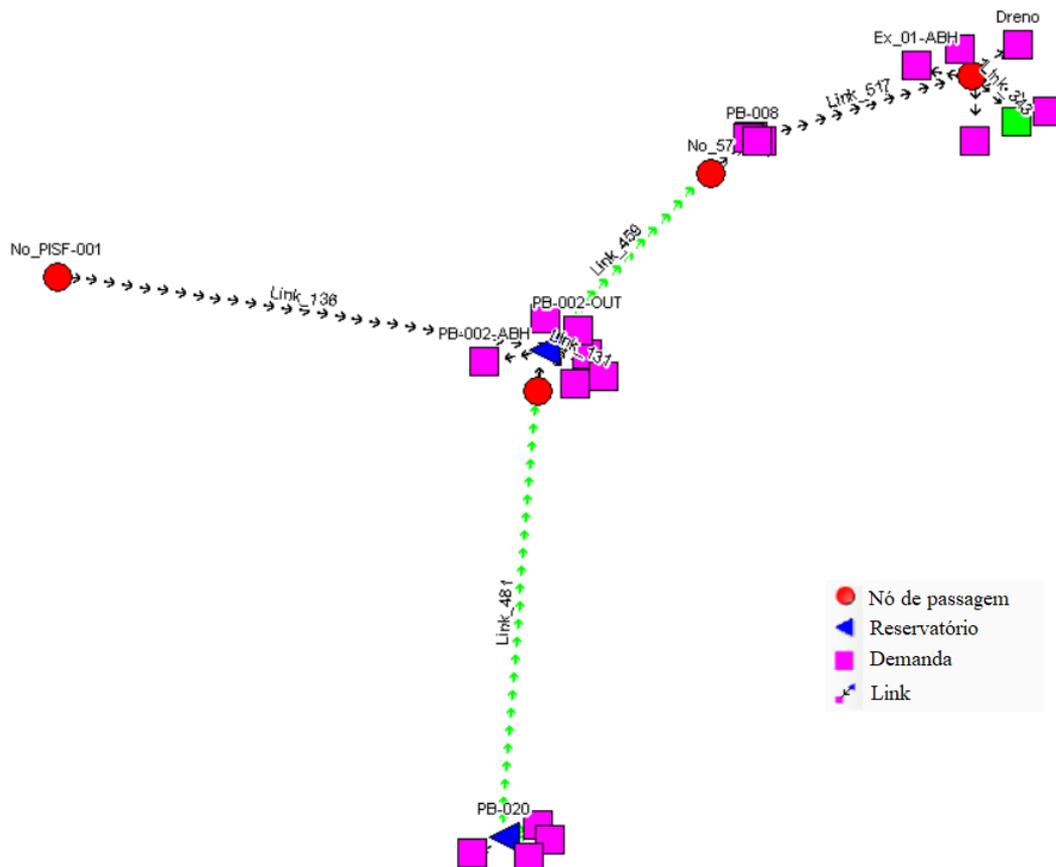
Os cenários de simulação foram elaborados de modo que permitissem a avaliação da capacidade de atendimento dos reservatórios diante das demandas atuais e futuras para os diversos usos da água identificados em cada um deles, levando em consideração os períodos de seca enfrentados. Foi adicionada a vazão advinda do Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF) para alguns dos cenários futuros, localizada a montante do açude Engenheiro Ávidos, objetivando analisar se a vazão prevista é suficiente para garantir a sustentabilidade do sistema e avaliar sua importância. Foi elaborado, também, um cenário que supõe o adiamento da conclusão das obras do PISF, possibilitando a avaliação do seu impacto sobre os reservatórios. Por fim, elaborou-se um cenário ideal, chamado de Cenário Ótimo, onde a situação é favorável para todos os reservatórios, mesmo com as demandas mais elevadas. Além disso, foi admitido que todos os reservatórios iniciam a simulação com 50% da sua capacidade máxima para todos os cenários.

Sendo assim, os seguintes critérios foram considerados:

- As vazões de retirada estimadas para os cenários Tendencial/Crítico no PRH-PPA para os anos de 2017, 2022 e 2032, que são os horizontes de projeto de curto, médio e longo prazo adotados pelo plano;
- A vazão de chegada do PISF no eixo norte, através do ponto de entrega a montante do açude Engenheiro Ávidos;
- A vazão de retirada proposta para o atendimento sem falhas no açude Bartolomeu I.

O layout de um dos cenários da rede simulada no AcquaNet é exibido na Figura 14 abaixo.

Figura 14 - Exemplo de rede simulada no AcquaNet



Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.5.2.1. Cenário Atual

No Cenário Atual, foi realizada uma simulação para os 56 anos de vazões afluentes da série histórica (1962 – 2017), que podem ser vistas através da Tabela 39 à Tabela 41, no Apêndice A. Para as vazões de retirada, admitiu-se como atuais aquelas estimadas pelo PRH-PPA para 2017, apresentadas no item 4.2.5, na Tabela 9, com suas respectivas prioridades (Tabela 10, item 4.2.5).

#### 4.5.2.2. Cenário Tendencial – 2022

No Cenário Tendencial para 2022, a simulação é efetuada para os 56 anos de vazões afluentes (1962 – 2017), considerando que as vazões de retirada são aquelas projetadas para 2022 pelo PRH-PPA (Tabela 9, item 4.2.5). Nesse cenário, é considerada uma vazão afluente advinda do PISF, visto que a conclusão das obras do eixo norte, fornecendo água para o Sertão da Paraíba, está prevista para 2021. O valor da vazão firme pelo portal do Rio Piranhas, a montante de Engenheiro Ávidos, foi considerado como sendo igual a 1,7 m<sup>3</sup>/s, adotando-se a mesma premissa do PRH-PPA, contribuindo para o aumento da disponibilidade hídrica do sistema integrado dos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo.

#### 4.5.2.3. Cenário Crítico – 2022

No Cenário Crítico, as retiradas são as mesmas do Cenário Tendencial – 2022. No entanto, esse cenário leva em consideração a hipótese de um novo adiamento na entrega das águas através do eixo norte, e, portanto, não há recebimento de afluições provenientes do PISF, sendo, por esse motivo, chamado de “Cenário Crítico”.

#### 4.5.2.4. Cenário Tendencial – 2032

O Cenário Tendencial para 2032 considera as demandas mais elevadas das simulações, que são as projeções para 2032 do PRH-PPA (Tabela 9, item 4.2.5). As afluições foram as mesmas de 56 anos utilizadas nos cenários anteriores e admite uma vazão adicional de 1,7 m<sup>3</sup>/s proveniente do PISF para os 56 anos de simulação.

## 4.5.2.5. Cenário Ótimo – 2032

No Cenário Ótimo, são adotadas as demandas de 2032 para os reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo (Tabela 9, item 4.2.5) e uma demanda única de 0,034 m<sup>3</sup>/s para Bartolomeu I. A vazão de retirada admitida de 0,034 m<sup>3</sup>/s para este reservatório foi encontrada através de simulações pelo método de tentativa e erro no AcquaNet, a fim de proporcionar uma situação favorável ao sistema em todo o período de simulação. As vazões afluentes são aquelas dos 56 anos de simulação dos demais cenários e também é considerada a vazão de 1,7 m<sup>3</sup>/s proveniente do PISF.

Os cenários simulados neste trabalho estão resumidos na Tabela 11, com suas respectivas considerações de aflúncias e demandas.

Tabela 11 - Resumo dos cenários simulados no AcquaNet

Cenário	Vazão de Afluência	Demandas	Demandas totais (m <sup>3</sup> /s)		
			Bartolomeu I	Engenheiro Ávidos	São Gonçalo
Atual	56 anos de vazões afluentes	Demandas projetadas pelo PRH-PPA para 2017	0,270	0,356	2,710
Tendencial - 2022	56 anos de vazões afluentes + PISF	Demandas projetadas pelo PRH-PPA para 2022	0,318	0,389	3,252
Crítico - 2022	56 anos de vazões afluentes	Demandas projetadas pelo PRH-PPA para 2022	0,318	0,389	3,252
Tendencial - 2032	56 anos de vazões afluentes + PISF	Demandas projetadas pelo PRH-PPA para 2032	0,436	0,464	4,517
Ótimo - 2032	56 anos de vazões afluentes + PISF	0,034 m <sup>3</sup> /s (Bartolomeu I)	0,034	0,464	4,517
		Demandas projetadas pelo PRH-PPA para 2032 (Engenheiro Ávidos e São Gonçalo)			

Fonte: Elaborado pela autora.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Anomalia de Chuvas

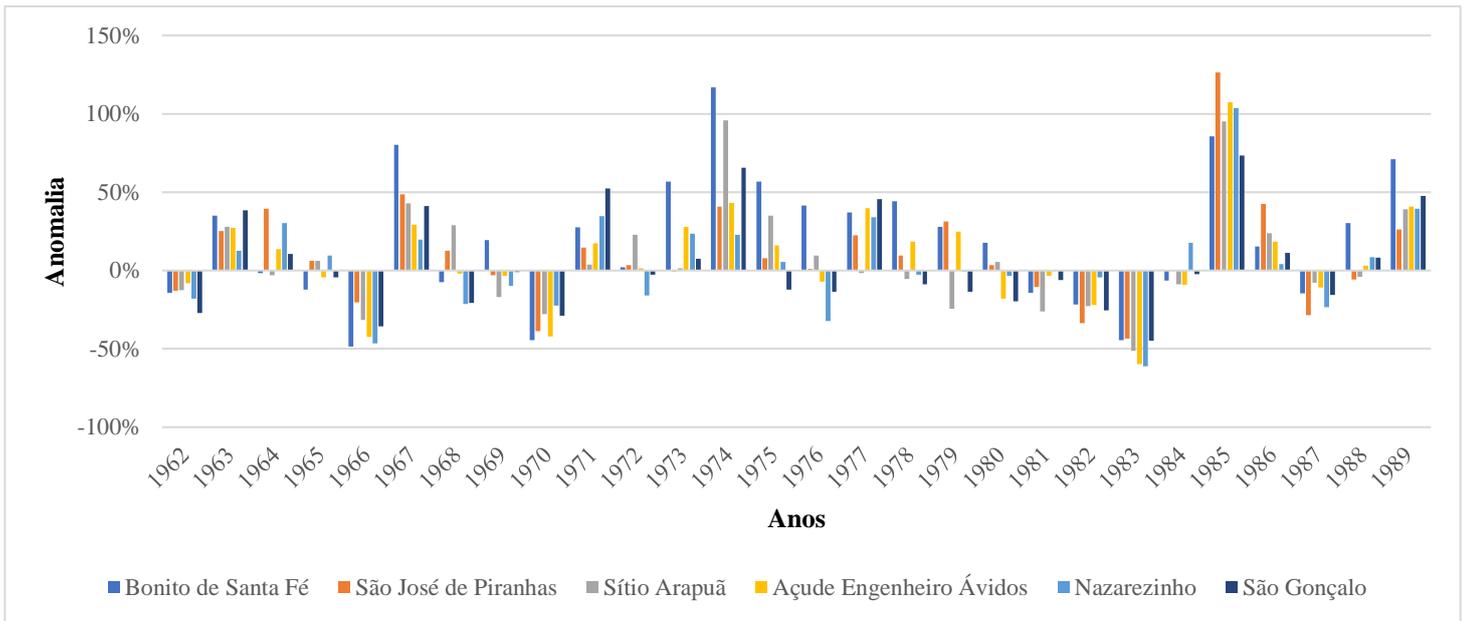
Os gráficos resultantes das anomalias de chuva podem ser observados nas Figuras 15 e 16, que foram divididas nos períodos de 1962 a 1989 e de 1990 a 2017 para uma melhor visualização do comportamento em cada posto pluviométrico.

De 1962 a 1978, são verificados alguns períodos mais secos, mas sempre seguidos de períodos chuvosos. Entretanto, em 1979, apenas Bonito de Santa Fé, São José de Piranhas e Açude Engenheiro Ávidos apresentam situações pluviométricas favoráveis, enquanto os outros postos já começam a enfrentar períodos secos. Essa seca começa a se estender aos demais postos no ano seguinte e atinge níveis de chuva extremamente baixos em 1983, sendo amenizada em 1984 e alcançando uma situação bem mais favorável em 1985, onde as chuvas nesse ano atingem valores maiores que o dobro da média pluviométrica de cada posto, com anomalias que chegam a 126,4% para São José de Piranhas, 107,3% para Açude Engenheiro Ávidos e 103,5% para Nazarezinho.

Entre períodos secos e chuvosos, as chuvas voltam a diminuir por períodos mais estabelecidos a partir de 1990, com grande severidade em 1992 e 1993. Nesse período (1990 – 2017), observa-se que a predominância é de anomalias negativas, que passam a ter uma recorrência mais frequente. São identificados períodos secos novamente de 1997 a 1999, tendo maior intensidade em 1998. Ocorre uma pequena trégua em 2000, mas verifica-se novamente a seca em 2001. Após períodos sofríveis, há uma melhora em 2008 que proporciona uma anomalia de 90,9% ao posto São Gonçalo. Depois disso, é identificado o período mais crítico e prolongado de secas no semiárido nordestino: 2012 a 2017, sendo este um período de seis anos, o mais longo da série histórica de anos secos consecutivos.

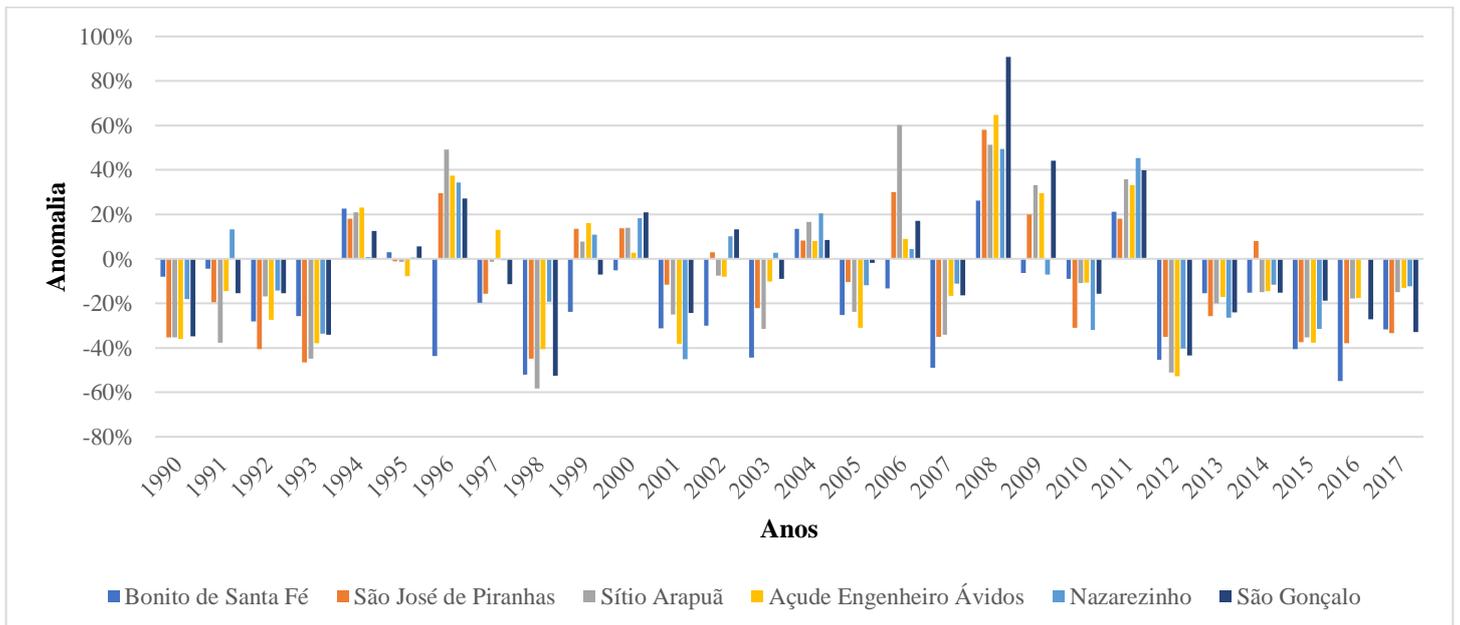
Observa-se que os períodos de seca identificados na análise da anomalia das chuvas são compatíveis com os históricos de seca do semiárido nordestino, que, segundo o Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil da Universidade Federal de Santa Catarina - CEPED (2015), deram-se em 1980, 1998, 2001 e 2012. Cirilo (2015) acrescenta também a seca de 1993 no Nordeste.

Figura 15 - Anomalia de chuvas nos postos selecionados (1962 – 1989)



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 16 - Anomalia de chuvas nos postos selecionados (1990 – 2017)



Fonte: Elaborado pela autora.

## 5.2. Vazões Regularizadas

Foi calculada, inicialmente, a vazão de retirada que forneceria 100% de garantia para o reservatório Bartolomeu I, que fica localizado na cabeceira da sub-bacia de estudo. Na primeira tentativa, foi adotada uma demanda de 50% da vazão média afluyente ao reservatório, equivalente a 0,163 m<sup>3</sup>/s. Para essa demanda, foi fornecida uma garantia de 83,48%, o que significa que o reservatório falhou em 111 meses de simulação, ou 16,52% do tempo (Tabela 12). A demanda foi diminuída até encontrar a vazão em que o reservatório não falhou em nenhum mês. Achado esse valor, a vazão sangrada resultante da simulação do Bartolomeu I foi somada à vazão afluyente ao açude Engenheiro Ávidos para encontrar sua vazão regularizada com 100% de garantia. O procedimento foi repetido para o açude São Gonçalo. Para achar a Q<sub>90</sub> e a Q<sub>99</sub>, o procedimento foi semelhante, entretanto, nesse caso, aumentou-se as demandas partindo da Q<sub>100</sub> para cada reservatório até achar a demanda em que o reservatório apresentasse falha em 10% e 1% do tempo, respectivamente. O resumo das vazões regularizadas encontradas a partir das simulações pode ser visto na Tabela 13.

Tabela 12 - Resumo da primeira tentativa para Bartolomeu I

<b>Demanda (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Total de meses de simulação</b>	<b>Total de meses em que houve falha</b>	<b>Garantia (%)</b>	<b>Frequência abaixo da demanda necessária (%)</b>
0,163	672	111	83,48	16,52

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 13 - Vazões regularizadas para os reservatórios estratégicos (m<sup>3</sup>/s)

<b>Açude</b>	<b>Q<sub>100</sub></b>	<b>Q<sub>99</sub></b>	<b>Q<sub>90</sub></b>
Bartolomeu I	0,054	0,066	0,124
Engenheiro Ávidos	1,189	1,387	2,611
São Gonçalo	0,685	0,886	1,698

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados de vazões regularizadas foram comparados com 4 estudos de referência, que foram o estudo do PISF, realizado em 2000, o do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba (AESAs, 2006), o Plano de Recursos Hídricos do Piancó-Piranhas-Açu (ANA,

2016) e o estudo intitulado “Reservatórios do Semiárido Brasileiro: Hidrologia, Balanço Hídrico e Operação”, coordenado pela ANA e lançado em 2017.

Os dados para cada reservatório do presente estudo e dos demais citados podem ser vistos nas Tabelas 14, 15 e 16.

Tabela 14 - Vazões regularizadas do açude Bartolomeu I (m<sup>3</sup>/s)

<b>Bartolomeu I</b>					
<b>Vazão regularizada</b>	<b>Autora</b>	<b>PISF</b>	<b>PPA</b>	<b>PERH-PB</b>	<b>ANA</b>
<b>Q<sub>100</sub></b>	0,054	-	-	-	-
<b>Q<sub>99</sub></b>	0,066	0,02	0,08	0,02	0,08
<b>Q<sub>90</sub></b>	0,124	0,04	0,12	0,06	0,12

Fonte: Adaptado de ANA (2016); ANA (2017a).

Tabela 15 - Vazões regularizadas do açude Engenheiro Ávidos (m<sup>3</sup>/s)

<b>Engenheiro Ávidos</b>					
<b>Vazão regularizada</b>	<b>Autora</b>	<b>PISF</b>	<b>PPA</b>	<b>PERH-PB</b>	<b>ANA</b>
<b>Q<sub>100</sub></b>	1,189	-	-	-	-
<b>Q<sub>99</sub></b>	1,387	1,60	1,61	1,45	0,90
<b>Q<sub>90</sub></b>	2,611	1,96	2,16	2,47	1,30

Fonte: Adaptado de ANA (2016); ANA (2017a).

Tabela 16 - Vazões regularizadas do açude São Gonçalo (m<sup>3</sup>/s)

<b>São Gonçalo</b>					
<b>Vazão regularizada</b>	<b>Autora</b>	<b>PISF</b>	<b>PPA</b>	<b>PERH-PB</b>	<b>ANA</b>
<b>Q<sub>100</sub></b>	0,685	-	-	-	-
<b>Q<sub>99</sub></b>	0,886	0,43	0,67	-	0,40
<b>Q<sub>90</sub></b>	1,698	0,52	0,80	-	0,62

Fonte: Adaptado de ANA (2016); ANA (2017a).

As vazões regularizadas desses estudos, quando comparadas aos resultados encontrados neste trabalho através da simulação, apresentam uma proximidade considerável, divergindo de forma mais representativa apenas no açude São Gonçalo. Essas diferenças são justificadas pelas diferentes metodologias adotadas, além dos dados utilizados em cada um dos estudos. Além disso, São Gonçalo, além de ser um reservatório relativamente pequeno, quando comparado a Engenheiro Ávidos, é o reservatório localizado mais a montante do sistema, sendo mais sensível às diferentes metodologias utilizadas.

### 5.3. Simulações no AcquaNet

#### 5.3.1. Simulação do Cenário Atual

Para o Cenário Atual, que considera as demandas projetadas para 2017 pelo PRH-PPA, obteve-se, através do AcquaNet, os resultados de volumes finais para cada um dos reservatórios. O tempo máximo abaixo do volume meta (capacidade máxima) para cada um dos reservatórios pode ser visto na Tabela 17, junto ao resumo das informações de esvaziamento.

Tabela 17 - Resumo do comportamento dos reservatórios para o Cenário Atual

Reservatórios	Tempo máximo abaixo do volume meta (meses)	Frequência abaixo do volume meta (%)	Tempo máximo de esvaziamento (meses)	Frequência de esvaziamento (%)
Bartolomeu I	225	96,28	42	37,50
Engenheiro Ávidos	81	87,65	1	0,15
São Gonçalo	34	79,91	15	25,15

Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando os resultados, observa-se que o açude Bartolomeu I, com a demanda total de 0,27 m<sup>3</sup>/s deste cenário, atinge o volume morto em 252 dos 672 meses de simulação, equivalente a 37,5% de frequência de esvaziamento. Em julho de 2014, o reservatório atinge o volume mínimo, de 351.000 m<sup>3</sup>, e permanece nele até o final da simulação (dezembro de 2017), totalizando o tempo máximo de 42 meses nesse estado para o período simulado, ou seja, mais de 3 anos consecutivos no volume morto, despertando uma preocupação alarmante quanto à sustentabilidade do reservatório.

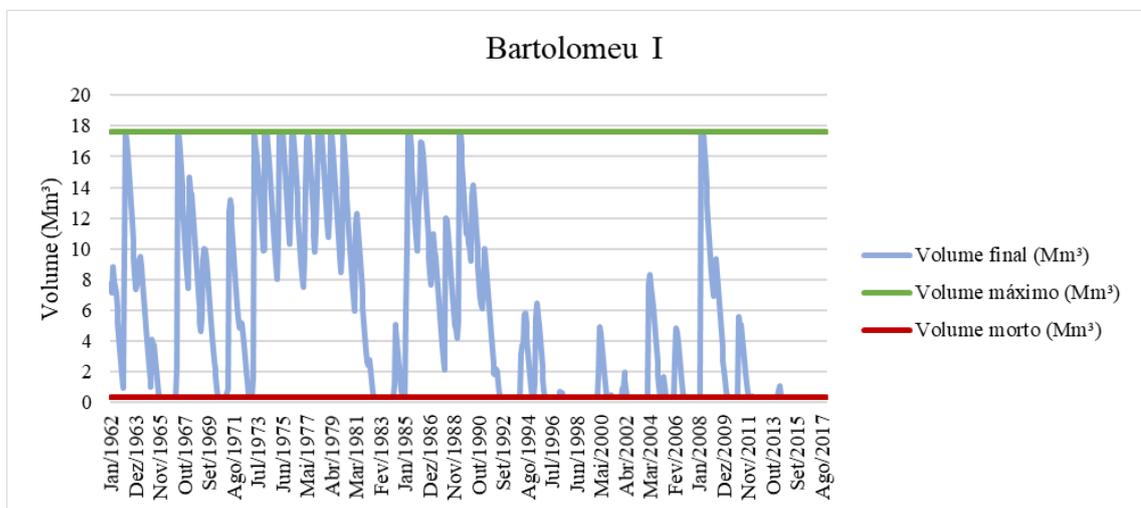
O reservatório Engenheiro Ávidos, que possui as demandas totais de 0,356 m<sup>3</sup>/s, atinge o volume morto, que é de 27.968.100 m<sup>3</sup> somente em fevereiro de 2017, o que representa uma frequência de esvaziamento de 0,15%, apresentando uma situação mais favorável frente às suas demandas quando comparado a Bartolomeu I. Entretanto, seu volume tende a diminuir cada vez mais a partir de agosto de 2017 e finaliza a simulação com 31.579.000 m<sup>3</sup>, equivalente a 12,38% da sua capacidade máxima, apresentando um volume final apenas 1,42% superior ao volume mínimo, compondo uma situação também preocupante, pois o prolongamento do período de seca poderia levar ao colapso do reservatório. Corroborando com esses resultados,

dados da AESA (2019) mostram que o reservatório se encontrava, em 06 de setembro de 2019, com menos de 20% da sua capacidade máxima, já estando entre os reservatórios em observação.

O açude São Gonçalo, com as demandas totais iguais a 2,710 m<sup>3</sup>/s, atinge o volume mínimo em 169 dos 672 meses de simulação, ou seja, 25,15% do tempo. O tempo máximo em que o reservatório se encontra no volume morto é de 15 meses, de dezembro de 1982 a fevereiro de 1984. O volume do reservatório sofre muitas variações entre os volumes máximo e mínimo ao longo do período simulado e, entre as recargas e esvaziamentos, ao final da simulação, seu volume retorna a decair a partir de junho de 2017 e atinge o volume morto ao término da simulação, com 2.982.000 m<sup>3</sup>.

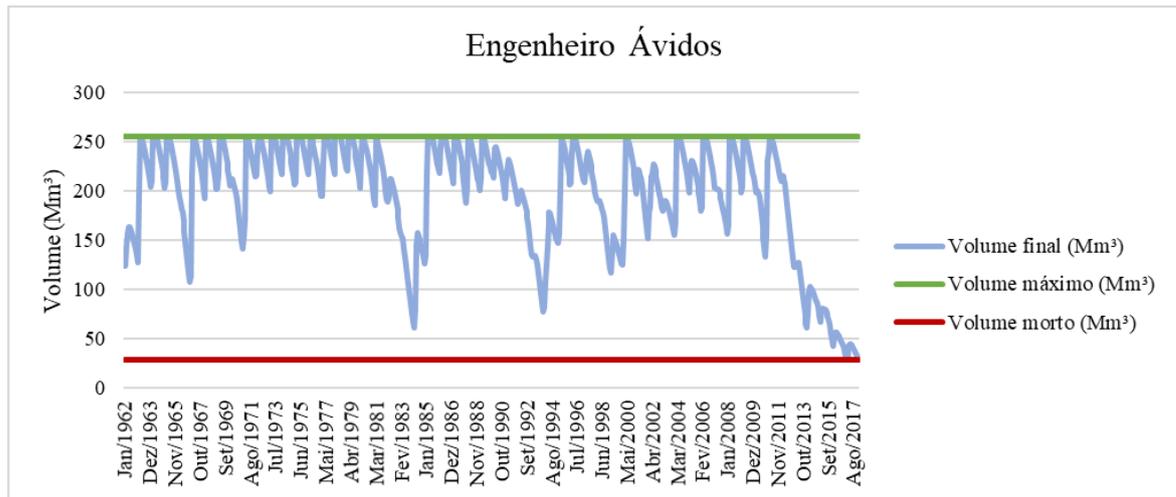
O comportamento dos volumes finais nos reservatórios para os 56 anos de simulação pode ser visualizado através das Figuras 17 a 19.

Figura 17 - Comportamento do reservatório Bartolomeu I no Cenário Atual



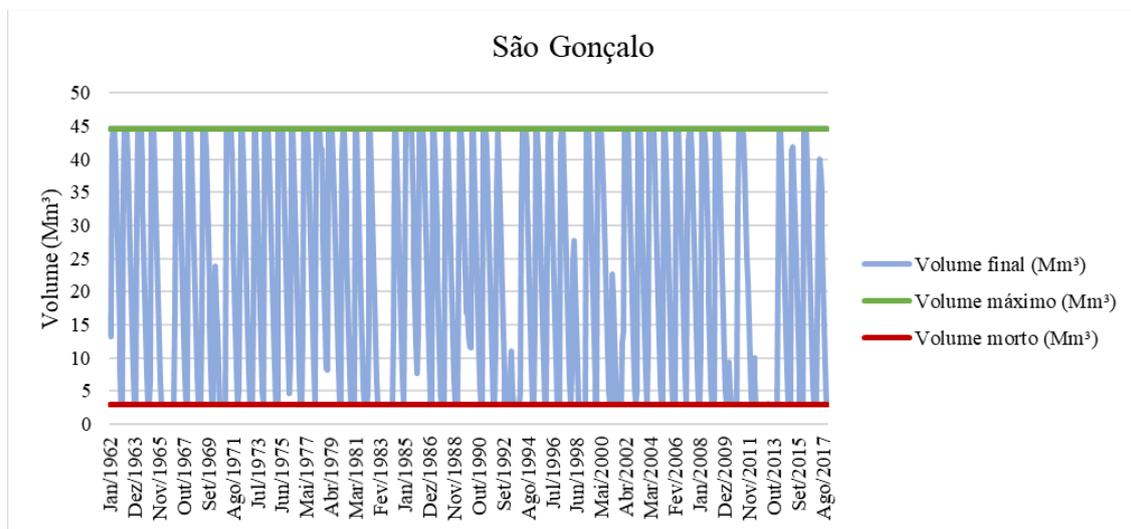
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 18 - Comportamento do reservatório Engenheiro Ávidos no Cenário Atual



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 19 - Comportamento do reservatório São Gonçalo no Cenário Atual



Fonte: Elaborado pela autora.

Quanto ao atendimento às demandas, o AcquaNet fornece as informações para cada reservatório, que estão resumidas nas Tabelas 18 a 20.

O reservatório Bartolomeu I foi o que apresentou mais déficits no atendimento a todas as suas demandas, com o maior percentual de falhas para a irrigação difusa, sendo este de 37,35% do tempo, pela sua baixa prioridade na alocação e elevado valor (Tabela 18). Entretanto, a grande preocupação está voltada para o abastecimento e a dessedentação animal, que possuem as prioridades máximas de atendimento e ainda apresentam falhas em 28,57% e 25,3% do tempo, respectivamente, evidenciando a insustentabilidade do reservatório frente às

suas demandas.

Os reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo (Tabelas 19 e 20), por sua vez, apresentaram falha em apenas um mês dos 672 meses simulados, sendo esta no atendimento à irrigação difusa para ambos, não apresentando falhas no atendimento das suas demais demandas.

Tabela 18 - Resumo do atendimento às demandas do Bartolomeu I no Cenário Atual

Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm <sup>3</sup> )	Vazão média fornecida (m <sup>3</sup> /s)	Vazão média fornecida (% da demanda média necessária)
Abast. Humano	19	28,57	12,039	0,018	72,73
Dess. Animal	10	25,30	2,575	0,005	75,69
Irrigação Difusa	42	37,35	145,817	0,155	65,31
Aquicultura	21	28,72	0,507	0,001	71,28

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 19 - Resumo do atendimento às demandas do Engenheiro Ávidos no Cenário Atual

Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm <sup>3</sup> )	Vazão média fornecida (m <sup>3</sup> /s)	Vazão média fornecida (% da demanda média necessária)
Abast. Humano	0	0,00	0,000	0,185	100,00
Dess. Animal	0	0,00	0,000	0,018	100,00
Indústria	0	0,00	0,000	0,025	100,00
Irrig. Concentr.	0	0,00	0,000	0,054	100,00
Irrigação Difusa	1	0,15	0,194	0,074	99,85

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 20 - Resumo do atendimento às demandas do São Gonçalo no Cenário Atual

Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm <sup>3</sup> )	Vazão média fornecida (m <sup>3</sup> /s)	Vazão média fornecida (% da demanda média necessária)
Abast. Humano	0	0,00	0,000	0,175	100,00
Dess. Animal	0	0,00	0,000	0,004	100,00
Indústria	0	0,00	0,000	0,043	100,00
Irrig. Concentr.	0	0,00	0,000	1,093	100,00
Irrigação Difusa	1	0,15	0,276	0,691	99,98

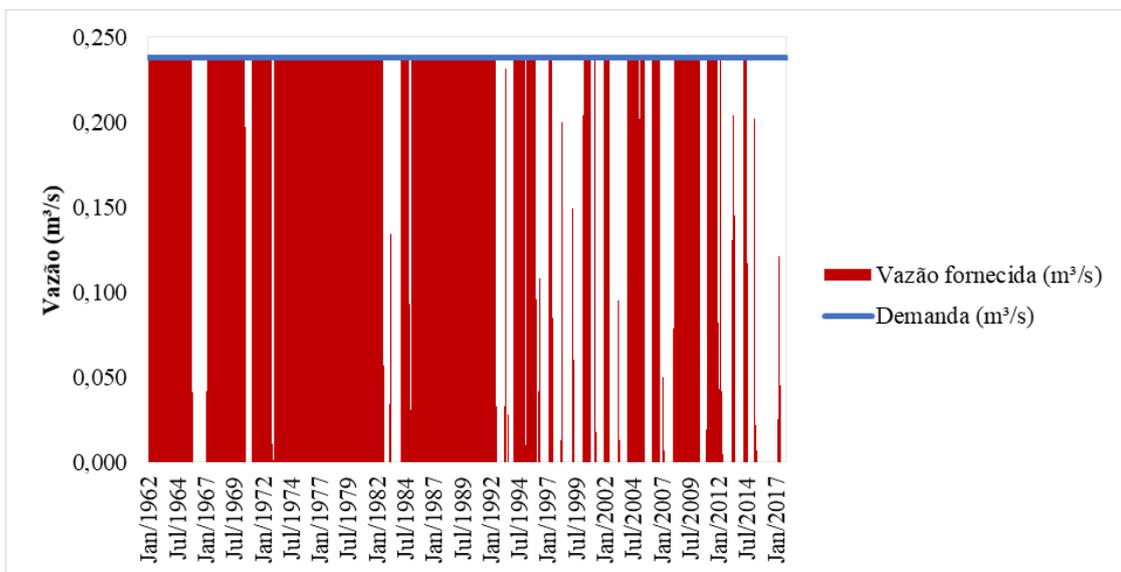
Fonte: Elaborado pela autora.

Pode-se visualizar melhor os períodos de déficit no atendimento através da Figura 20, que apresenta as falhas para a irrigação difusa no Bartolomeu I. Através dessa figura, é possível identificar que as falhas se tornam mais frequentes ao final da simulação, a partir da década de 90, coincidindo com os períodos de baixos índices pluviométricos (Figura 16, item 5.1), conforme esperado. Os demais atendimentos no Bartolomeu I apresentam um comportamento bastante semelhante, visto que todos apresentam falhas.

Para o atendimento da irrigação difusa em Engenheiro Ávidos, que apresentou falha em apenas um mês de simulação, o atendimento pode ser visto através da Figura 21, tendo esta ocorrido já próximo ao final do período simulado. São Gonçalo apresenta comportamento semelhante para o atendimento da irrigação difusa.

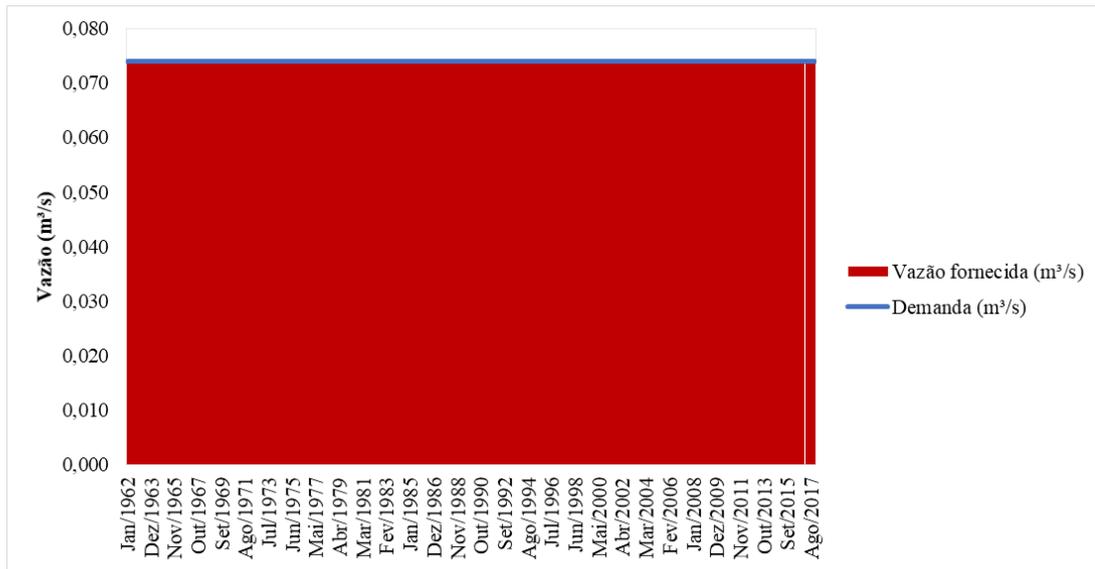
Excetuando-se a irrigação difusa, os reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo apresentam um comportamento único quanto ao atendimento das suas demandas, já que não há falhas em todo o período de simulação e, portanto, a vazão fornecida se iguala à demandada em todos os meses.

Figura 20 - Atendimento à irrigação difusa no Bartolomeu I no Cenário Atual



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 21 - Atendimento à irrigação difusa no Engenheiro Ávidos no Cenário Atual



Fonte: Elaborado pela autora.

### 5.3.2. Simulação do Cenário Tendencial – 2022

O Cenário Tendencial de 2022 é aquele que leva em consideração as demandas do PRH-PPA projetadas para 2022 e a vazão adicional proveniente do PISF. O comportamento dos açudes simulados para o Cenário Tendencial de 2022 está resumido na Tabela 21.

Tabela 21 - Resumo do comportamento dos reservatórios para o Cenário Tendencial - 2022

Reservatórios	Tempo máximo abaixo do volume meta (meses)	Frequência abaixo do volume meta (%)	Tempo máximo de esvaziamento (meses)	Frequência de esvaziamento (%)
Bartolomeu I	225	96,88	43	43,75
Engenheiro Ávidos	79	81,70	0	0,00
São Gonçalo	34	79,17	21	31,25

Fonte: Elaborado pela autora.

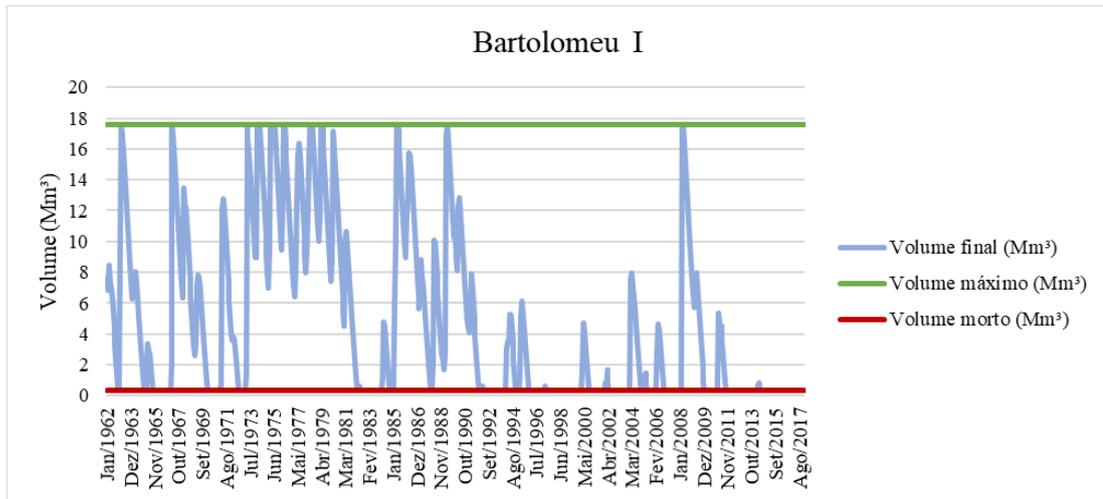
Quanto aos volumes finais, nesse segundo cenário, o açude Bartolomeu I, com as demandas totais de 0,318 m<sup>3</sup>/s, atinge o volume morto em 294 dos 672 meses de simulação, equivalente a 43,75% do tempo, ainda maior do que no cenário anterior. Como o reservatório não recebe as afluições do PISF, já que o ponto de entrada está localizado a montante de

Engenheiro Ávidos, o reservatório, que já se encontrava em situação crítica no Cenário Atual, apresenta uma performance ainda pior diante do aumento das demandas no Cenário Tendencial. O tempo máximo de esvaziamento é de 43 meses, iniciando agora em junho de 2014 até o final da simulação.

O reservatório Engenheiro Ávidos, que possui a demanda total igual a 0,389 m<sup>3</sup>/s para este cenário, não chega a atingir o volume morto, apresentando o menor volume no início da simulação, igual a 128.151.000 m<sup>3</sup>, e retornando a decair apenas no final dela, mas ainda finalizando a simulação com 172.960.000 m<sup>3</sup>, equivalente a 67,83% do seu volume total, bem superior ao seu volume atual. Além disso, ainda supera os 50% considerados no início da simulação. Em geral, apresenta volumes superiores ou próximos a 60% da sua capacidade, mostrando a relevância do PISF para o bom funcionamento do reservatório mesmo diante de demandas mais elevadas.

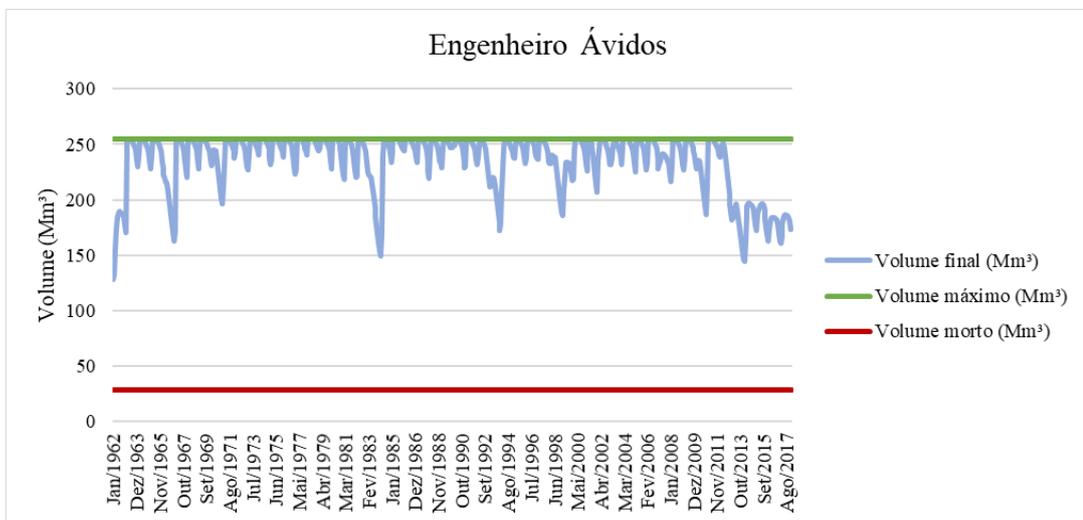
O açude São Gonçalo, com a demanda total igual a 3,252 m<sup>3</sup>/s, atinge o volume morto em 210 dos 672 meses, totalizando uma frequência de esvaziamento de 31,25%. O tempo máximo de 21 meses de esvaziamento se dá entre junho de 2012 e fevereiro de 2014, estando dentro do período da mais recente seca. O reservatório chega ao final da simulação com o volume mínimo nos dois últimos meses, sendo este um sinal de alerta mesmo com a vazão adicional do PISF. Dessa forma, evidencia-se a necessidade de uma gestão eficiente a fim de evitar seu colapso. É importante ressaltar a dependência de São Gonçalo com relação a Engenheiro Ávidos, que operam de forma integrada e, portanto, a gestão deste último também deve ser levada em consideração para o bom funcionamento dos reservatórios. Os volumes finais em cada reservatório estratégico estão contidos nas Figuras 22 a 24.

Figura 22 - Comportamento do reservatório Bartolomeu I no Cenário Tendencial - 2022



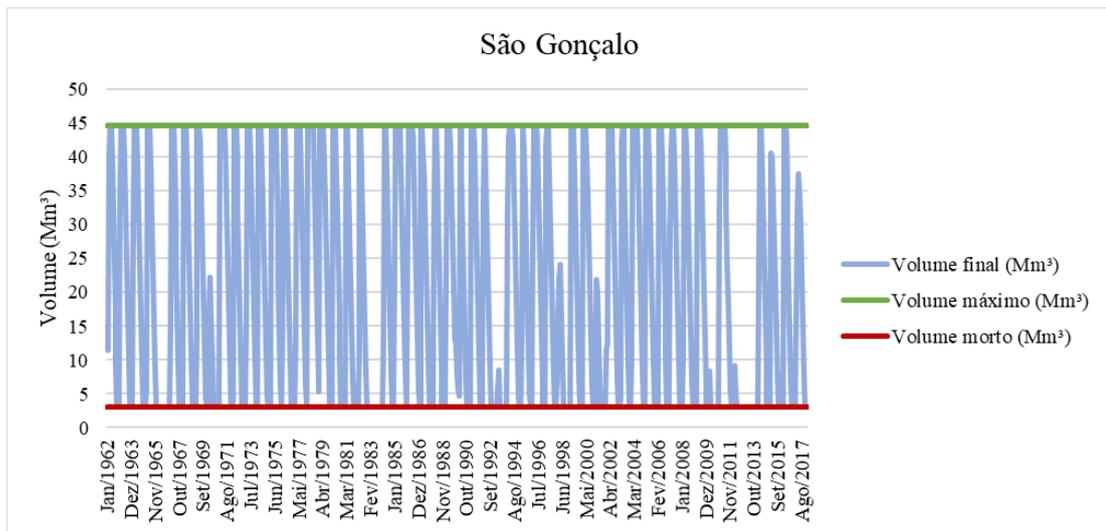
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 23 - Comportamento do reservatório Engenheiro Ávidos no Cenário Tendencial - 2022



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 24 - Comportamento do reservatório São Gonçalo no Cenário Tendencial – 2022



Fonte: Elaborado pela autora.

No Cenário Tendencial de 2022, o açude Bartolomeu I apresenta uma dificuldade ainda maior em atender todas as suas demandas, atingindo percentuais de falha em mais de 40% do tempo para a irrigação difusa e em torno de 30% para as demais demandas (Tabela 22). Essa dificuldade é justificada pelo aumento das demandas com relação ao cenário anterior, junto ao fato de que o reservatório não é beneficiado pelas afluições do PISF. Sendo assim, a insustentabilidade de Bartolomeu I neste cenário supera a do cenário simulado anteriormente.

Os reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo, ambos beneficiados pelo PISF, pois estão a jusante do seu ponto de entrada, não apresentam falhas em atender as suas demandas (Tabela 23 e Tabela 24), mesmo com o atingimento do volume morto no açude São Gonçalo em diversos intervalos de tempo durante a simulação.

Tabela 22 - Resumo do atendimento às demandas do Bartolomeu I no Cenário Tendencial - 2022

Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm <sup>3</sup> )	Vazão média fornecida (m <sup>3</sup> /s)	Vazão média fornecida (% da demanda média necessária)
Abast. Humano	21	32,44	14,901	0,019	68,75
Dess. Animal	10	29,61	3,979	0,006	71,84
Irrigação Difusa	43	43,45	198,230	0,170	60,20
Aquicultura	21	32,74	0,578	0,001	67,26

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 23 - Resumo do atendimento às demandas do Engenheiro Ávidos no Cenário Tendencial - 2022

Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm <sup>3</sup> )	Vazão média fornecida (m <sup>3</sup> /s)	Vazão média fornecida (% da demanda média necessária)
Abast. Humano	0	0	0	0,186	100
Dess. Animal	0	0	0	0,022	100
Indústria	0	0	0	0,030	100
Irrig. Concentr.	0	0	0	0,063	100
Irrigação Difusa	0	0	0	0,088	100

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 24 - Resumo do atendimento às demandas do São Gonçalo no Cenário Tendencial - 2022

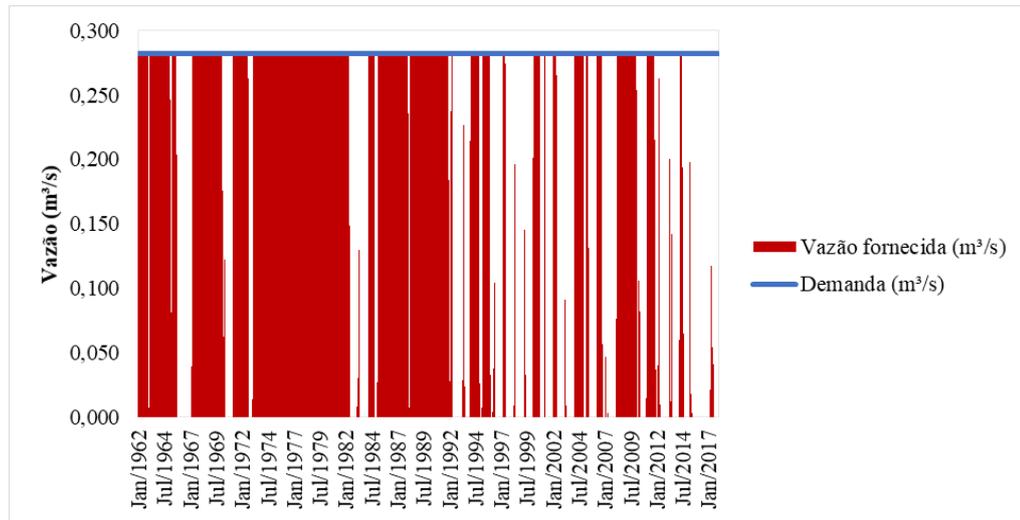
Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm <sup>3</sup> )	Vazão média fornecida (m <sup>3</sup> /s)	Vazão média fornecida (% da demanda média necessária)
Abast. Humano	0	0	0	0,180	100
Dess. Animal	0	0	0	0,006	100
Indústria	0	0	0	0,052	100
Irrig. Concentr.	0	0	0	1,279	100
Irrigação Difusa	0	0	0	0,817	100

Fonte: Elaborado pela autora.

O atendimento à demanda de irrigação difusa do açude Bartolomeu I pode ser visualizado através da Figura 25, apresentando um comportamento semelhante no atendimento às suas demais demandas.

Os açudes Engenheiro Ávidos e São Gonçalo, que não apresentam falhas em nenhum período de simulação, apresentam um comportamento uniforme quanto ao atendimento a todas as suas demandas, em que as vazões fornecidas se igualam às vazões demandadas em todos os meses.

Figura 25 - Atendimento à irrigação difusa no Bartolomeu I no Cenário Tendencial - 2022



Fonte: Elaborado pela autora.

### 5.3.3. Simulação do Cenário Crítico – 2022

Para o Cenário Crítico, que considera as mesmas demandas do Cenário Tendencial de 2022, sem receber, entretanto, a vazão adicional do PISF, obteve-se, através do AcquaNet, os resultados de volumes finais dos reservatórios e de atendimento às suas demandas, sendo possível compará-los com os resultados obtidos no Cenário Tendencial, avaliando o impacto do PISF no funcionamento dos reservatórios.

O comportamento dos reservatórios neste cenário está resumido na Tabela 25 e as Figuras 26 a 28 contêm os volumes finais ao longo da simulação para os reservatórios no Cenário Crítico comparadas aos volumes finais no Cenário Tendencial.

Tabela 25 - Resumo do comportamento dos reservatórios para o Cenário Crítico - 2022

Reservatórios	Tempo máximo abaixo do volume meta (meses)	Frequência abaixo do volume meta (%)	Tempo máximo de esvaziamento (meses)	Frequência de esvaziamento (%)
Bartolomeu I	225	96,88	43	43,75
Engenheiro Ávidos	103	89,29	4	1,19
São Gonçalo	34	81,10	21	32,59

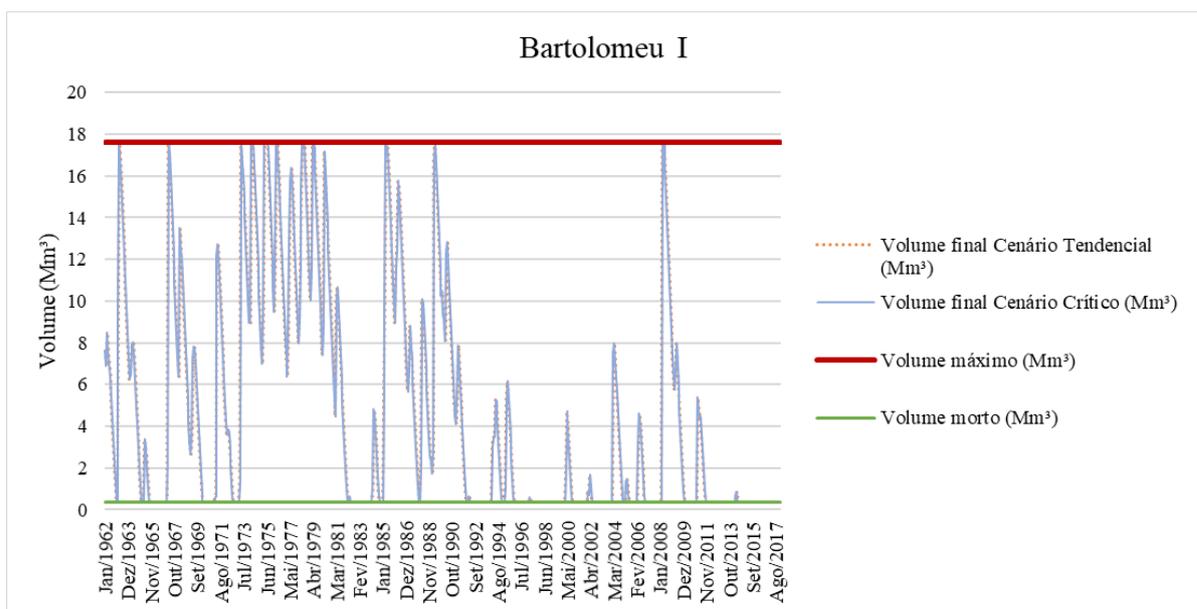
Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando a Figura 26, percebe-se que não há impacto no açude Bartolomeu I. Isso era esperado, já que este não é beneficiado pela transposição. Sendo assim, os volumes finais são iguais para os dois cenários, ficando seus valores sobrepostos no gráfico.

O impacto é percebido especialmente no açude Engenheiro Ávidos (Figura 27), que, além de possuir volumes finais consideravelmente mais baixos em todo o período simulado no Cenário Crítico, atinge neste o volume morto em 8 meses da simulação. Sem o PISF, encerra dezembro de 2017 também no volume morto, enquanto no Cenário Tendencial o reservatório contava com um volume de 67,83% da sua capacidade máxima e o volume mínimo, que representa apenas 10,97%, não havia sido atingido em nenhum mês.

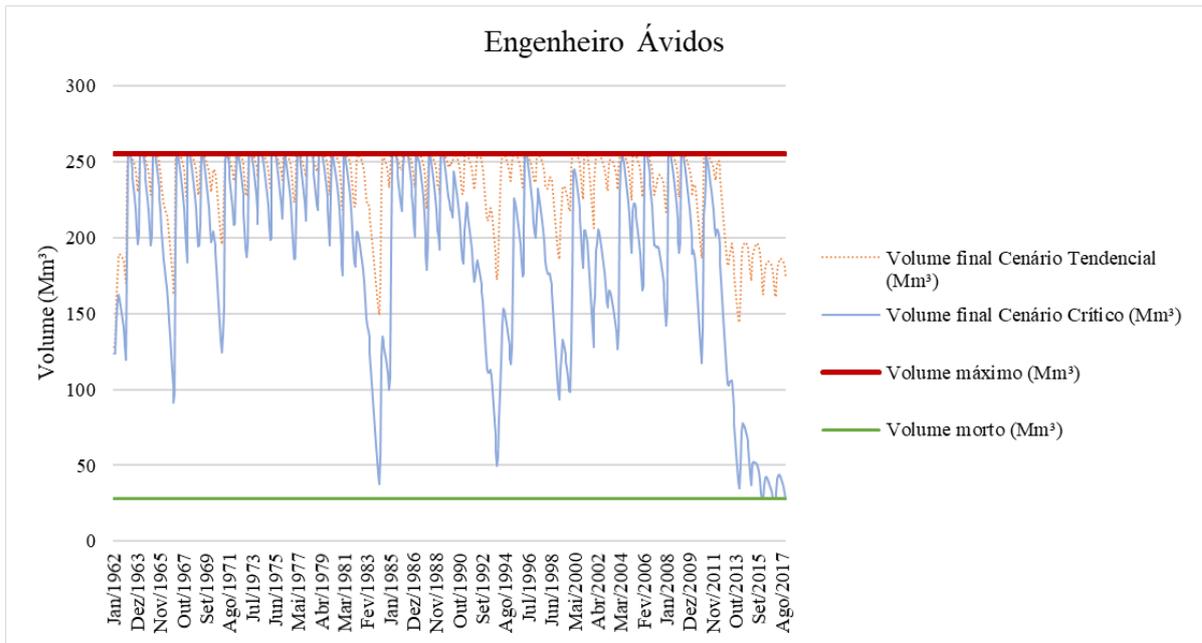
O açude São Gonçalo também sofre, de forma mais branda, com a ausência do PISF, como pode ser visto através da Figura 28, que mostra algumas diferenças nos volumes finais dos dois cenários. Atinge o volume morto em 32,59% do tempo, percentual ligeiramente superior ao cenário anterior, e finaliza a simulação já no volume morto, assim como os outros dois reservatórios do sistema.

Figura 26 - Comportamento do reservatório Bartolomeu I no Cenário Crítico x Cenário Tendencial - 2022



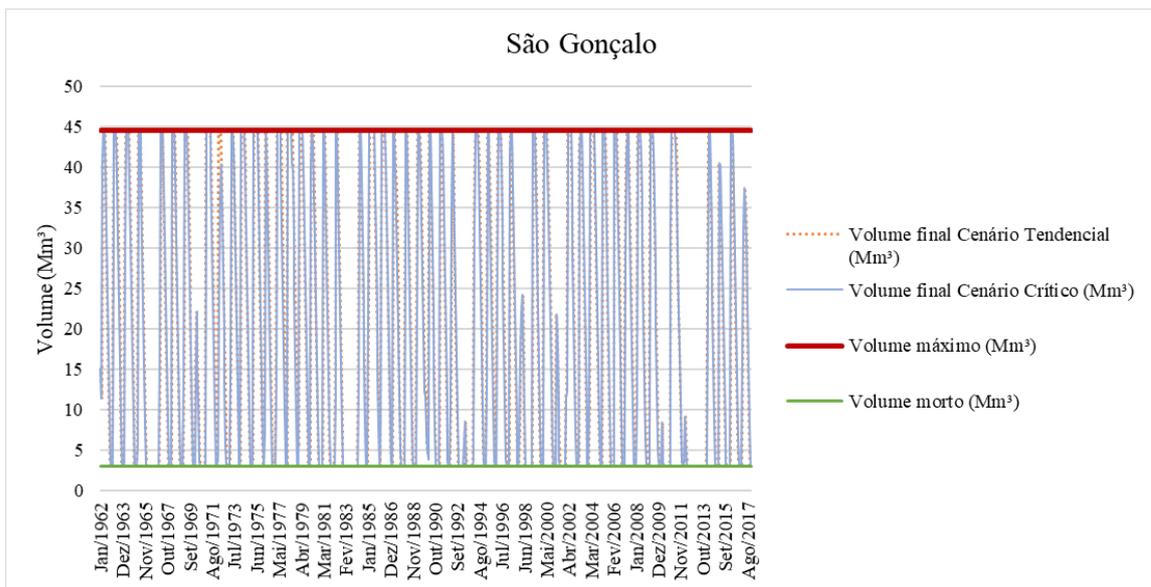
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 27 - Comportamento do reservatório Engenheiro Ávidos no Cenário Crítico x Cenário Tendencial - 2022



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 28 - Comportamento do reservatório São Gonçalo no Cenário Crítico x Cenário Tendencial - 2022



Fonte: Elaborado pela autora.

Quanto ao atendimento das demandas, o reservatório Bartolomeu I tem comportamento idêntico ao Cenário Tendencial (Tabela 26).

Pode-se observar, através das Tabelas 26 a 28 que o atendimento de todas as demandas fica comprometido para os reservatórios. Engenheiro Ávidos e São Gonçalo (Tabela 27 e

Tabela 28), que no cenário anterior não apresentaram falhas em atender nenhuma demanda, agora apresentam falhas no atendimento a todas elas, mesmo que durante curtos intervalos de tempo dentro da simulação. Apesar do açude São Gonçalo não ter sofrido impactos significativos em seus volumes finais, sabe-se da dependência deste de Engenheiro Ávidos para atender suas demandas com conforto devido a estes reservatórios operarem de forma integrada. Como Engenheiro Ávidos tem repercussão expressiva na sua disponibilidade hídrica com a ausência do PISF, ambos apresentam dificuldades em atender às retiradas necessárias.

Sabe-se que a tendência é que haja, com o tempo, o aumento das demandas, que já não conseguem ser atendidas plenamente neste cenário. Dessa forma, a finalização das obras do PISF se faz imprescindível para garantir o bom desempenho dos reservatórios e garantir sua sustentabilidade, já que, sem o PISF, não seriam capazes de atender sem falhas para demandas elevadas.

Tabela 26 - Resumo do atendimento às demandas do Bartolomeu I no Cenário Crítico - 2022

Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm <sup>3</sup> )	Vazão média fornecida (m <sup>3</sup> /s)	Vazão média fornecida (% da demanda média necessária)
Abast. Humano	21	32,44	14,901	0,019	68,75
Dess. Animal	10	29,61	3,979	0,006	71,84
Irrigação Difusa	43	43,45	198,224	0,170	60,20
Aquicultura	21	32,74	0,578	0,001	67,26

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 27 - Resumo do atendimento às demandas do Engenheiro Ávidos no Cenário Crítico - 2022

Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm <sup>3</sup> )	Vazão média fornecida (m <sup>3</sup> /s)	Vazão média fornecida (% da demanda média necessária)
Abast. Humano	2	0,60	1,955	0,185	99,40
Dess. Animal	2	0,60	0,231	0,022	99,40
Indústria	3	0,89	0,473	0,030	99,11
Irrig. Concentr.	3	1,04	1,038	0,062	99,07
Irrigação Difusa	4	1,19	1,85	0,087	98,81

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 28 - Resumo do atendimento às demandas do São Gonçalo no Cenário Crítico - 2022

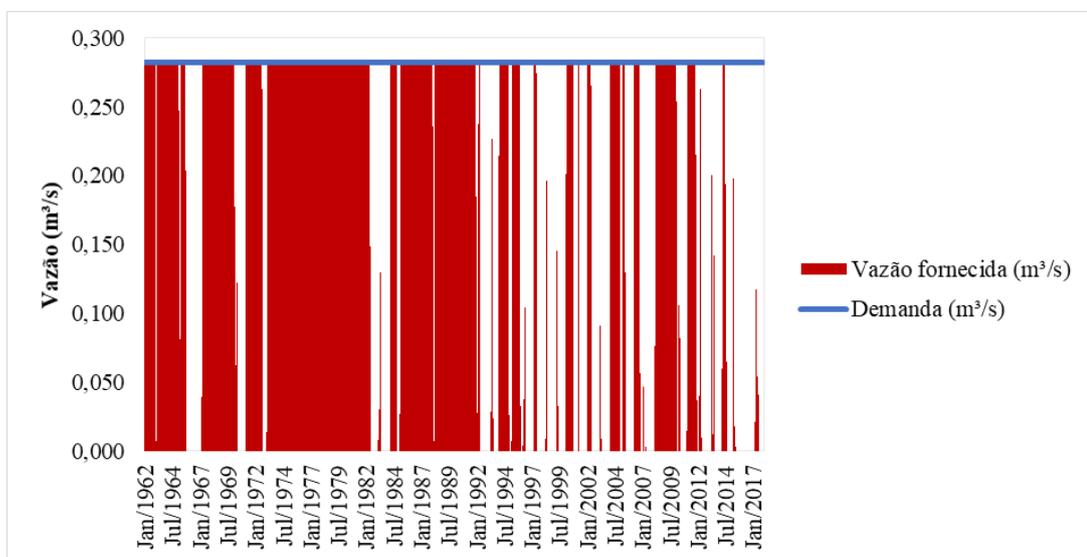
Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm <sup>3</sup> )	Vazão média fornecida (m <sup>3</sup> /s)	Vazão média fornecida (% da demanda média necessária)
Abast. Humano	2	0,45	1,309	0,179	99,59
Dess. Animal	2	0,45	0,047	0,006	99,55
Indústria	2	0,74	0,683	0,052	99,26
Irrig. Concentr.	3	0,89	17,631	1,269	99,22
Irrigação Difusa	4	1,19	15,836	0,808	98,90

Fonte: Elaborado pela autora.

As falhas no reservatório Bartolomeu I são idênticas às do Cenário Tendencial e podem ser vistas na Figura 29, que apresenta as falhas para a irrigação difusa e possui comportamento muito similar ao atendimento das demais demandas.

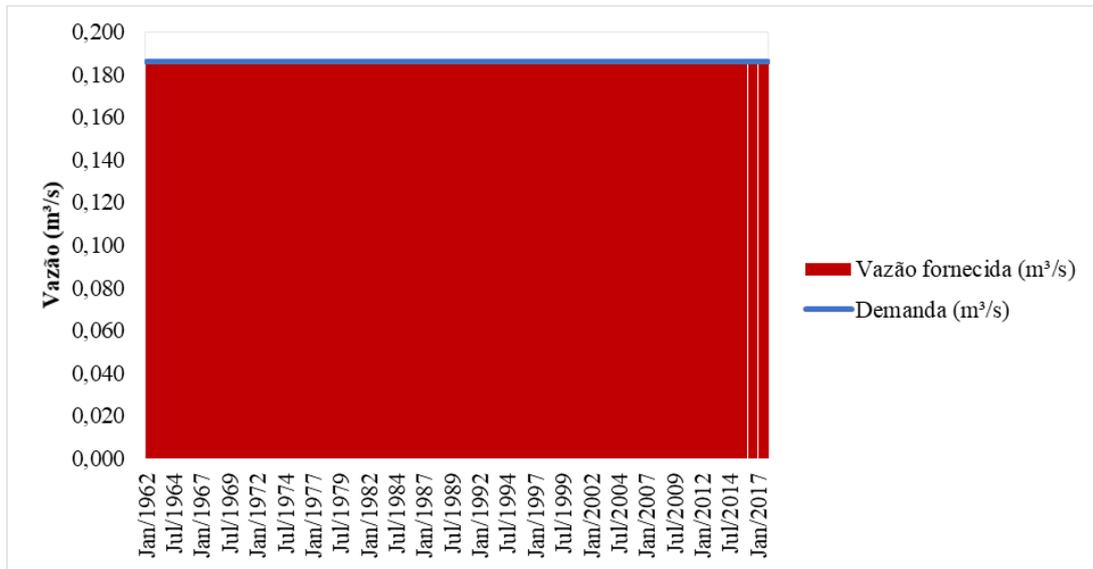
Para o reservatório Engenheiro Ávidos, o atendimento ao abastecimento humano é visto na Figura 30, que agora demonstra falhas que não existiam nos cenários anteriores. Todos os fornecimentos de vazão nos açudes Engenheiro Ávidos e São Gonçalo apresentam comportamento semelhante ao da Figura 30, já que todos possuem pequenas falhas.

Figura 29 - Atendimento à irrigação difusa no Bartolomeu I no Cenário Crítico – 2022



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 30 - Atendimento ao abastecimento humano no Engenheiro Ávidos no Cenário Crítico - 2022



Fonte: Elaborado pela autora.

#### 5.3.4. Simulação do Cenário Tendencial – 2032

Este Cenário Tendencial admite as demandas projetadas pelo PRH-PPA para 2032, as afluições para os 56 anos e a vazão adicional do PISF a montante do açude Engenheiro Ávidos.

O resumo do comportamento dos reservatórios estratégicos da UPH Alto Piranhas está contido na Tabela 29 e os volumes finais atingidos ao longo da simulação podem ser vistos através das Figuras 31, 32 e 33.

Tabela 29 - Resumo do comportamento dos reservatórios para o Cenário Tendencial - 2032

Reservatórios	Tempo máximo abaixo do volume meta (meses)	Frequência abaixo do volume meta (%)	Tempo máximo de esvaziamento (meses)	Frequência de esvaziamento (%)
Bartolomeu I	225	98,07	53	54,91
Engenheiro Ávidos	79	85,12	0	0,00
São Gonçalo	34	80,51	22	42,86

Fonte: Elaborado pela autora.

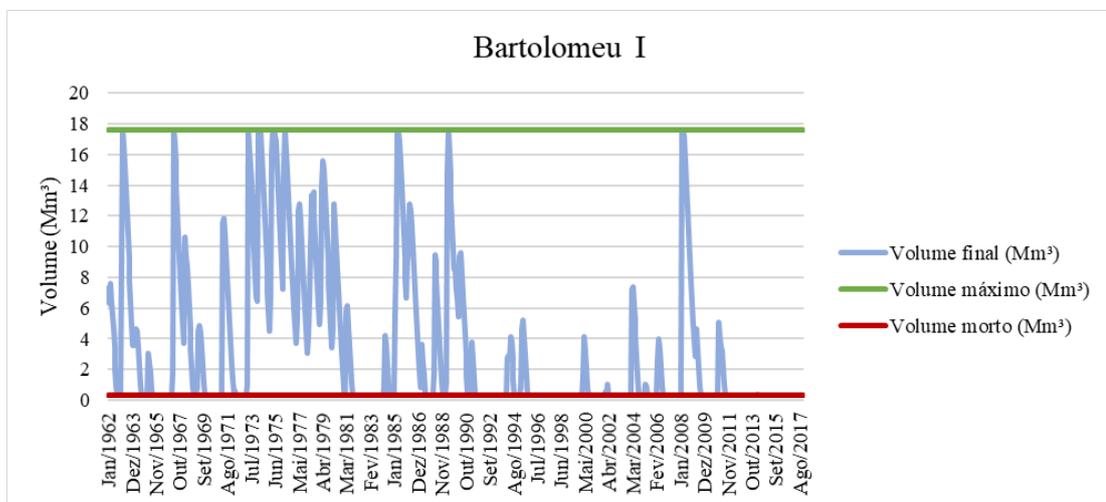
Foram analisados os comportamentos de cada um dos reservatórios durante a simulação e, a partir dos resultados para os volumes finais, observou-se que o açude Bartolomeu I, para

um total de 0,436 m<sup>3</sup>/s de retirada, atinge o volume morto em 54,91% do tempo. Essa é a situação mais insustentável e crítica de todos os cenários para o reservatório Bartolomeu I. O tempo máximo de esvaziamento é de 53 meses, equivalente a um período de mais de quatro anos consecutivos operando no volume mínimo. Em agosto de 2011, o reservatório atinge esse volume, possui um breve alívio em abril de 2014 e retorna ao seu estado mais crítico no mês seguinte, permanecendo com 351.000 m<sup>3</sup> até o final da simulação.

O açude Engenheiro Ávidos, com vazão de retirada total igual a 0,464 m<sup>3</sup>/s, atinge seus valores mais baixos, em torno de 30% do seu volume máximo, já em 2014, imerso no período da mais recente crise hídrica, e finaliza a simulação ainda com 31,78% da sua capacidade, ainda superior aos 19,27% em que se encontra atualmente (AESAs, 2019), apesar das suas demandas elevadas, devido ao alívio proporcionado pelo PISF. Além disso, o açude não atinge o volume morto em momento algum.

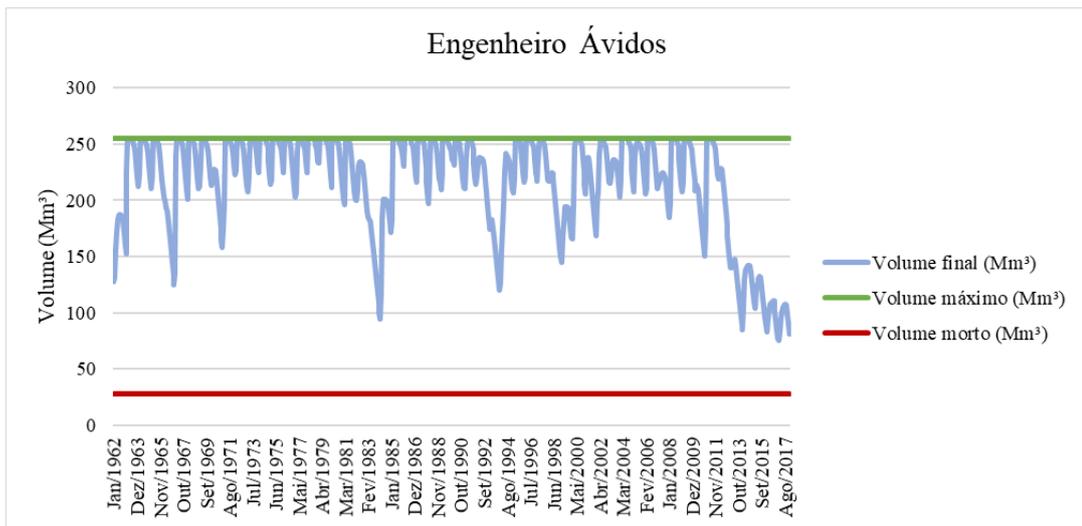
O reservatório São Gonçalo, com a demanda total de 4,517 m<sup>3</sup>/s atinge o volume mínimo durante 288 dos 672 meses de simulação, ou seja, 42,86% do tempo. Permanece por um tempo máximo de quase dois anos no volume morto, entre 2012 e 2014, e opera no volume morto nos quatro meses finais da simulação. O longo período consecutivo em que o reservatório se encontra no volume morto exige atenção dos gestores, pois alguma ineficiência na operação pode comprometer o desempenho do reservatório.

Figura 31 - Comportamento do reservatório Bartolomeu I no Cenário Tendencial – 2032



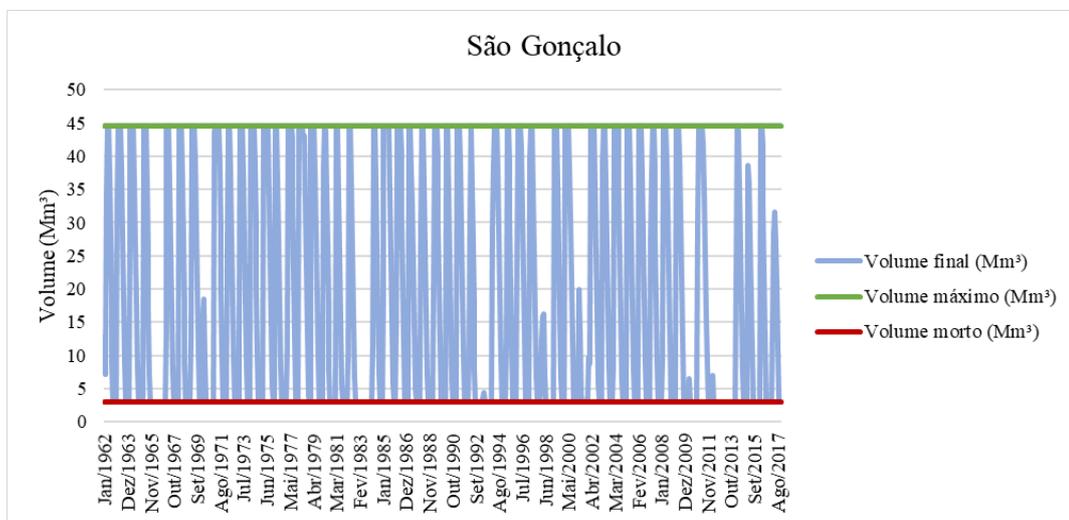
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 32 - Comportamento do reservatório Engenheiro Ávidos no Cenário Tendencial – 2032



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 33 - Comportamento do reservatório São Gonçalo no Cenário Tendencial – 2032



Fonte: Elaborado pela autora.

Nesse cenário, as falhas no abastecimento humano no açude Bartolomeu I já ultrapassam 40% e se aproximam desse valor para a dessedentação animal, que são os usos prioritários no reservatório (Tabela 30). A performance do reservatório no atendimento, como um todo, apresenta valores extremamente preocupantes, de forma que este se apresenta insustentável diante de suas demandas. Isso evidencia a necessidade de restrições de uso no reservatório ou outras medidas de gerenciamento. Caso seja necessário, deve ser analisada a viabilidade de ações para aumentar sua disponibilidade hídrica.

Os açudes Engenheiro Ávidos e São Gonçalo conseguem, novamente, atender suas demandas com a contribuição de vazão do PISF (Tabelas 31 e 32). Ainda assim, o longo período em que o açude São Gonçalo permanece no volume morto, além de terminar a simulação nele, é um fator de alerta para os gestores, pois revela que, caso a seca vigente se prolongasse, o reservatório poderia entrar em colapso.

Tabela 30 - Resumo do atendimento às demandas do Bartolomeu I no Cenário Tendencial - 2032

Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm <sup>3</sup> )	Vazão média fornecida (m <sup>3</sup> /s)	Vazão média fornecida (% da demanda média necessária)
Abast. Humano	22	40,92	20,062	0,018	60,83
Dess. Animal	17	37,50	7,550	0,008	64,37
Irrigação Difusa	53	54,61	348,622	0,197	49,90
Aquicultura	22	41,22	0,728	0,001	58,78

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 31 - Resumo do atendimento às demandas do Engenheiro Ávidos no Cenário Tendencial - 2032

Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm <sup>3</sup> )	Vazão média fornecida (m <sup>3</sup> /s)	Vazão média fornecida (% da demanda média necessária)
Abast. Humano	0	0	0	0,192	100
Dess. Animal	0	0	0	0,035	100
Indústria	0	0	0	0,042	100
Irrig. Concentr.	0	0	0	0,072	100
Irrigação Difusa	0	0	0	0,123	100

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 32 - Resumo do atendimento às demandas do São Gonçalo no Cenário Tendencial - 2032

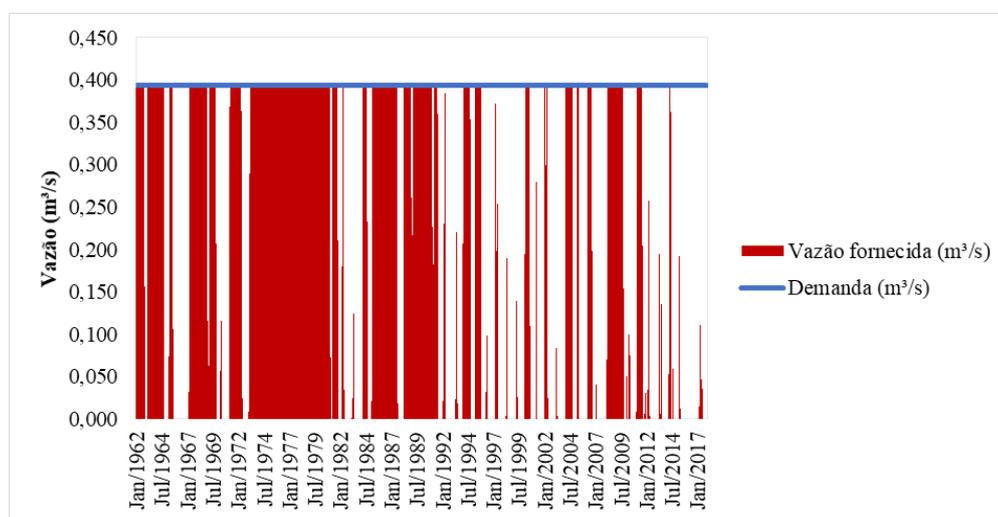
Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm <sup>3</sup> )	Vazão média fornecida (m <sup>3</sup> /s)	Vazão média fornecida (% da demanda média necessária)
Abast. Humano	0	0	0	0,186	100
Dess. Animal	0	0	0	0,009	100
Indústria	0	0	0	0,074	100
Irrig. Concentr.	0	0	0	1,650	100
Irrigação Difusa	0	0	0	1,142	100

Fonte: Elaborado pela autora.

Nota-se, através da Figura 34, que o atendimento em Bartolomeu I apresenta cada vez mais déficits, exibindo o mesmo comportamento quanto aos períodos em que ocorrem falhas com relação aos cenários anteriores, entretanto, atendendo de forma cada vez mais precária devido ao aumento das demandas adotadas nas simulações, conforme esperado. As demais demandas de Bartolomeu I têm performance de atendimento semelhante.

Como não há falhas no atendimento às demandas nos açudes Engenheiro Ávidos e São Gonçalo, o comportamento para todos os meses de simulação é idêntico, em que todas as vazões fornecidas atingem as demandas em todo o período, denotando o atendimento satisfatório.

Figura 34 - Atendimento à irrigação difusa no Bartolomeu I no Cenário Tendencial - 2032



Fonte: Elaborado pela autora.

### 5.3.5. Simulação do Cenário Ótimo – 2032

Para este cenário, foram admitidas as mesmas condições do Cenário Tendencial para 2032, exceto quanto às demandas do açude Bartolomeu I, que admite a vazão de 0,034 m<sup>3</sup>/s.

O comportamento dos reservatórios estratégicos no Cenário Ótimo é resumido na Tabela 33. Os volumes finais resultantes das simulações podem ser vistos nas Figuras 35, 36 e 37, para cada açude.

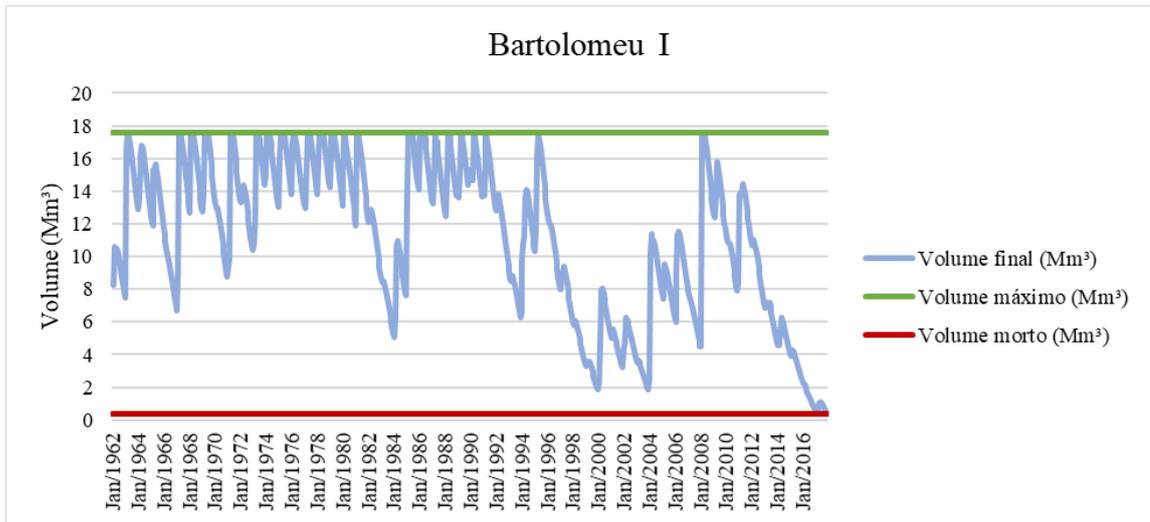
Tabela 33 - Resumo do comportamento dos reservatórios para o Cenário Ótimo - 2032

Reservatórios	Tempo máximo abaixo do volume meta (meses)	Frequência abaixo do volume meta (%)	Tempo máximo de esvaziamento (meses)	Frequência de esvaziamento (%)
Bartolomeu I	202	92,26	0	0,00
Engenheiro Ávidos	79	84,67	0	0,00
São Gonçalo	34	80,36	22	42,86

Fonte: Elaborado pela autora.

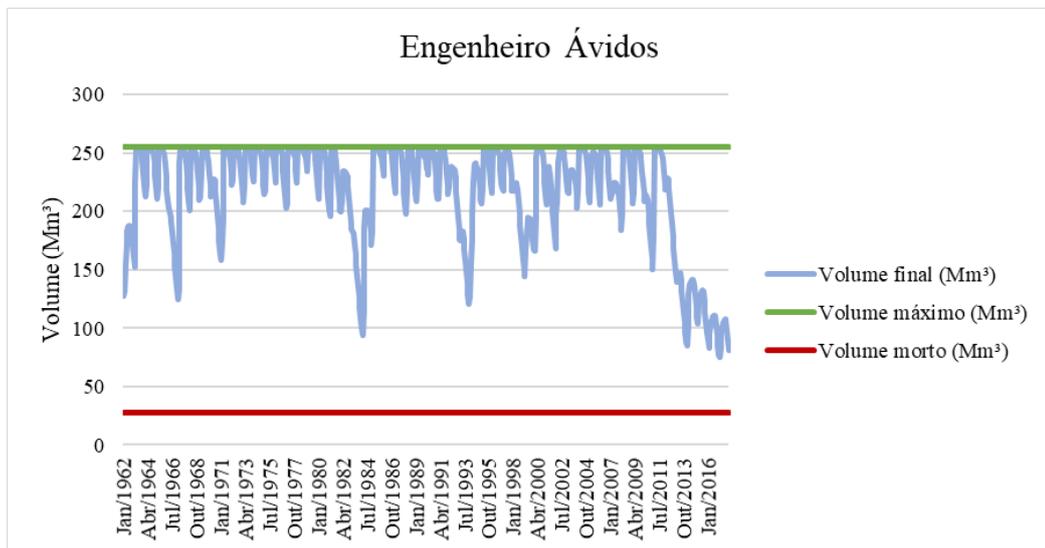
A partir dos resultados dos volumes finais, foi observado que os comportamentos dos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo foram praticamente idênticos ao do cenário anterior. Bartolomeu I, entretanto, que antes apresentava uma frequência de esvaziamento superior a 50%, agora não apresenta falhas em intervalo de tempo algum e atinge um volume igual a 363.000 m<sup>3</sup>, bastante próximo do volume morto, somente ao final da simulação.

Figura 35 - Comportamento do reservatório Bartolomeu I no Cenário Ótimo - 2032



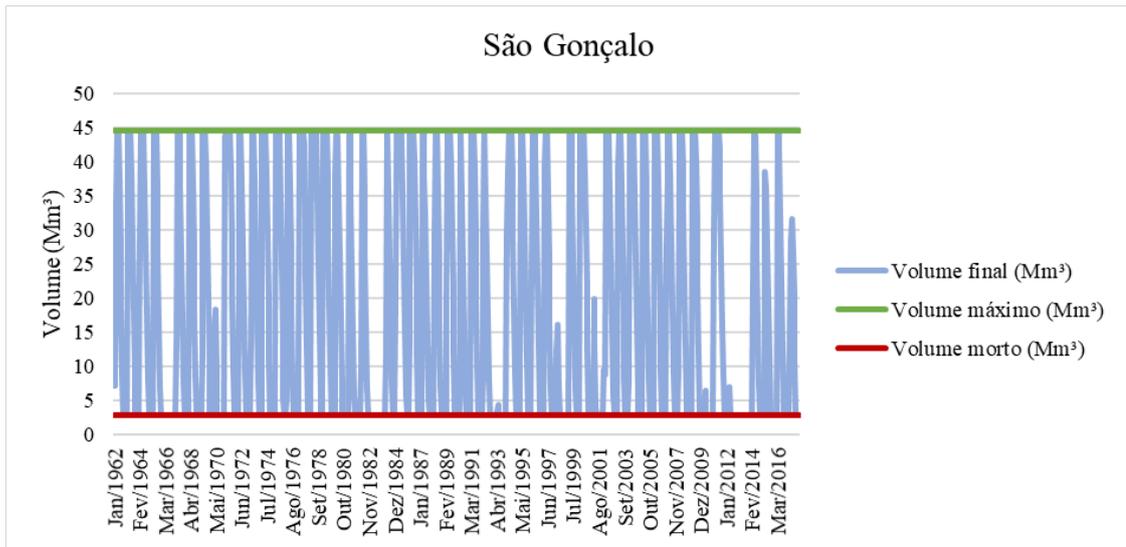
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 36 - Comportamento do reservatório Engenheiro Ávidos no Cenário Ótimo - 2032



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 37 - Comportamento do reservatório São Gonçalo no Cenário Ótimo - 2032



Fonte: Elaborado pela autora.

No atendimento às suas demandas, o reservatório Bartolomeu I não apresenta falhas durante a simulação e os açudes Engenheiro Ávidos e São Gonçalo, que já não apresentavam falhas anteriormente, se comportam de forma idêntica quanto ao atendimento de suas demandas, sendo este um cenário ideal para que todos os reservatórios funcionem plenamente. Os resumos dos atendimentos para cada reservatório estão contidos nas Tabelas 34 a 36 a seguir.

Tabela 34 - Resumo do atendimento às demandas do Bartolomeu I no Cenário Ótimo – 2032

Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm <sup>3</sup> )	Vazão média fornecida (m <sup>3</sup> /s)	Vazão média fornecida (% da demanda média necessária)
Total	0	0	0	0,034	100

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 35 - Resumo do atendimento às demandas do Engenheiro Ávidos no Cenário Ótimo – 2032

Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm <sup>3</sup> )	Vazão média fornecida (m <sup>3</sup> /s)	Vazão média fornecida (% da demanda média necessária)
Abast. Humano	0	0	0	0,192	100
Dess. Animal	0	0	0	0,035	100
Indústria	0	0	0	0,042	100
Irrig. Concentr.	0	0	0	0,072	100
Irrigação Difusa	0	0	0	0,123	100

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 36 - Resumo do atendimento às demandas do São Gonçalo no Cenário Ótimo – 2032

Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm <sup>3</sup> )	Vazão média fornecida (m <sup>3</sup> /s)	Vazão média fornecida (% da demanda média necessária)
Abast. Humano	0	0	0	0,186	100
Dess. Animal	0	0	0	0,009	100
Indústria	0	0	0	0,074	100
Irrig. Concentr.	0	0	0	1,650	100
Irrigação Difusa	0	0	0	1,142	100

Fonte: Elaborado pela autora.

É importante frisar que a demanda do açude Bartolomeu I foi simulada de forma consolidada, ou seja, como uma única demanda, com a finalidade de encontrar qual a retirada máxima que o reservatório poderia atender sem apresentar falhas, sem considerar a otimização de acordo com a ordem de prioridades, cabendo aos gestores definir qual seria a melhor alocação para os diversos usos da água de acordo com a necessidade local.

O atendimento pleno às demandas em todos os reservatórios no Cenário Ótimo constitui um comportamento único representativo para todo o período de simulação, em que as vazões fornecidas alcançam as vazões demandadas.

#### 5.4. Análise integrada dos resultados

Um dos resultados mais evidentes extraídos das anomalias de chuva foi a predominância de anomalias negativas a partir da década de 90 (Figura 16, item 5.1). Esse resultado pode ser associado ao aumento da frequência das falhas nos atendimentos nos diversos cenários simulados no AcquaNet, a exemplo do atendimento à irrigação difusa no açude Bartolomeu I, já no primeiro cenário (Figura 20, item 5.3.1). Nota-se, também, em especial nos açudes Bartolomeu I e Engenheiro Ávidos, que, a partir de 2012, os volumes finais dos reservatórios decrescem até o término das simulações, com valores extremamente inferiores a partir deste ano em comparação com os outros anos desde o Cenário Atual (Figuras 17 e 18, item 5.3.1). Esses decréscimos são atribuídos ao período mais longo de anomalias negativas consecutivas identificado na série histórica de estudo, associado à seca vigente, iniciada em 2012.

As vazões regularizadas também podem ser associadas aos cenários simulados no AcquaNet. O açude Bartolomeu I apresenta uma demanda de 0,27 m<sup>3</sup>/s já no Cenário Atual. Segundo o AcquaNet, este só seria capaz de atender uma demanda total de 0,034 m<sup>3</sup>/s. Através da planilha de simulação, foi encontrado um valor de 0,054 m<sup>3</sup>/s para o atendimento sem falhas (Q<sub>100</sub>), ligeiramente superior por usar uma metodologia diferente. Entretanto, até mesmo esse valor é bastante inferior ao requerido pelo reservatório nos quatro primeiros cenários (Tabela 11, item 4.5.2.5) e, por isso, o açude Bartolomeu I é incapaz de satisfazer suas demandas.

Os açudes integrados Engenheiro Ávidos e São Gonçalo, por sua vez, regularizam juntos uma vazão total com 100% de garantia igual a 1,874 m<sup>3</sup>/s. No Cenário Atual, todas as demandas somadas, excetuando-se as demandas de irrigação difusa, totalizam 1,597 m<sup>3</sup>/s, inferior à capacidade de regularização dos reservatórios integrados. Dessa forma, ambos são capazes de atender tais demandas plenamente para este cenário, ficando comprometido apenas o atendimento à irrigação difusa (Tabelas 19 e 20, item 5.3.1), que possui valores elevados e prioridade baixa e que, quando somada ao total das demandas, integra mais de 3 m<sup>3</sup>/s, muito superior à capacidade de regularização dos reservatórios. Para o Cenário Crítico de 2022, as demandas dos dois reservatórios somadas já totalizam 3,641 m<sup>3</sup>/s, bem superior à capacidade de regularização dos reservatórios integrados. Dessa forma, os açudes Engenheiro Ávidos e São Gonçalo falham em atender todas as suas demandas. Quanto aos demais cenários, em alguns deles as demandas totais já chegam a superar 4 m<sup>3</sup>/s nos dois reservatórios juntos, sendo que o atendimento só é plenamente satisfeito devido à contribuição das águas advindas do PISF.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho desenvolveu uma análise da sustentabilidade hídrica dos reservatórios estratégicos do Alto Piranhas e teve seu objetivo geral atingido.

Inicialmente, foi realizada a análise da anomalia de chuvas, na qual se pôde identificar os períodos de baixos índices pluviométricos na série histórica, que coincidiram com os históricos de seca na região semiárida, auxiliando na compreensão do comportamento dos açudes ao longo das simulações.

Depois, foram calculadas as vazões regularizadas de 100%, 99% e 90% de garantia para cada um dos reservatórios, capazes de nortear a decisão dos gestores quanto à capacidade de atendimento do sistema. Estas, quando comparadas a outros estudos de referência, possuíram valores bastante próximos, em geral, com diferenças remetidas às metodologias adotadas em cada estudo e aos dados utilizados.

Através das simulações no AcquaNet, foi possível observar que o reservatório Bartolomeu I se mostrou insustentável para os quatro primeiros cenários simulados (Tabela 11, item 4.5.2.5), atingindo altos percentuais de esvaziamento e de falhas no atendimento às suas demandas. A cada cenário, sua situação tornou-se mais alarmante diante do aumento das demandas, já que este não é beneficiado pelas vazões adicionais do PISF. Apenas no quinto e último cenário (Cenário Ótimo), que foi simulado com o propósito de fornecer a este uma condição favorável, foi que Bartolomeu I conseguiu operar sem apresentar falhas, com uma retirada única de  $0,034 \text{ m}^3/\text{s}$ . A insustentabilidade do açude é justificada para os demais cenários porque, já no Cenário Atual, com as demandas mais baixas previstas pelo PRH-PPA, o somatório total das demandas possui o valor de  $0,27 \text{ m}^3/\text{s}$ , muito superior aos  $0,034 \text{ m}^3/\text{s}$ , e, portanto, Bartolomeu I já é incapaz de satisfazê-las. Mesmo a vazão regularizada com 100% de garantia, igual a  $0,054 \text{ m}^3/\text{s}$ , encontrada através da Planilha de Simulação da Operação de Reservatórios não seria suficiente para suprir essas retiradas.

O açude Engenheiro Ávidos, por sua vez, embora apresente poucas falhas no Cenário Atual, finaliza a simulação com um volume muito próximo ao volume morto. No Cenário Crítico, em que as demandas são maiores e não há presença do PISF, o reservatório já começa a apresentar falhas no atendimento a todas as suas demandas, além de finalizar a simulação no volume morto. Quando beneficiado pelo PISF, sua disponibilidade hídrica sofre um impacto

bastante positivo e opera com conforto hídrico até para as demandas mais elevadas.

O reservatório São Gonçalo, ainda que exiba percentuais baixos de falha ou nenhuma falha no atendimento para todos os cenários, atinge o volume morto por períodos consecutivos sempre superiores a um ano ao longo das simulações. Assim como Engenheiro Ávidos, também apresenta falhas no Cenário Crítico no atendimento a todas as suas demandas, já que não conta com o PISF. Nos cenários em que o PISF é considerado, é beneficiado pelo grande impacto que a transposição tem na disponibilidade hídrica de Engenheiro Ávidos, já que estes operam de forma integrada, demonstrando maior conforto quando a transposição está presente.

Dessa forma, fica explícita a necessidade de atenção dos gestores quanto à operação de Bartolomeu I, no qual devem ser aplicadas restrições de uso, aumento da disponibilidade hídrica ou outras medidas de gerenciamento, conforme a viabilidade. Para Engenheiro Ávidos e São Gonçalo, evidencia-se a importância da transposição das águas do Rio São Francisco, chamando a atenção para a urgência da conclusão dessa obra, especialmente devido à importância dos reservatórios para os municípios abastecidos, que traria grandes benefícios sociais e econômicos para o sistema ao reduzir os problemas ocasionados pela seca. Também é identificada a necessidade de uma gestão eficiente nesses dois últimos reservatórios pelo estado recorrente de esvaziamento de São Gonçalo e pela sua forte dependência de Engenheiro Ávidos.

Apesar deste trabalho ter atingido seu objetivo, destaca-se a dificuldade na obtenção dos seus dados, que, muitas vezes, estão incompletos ou até mesmo indisponíveis, além de serem apenas uma aproximação da realidade. Recomenda-se, junto a uma gestão mais eficiente nesses reservatórios, um monitoramento das vazões e evaporações realizado com mais precisão para que seja possível obter dados mais confiáveis, visto que estudos como esse são realizados com o propósito de fornecer subsídios para os gestores, para que suas decisões sejam tomadas de forma mais assertiva, sendo fundamental para regiões do semiárido que sofrem com o agravamento da escassez hídrica.

Por fim, sugere-se a aplicação dos Indicadores de Sustentabilidade (HASHIMOTO *et al.*, 1982) em pesquisas futuras, que permitem uma avaliação dos efeitos de cada cenário adotado, pois conferem o “risco” a que o sistema está submetido, propiciando a adoção de políticas mais seguras para o gerenciamento da operação dos reservatórios (CASTRO e MEDEIROS, 2016). Sugere-se, também, a exploração de outros módulos do AcquaNet, como as Curvas de Aversão ao Risco, que permitem propor regras de operação com diferentes retiradas, simulando os reservatórios para um horizonte desejado (PORTO *et al.*, 2005).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, M.B.; BATHURST, J.C.; CUNGE, J.A.; O'CONNELL, P.E.; RASMUSSEN, J. **An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, “SHE”, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system.** In: Journal of Hydrology, v. 87, Issues 1–2, 15 October 1986, Pages 45-59.

AESA. Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. **Últimos volumes informados dos açudes.** 2019. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/>>. Acesso em: 06 set. 2019.

AESA. Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente - SECTMA. Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba - AESA. **PERH-PB: Plano Estadual de Recursos Hídricos.** 2006. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/documentos/plano-estadual/resumo-estendido/>>. Acesso em: 13 jul. 2019.

AESA. Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente – SECTMA. Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba - AESA. **Gestão de recursos hídricos no Estado da Paraíba.** João Pessoa, 2007, 5p.

ALBANO, G. D. **Integração de um modelo matemático de quantidade de água em rede de fluxo (AcquaNet) com um modelo matemático de qualidade de água em represas (CE-QUAL-R1) – estudo de caso: Represa Jaguari-Jacareí – Sistema Cantareira.** ed. rev. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica). São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004, 230p.

ALMEIDA, C. N. **Personalização de planilhas Excel® para programação de modelos – O caso da simulação da operação de reservatórios.** In: VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2006.

ANA. Agência Nacional de Águas (Brasil). **Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu: Resumo executivo.** Agência Nacional de Águas – Brasília: ANA, 2016.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Manual de usos consuntivos da água no Brasil.** Brasília: ANA, 2019. 75p.

ANA. Agência Nacional de Águas. Ministério do Meio Ambiente. **Volume I: Proposta de instituição do comitê da bacia hidrográfica do rio piranhas-açu, conforme resolução nº 05, de 10 de abril de 2000, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos.** Brasil, 2005, 227p.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Reservatórios do semiárido brasileiro: Hidrologia, balanço hídrico e operação.** Anexo B. Brasília, DF. 2017a.

ANA. Agência Nacional de Recursos Hídricos. **O que é SINGREH?** 2017b. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/>>. Acesso em: 16 ago. 2019.

ANA. Agência Nacional de Recursos Hídricos. **Política Nacional de Recursos Hídricos.** 2018. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/>>. Acesso em: 16 ago. 2019.

ANA/GEF/PNUMA/OEA - **Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em terra na Bacia do São Francisco** - Subprojeto 4.5C – Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco - PBHSF (2004-2013) - Estudo técnico de apoio ao PBHSF – Nº 16 - Alocação de Água, 2004.

ARAGÃO, T. G. **Transposição das águas do rio São Francisco para a bacia do rio Paraíba: uma avaliação da sinergia e sustentabilidade hídrica utilizando o modelo de rede de fluxo AcquaNet.** 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

AZEVEDO, H. Portal Correio. **Sertão da PB só terá água da transposição pelo eixo norte em 2021.** 31 jul. 2019. Disponível em: <<https://portalcorreio.com.br/sertao-da-pb-so-tera-agua-da-transposicao-pelo-eixo-norte-em-2021/>>. Acesso em: 16 ago. 2019.

BACALHAU, J. R. **Simulação da Disponibilidade Hídrica e Operação de Reservatórios de Abastecimento em Relação à Variabilidade Climática: Bacia do Rio Pirapama em Pernambuco.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2015, 164p.

BARBOSA, D. L. **A exploração de um sistema de reservatórios: uma análise otimizada dos usos e objetivos múltiplos na bacia do Rio Capibaribe-PE.** Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2008.

BEVEN, K.J.; KIRKBY, M.J. **A physically based, variable contributing area model of basin hydrology.** Hydrol. Sci. Bull., 24:43-69, 1979.

- BRASIL. **Decreto-Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997**. Brasília – DF, 1997.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos, 2011. **Plano Nacional de Recursos Hídricos - Prioridades 2012-2015**. Brasília, MMA, 120p. 2011.
- CARRIJO, I. B.; REIS, L. F. R. **Extração de estratégias operacionais de sistemas de distribuição de água utilizando algoritmos genéticos multiobjetivo e aprendizado de máquina – aplicação ao sistema de macro-distribuição de água de Goiânia**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH), v. 11, n.2, p. 161-172, 2006.
- CARVALHO, M. A.; MÉLLO JÚNIOR, A. V.; SCHARDONG, A.; PORTO, R. L. L. **Sistema de suporte à decisão para alocação de água em projetos de irrigação**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, n.1, p.10-17, Campina Grande, 2009.
- CASTANHARO, G.; GIBERTONI, R. F. C.; MÜLLER, I. I.; ANDRIOLO, M. V.; KAVISKI, E.; GUILHON, L. G. F.; ROCHA, V. F. **Previsão de vazões na bacia do rio Iguaçu baseada no modelo SMAP e com incorporação de informações de precipitação**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 12, 57 - 68. DOI: 10.21168/rbrh.v12n3.p57-68, 2007.
- CASTRO, M. H. F. M.; MEDEIROS; J. D. F. **Sustentabilidade hídrica para o abastecimento humano do município de Pau dos Ferros-RN**. In: Anais do XIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Aracaju. ABRH, 2016.
- CBH-PPA. Comitê da Bacia Hidrográfica Piancó-Piranhas-Açu. **A bacia**. 2008. Disponível em: <<http://www.cbhpiancopiranhasacu.org.br/portal/a-bacia/>>. Acesso em: 26 ago. 2019.
- CEPED. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. **1583/2012: Histórico de Secas no Nordeste do Brasil**. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2015. Disponível em: <<http://www.ceped.ufsc.br/historico-de-secas-no-nordeste-do-brasil/>>. Acesso em: 02 set. 2019.
- CIRILO, J. A. **Crise hídrica: desafios e superação**. Revista USP. São Paulo. n. 106. p. 45-58. 2015.
- DEVI, K. G.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. **A review on hydrological models**. International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering – ICWRCOE, India, 2015.

DNOCS. Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. **Açude Piranhas**. Barragem Engenheiro Ávidos. 2003. Disponível em: < <https://www.dnocs.gov.br/>>. Acesso em: 30 ago. 2019.

FARIAS, E. E. V.; CURI, W. F.; DINIZ, L. S. **São Francisco river Integration Project, Eastern Axis: losses analysis and performance indicators**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH), v. 22, e47, Porto Alegre, 2017.

FARIAS, S. R. A. **Operação integrada dos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande – PB, 2004.

FARO, G. T. C.; GARCIA, J. I. B. **Simulação dos critérios operacionais do Sistema Cantareira para avaliação do programa AcquaNet na modelagem de problemas complexos de alocação de água**. In: Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis. ABRH, 2017.

FREITAS, M. A. S. **Que venha a seca: Modelos para gestão de recursos hídricos em regiões semiáridas**. 1ª ed. Rio de Janeiro: CBJE, 2010. 416p.

GARCIA, J. I. B. **Sistema de suporte a decisão para o lançamento de efluentes**. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica). São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011, 162p.

HASHIMOTO, T.; STENDINGER, J. R.; LOUCKS, D. P. **Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation**. Water Resources. Res., v.18, n.1, p.14- 20, 1982.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE Cidades**. 2019. Disponível em: <<https://ww2.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 30 ago. 2019.

LABADIE, J. W. **MODSIM: Decision Support System for Integrated River Basin Management**. International Congress on Environmental Modelling and Software. 242, 2006.

LABADIE, J. W. **MODSIM: River basin network flow model for conjunctive stream-aquifer management**. Fort Collins: Department of Civil Engineering, Colorado State University, 1988. 55p.

LABSID. **LabSid AcquaNet 2013**. Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões, 2013. Disponível em: < <http://www.labsid.eng.br/software.aspx?id=14>>. Acesso em: 18 jul. 2019.

- LOPES, A. V.; FREITAS, M. A. S. **A alocação de água como instrumento de gestão de recursos hídricos: experiências brasileiras.** Revista de Gestão de Água da América Latina. v. 4, n. 1, pp. 5-28., 2007.
- LOPES, J. E. G. **Modelo SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure) – PHA: Manual.** 1999. Disponível em: <<http://pha.poli.usp.br/>>. Acesso em: 26 de ago. 2019.
- LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. F. P.; CONEJO J. G. L. **SMAP - A Simplified Hydrological Model.** In: International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling. 1981. Mississippi State University, Mississippi – USA.
- LOUCKS, D. P.; BEEK, V. E. **Water Resources systems planning and management: an introduction to methods, models and applications.** Paris: UNESCO, 2005.
- LUCENA, D. P. M. M. **Simulações da implantação de ações de gestão no Açude Epitácio Pessoa e seus impactos na crise hídrica em Campina Grande-PB e região.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Área de concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Campina Grande – PB, 2018.
- MARENGO, J. A.; CUNHA; A. P. M.; ALVES; L. M. **A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico.** Inpe. Revista Climanalise, 2016. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/revista/>>. Acesso em: 29 ago. 2018.
- MEDEIROS, P. C.; SOUZA, F. A. S.; RIBEIRO, M. M. R. **Aspectos conceituais sobre o regime hidrológico para a definição do hidrograma ambiental.** Ambi-Agua. Taubaté, v. 6, n. 1, p. 131-147, 2011.
- MORADKHANI, H.; SOROOSHIAN, S. **General review of rainfall-runoff modeling: model calibration, data assimilation, and uncertainty analysis.** Hydrological modeling and the water cycle. Springer. 291 p. ISBN 978-3-540-77842-4, 2009.
- MOREIRA, A. A. **Análise da seca/estiagem no norte do estado de Minas Gerais a partir de dados MODIS.** Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016, 124p.
- NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R.; KING, K.W. **Soil and water assessment tool: Theoretical documentation. Version 2000.** Blackland Research and Extension Center, Temple, Texas, 2002, 506p.

PARAÍBA. **Lei nº 6.308, de 02 de julho de 1996.** Institui a Política Estadual de Recursos Hídricos, suas diretrizes e dá outras providências. Paraíba, PB, 1996.

PARAÍBA. **Lei nº 7.779, de 07 de julho de 2005.** Cria a Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba – AESA e dá outras providências. Paraíba, PB, 2005.

PORTO, R. L. L.; MÉLLO JUNIOR, A.V., ROBERTO, A. N. **Construção de curvas de aversão ao risco utilizando o SSD AcquaNet.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. João Pessoa - PB, 2005. ABRH.

PORTO, R. L. L.; ROBERTO, A. N.; SCHARDONG, A.; MÉLLO JUNIOR, A. V. **Sistema de suporte a decisão para análise de sistemas de recursos hídricos.** In: SILVA, R. C. V. Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 6. Porto Alegre – RS. ABRH/UFRGS, 2003, cap. 2, p. 93-240.

RENNÓ, D. C.; SOARES, J. V. **Modelos hidrológicos para gestão ambiental.** Relatório Técnico Parcial “Métodos, modelos e geoinformação para a gestão ambiental”. Brasília: MCTI; INPE, 2000. Disponível em: <[http://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio\\_modelos\\_hidrologicos.pdf](http://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio_modelos_hidrologicos.pdf)>. Acesso em: 11 ago. 2019.

ROA-GARCÍA, M. C. **Equity, efficiency and sustainability in water allocation in the Andes: Trade-offs in a full world.** Water Alternatives, v. 7, n. 2, p. 298-31, 2014.

SABESP. **Revisão e Atualização do Plano Diretor de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de São Paulo – RMSP.** 2015.

SANTOS, L. L. **Modelos hidráulico-hidrológicos: Conceitos e aplicações.** RBGF - Revista Brasileira de Geografia Física Recife-PE, Vol.2, n.03, set-dez, 2009, 01-19.

SCHARDONG, A.; MÉLLO JÚNIOR; A. V.; ROBERTO; A. N.; PORTO; R. L. L. **Desempenho do modelo AcquaNetXL na alocação de água em sistemas de recursos hídricos complexos.** Revista Eng. Agríc., Jaboticabal, v.29, n.4, p.705-715, out./dez. 2009.

SCIENTEC. Associação para Desenvolvimento da Ciência e Tecnologia. **Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba: Bacias do Rio Piancó e do Alto Piranhas.** Governo do Estado da Paraíba; Secretaria do Planejamento, SEPLAN. João Pessoa, 1997.

SILVA, G. S.; SILVA, P. H. P.; SILVA, A. C. S. **Alocação e regularização de vazão no rio paraíba com as águas do projeto de integração do rio são francisco (eixo leste)**. In: Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis. ABRH, 2017a.

SILVA, S. M. O.; FILHO, F. A. S.; AQUINO, S. H. S. **Avaliação do risco da alocação de água em período de escassez hídrica: o caso do Sistema Jaguaribe–Metropolitano**. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 22, n.4, p. 749-760, 2017b.

SILVA, S. M. O.; SOUZA FILHO; F. A.; CID; D. A. C.; AQUINO; S. H. S.; XAVIER, L. C. P. **Proposta de gestão integrada das águas urbanas como estratégia de promoção da segurança hídrica: o caso de Fortaleza**. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 24, n. 2, p. 239-250, 2019.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 1998, 668p.

TUCCI, C. E. M.; CAMPANA N. **Simulação distribuída com IPH II, Nova versão**. X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Gramado. Anais, v3, p 495-504, 1993.

TUCCI, C. E. M.; ORDONEZ, J. S.; SIMÕES, L. M. **Modelo Matemático Precipitação-Vazão IPH II: Alguns Resultados**. IV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH, Anais. Fortaleza, 1981.

WMO. World Meteorological Organization. **WMO statement on the status of the global climate in 2013**. WMO, 2014. Disponível em: <[http://library.wmo.int/pmb\\_ged/wmo\\_1130\\_en.pdf](http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_1130_en.pdf)>. Acesso em: 14 jul. 2019.

## APÊNDICE A – CÁLCULO DAS VAZÕES AFLUENTES ATRAVÉS DO SMAP

Os dados diários de chuva corrigidos e homogêneos da atualização do Plano Estadual de Recursos Hídricos da Paraíba foram transformados, inicialmente, em dados mensais. O cálculo da precipitação média mensal para cada reservatório foi realizado utilizando os coeficientes de Thiessen referentes a cada um dos postos selecionados, conforme o item 4.2.1, para os seus respectivos reservatórios.

A partir dos dados de precipitação média mensal e de evaporação potencial, além de parâmetros necessários, foi possível determinar as vazões afluentes a cada um dos reservatórios para o período de simulação (1962 – 2017) fazendo uso do SMAP.

Castanharo *et al.* (2007) atribuem como principais vantagens do modelo sua simplicidade de uso e o pequeno número de parâmetros necessários.

Os dados de entrada para a utilização do SMAP-M foram a precipitação mensal em mm, as lâminas de evaporação mensal em mm, para o intervalo de tempo de 1962 a 2017, e a área de drenagem da bacia hidrográfica em km<sup>2</sup>.

Quanto aos parâmetros exigidos pelo modelo, são estes:

- Tuin – Taxa de umidade inicial do solo (%);
- Ebin – escoamento de base inicial (m<sup>3</sup>/s);
- Sat – capacidade de saturação do solo (mm);
- Pes – taxa de geração de escoamento superficial;
- Crec – Coeficiente de recarga do aquífero;
- K – taxa de depleção do nível da água do aquífero subterrâneo.

Os valores dos parâmetros utilizados foram os calibrados e validados no Plano de Recursos Hídricos do Piancó-Piranhas-Açu (ANA, 2016), que realiza a simulação da bacia do PPA para o período de 1962 a 2009 (Tabela 37).

Tabela 37 - Parâmetros do Modelo SMAP-M

Açude	Área (km <sup>2</sup> )	Parâmetros do Modelo SMAP-M					
		Sat	Pes	Crec	k	Tuin	Ebin
Bartolomeu I	58,7	539	3,9	0	3	19	0
Engenheiro Ávidos	999,7	535	3,9	0	3	19	0
São Gonçalo	1305,4	535	3,9	0	3	19	0

Fonte: ANA (2016).

O SMAP foi utilizado, também, na geração das vazões afluentes ao exutório para o período de 1962 a 2017, que, para considerações de simulação, fica localizado antes da entrada do Rio do Peixe. Como sua localização real é após essa entrada, abrangendo uma área maior e, portanto, resultando em uma vazão afluente também mais elevada, para fins de simulação, foi considerado que as vazões afluentes ao exutório representam uma proporção de 20% dos valores da vazão afluente na sua localização real.

Além disso, como os postos pluviométricos escolhidos para o cálculo das precipitações médias sobre cada reservatório foram diferentes daqueles utilizados no PRH-PPA, foi realizado um estudo comparativo entre as afluências geradas a partir dos postos selecionados neste trabalho e as vazões geradas no plano a fim de verificar a validade do uso dos parâmetros do SMAP utilizados no PRH-PPA para a geração de vazões afluentes com os novos dados de precipitação.

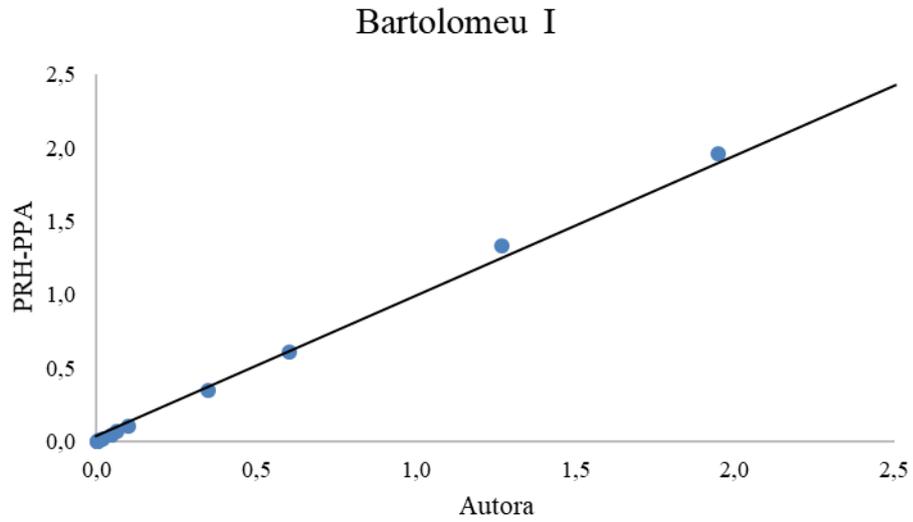
Para a avaliação da proximidade desses valores, foram calculados os coeficientes de correlação de Pearson (R) (Tabela 38) com o auxílio da ferramenta Excel para cada açude e gerados diagramas de dispersão (Figuras 38, 40 e 42), além de gráficos com as afluências médias mensais a cada reservatório (Figuras 39, 41 e 43), da autora e do plano, para o período de 1962 a 2009 (período de simulação do plano), para melhor visualização do seu comportamento ao longo do ano.

Tabela 38 - Coeficientes de correlação entre as vazões afluentes da autora e do PRH-PPA

Açude	R
Bartolomeu I	0,9997
Engenheiro Ávidos	0,9948
São Gonçalo	0,9836

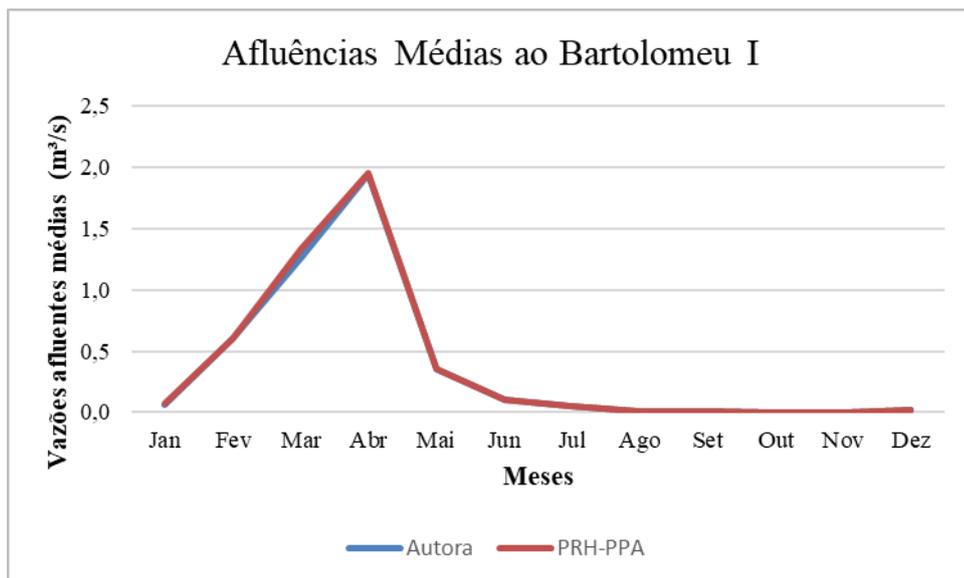
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 38 - Diagrama de dispersão das vazões afluentes para o açude Bartolomeu I



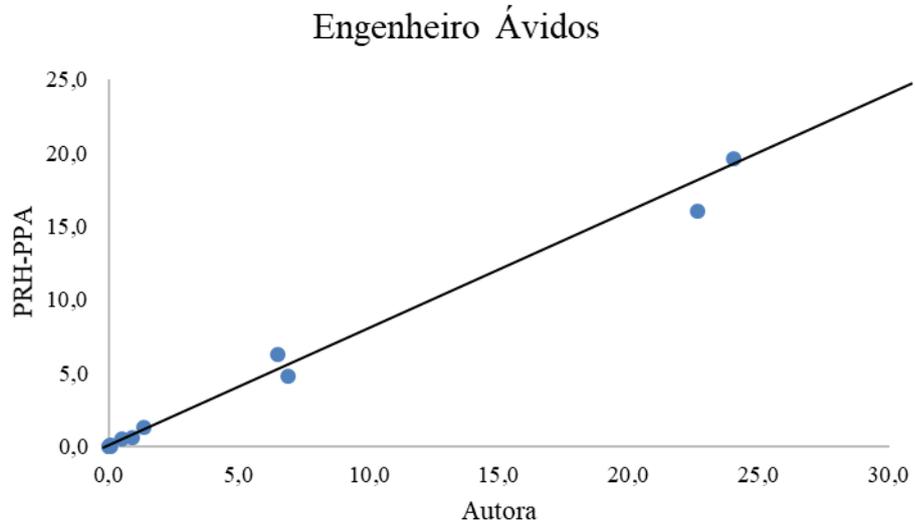
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 39 - Vazões afluentes médias para o açude Bartolomeu I



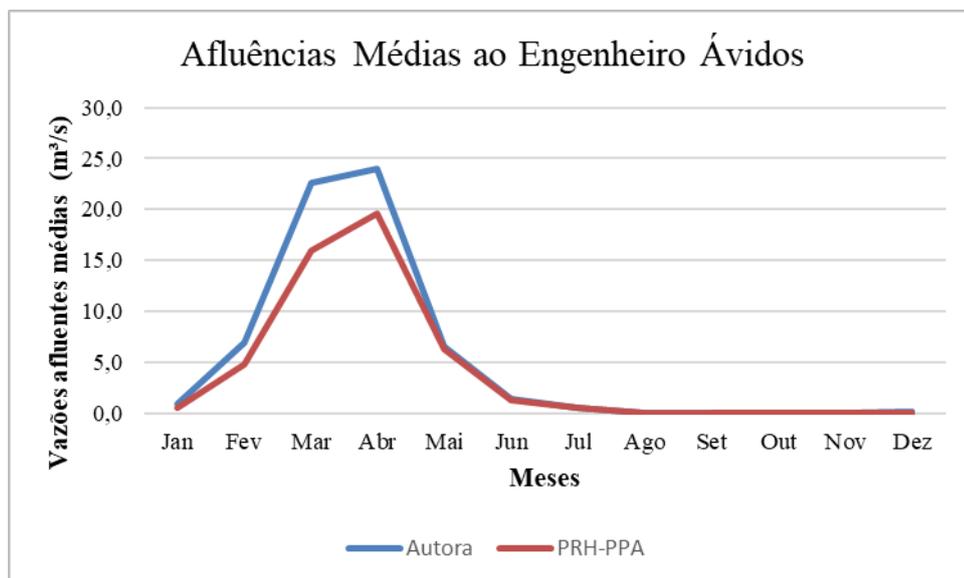
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 40 - Diagrama de dispersão das vazões afluentes para o açude Engenheiro Ávidos



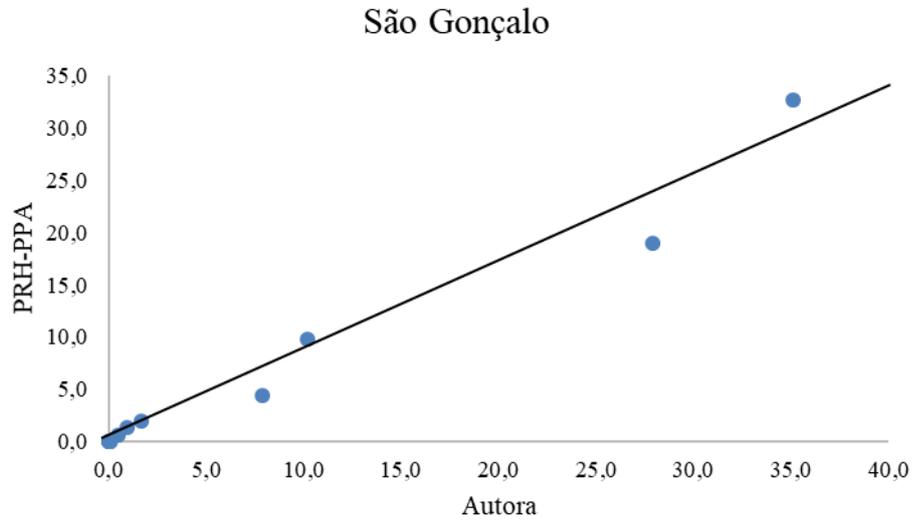
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 41 - Vazões afluentes médias para o açude Engenheiro Ávidos



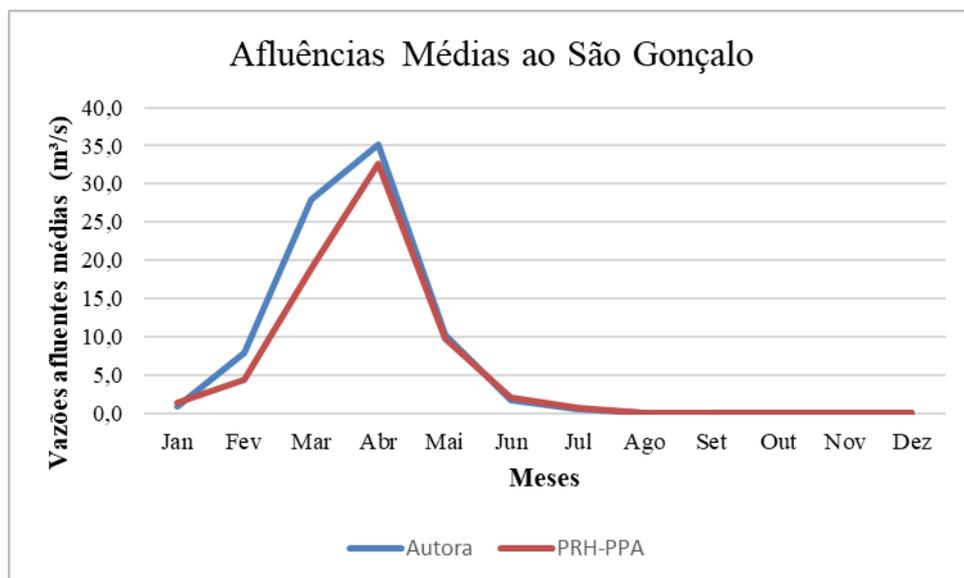
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 42 - Diagrama de dispersão das vazões afluentes para o açude São Gonçalo



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 43 - Vazões afluentes médias para o açude São Gonçalo



Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que todos os coeficientes de correlação foram muito próximos de 1, comprovando a proximidade dos dados, especialmente para Bartolomeu I, em que o posto pluviométrico selecionado foi o mesmo utilizado no plano, com pequenas divergências que foram atribuídas à correção e homogeneização dos dados. Os diagramas de dispersão também se mostram bastante equilibrados para todos os açudes. Quanto ao comportamento das vazões

médias mensais afluentes, observa-se, para Engenheiro Ávidos, uma divergência nos valores entre março e abril e, para São Gonçalo, essa diferença fica mais evidente no mês de abril, sendo remetida aos diferentes postos selecionados. Entretanto, ainda assim, o comportamento das vazões ao longo do ano é bastante semelhante em ambos e os valores obtidos para cada reservatório foram muito próximos, validando a utilização dos parâmetros no presente trabalho.

Os resultados das vazões afluentes para cada um dos reservatórios estratégicos em estudo estão contidos na Tabela 39 à Tabela 41.

Tabela 39 - Vazões afluentes ao açude Bartolomeu I (m<sup>3</sup>/s)

(continua)

Ano	Vazões afluentes - Bartolomeu I (m <sup>3</sup> /s)												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	MÉDIA
1962	0,005	0,124	1,029	0,025	0,216	0,174	0,043	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,135
1963	0,003	4,006	4,471	0,225	0,105	0,040	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,004	0,738
1964	0,043	0,498	0,868	0,533	0,447	0,113	0,000	0,001	0,009	0,001	0,002	0,000	0,209
1965	0,005	0,002	0,126	1,516	0,222	0,268	0,024	0,031	0,000	0,000	0,000	0,000	0,183
1966	0,002	0,012	0,007	0,017	0,005	0,007	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005
1967	0,008	0,084	0,975	18,863	0,307	0,051	0,022	0,006	0,000	0,000	0,000	0,001	1,693
1968	0,038	0,019	3,119	0,063	0,343	0,020	0,007	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,301
1969	0,025	0,115	0,665	1,857	0,642	0,336	0,135	0,028	0,004	0,003	0,000	0,001	0,318
1970	0,002	0,016	0,107	0,167	0,004	0,000	0,002	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,025
1971	0,016	0,419	0,356	4,849	0,676	0,165	0,029	0,003	0,004	0,008	0,000	0,000	0,544
1972	0,059	0,131	0,479	0,318	0,075	0,044	0,005	0,006	0,001	0,000	0,000	0,044	0,097
1973	0,060	0,341	0,687	10,756	0,130	0,199	0,119	0,127	0,029	0,002	0,000	0,012	1,038
1974	0,445	5,736	7,027	10,446	0,074	0,058	0,015	0,001	0,000	0,002	0,007	0,018	1,986
1975	0,072	1,447	4,087	3,464	0,931	0,453	0,438	0,001	0,004	0,000	0,000	0,001	0,908
1976	0,017	1,523	2,756	2,306	0,086	0,076	0,000	0,000	0,008	0,007	0,042	0,005	0,569
1977	0,091	0,118	1,091	2,197	1,579	0,731	0,188	0,013	0,000	0,003	0,000	0,015	0,502
1978	0,006	0,977	1,407	1,844	1,824	0,504	0,714	0,032	0,023	0,001	0,007	0,002	0,612
1979	0,116	1,096	3,422	1,243	0,369	0,056	0,000	0,005	0,027	0,002	0,002	0,000	0,528
1980	0,012	1,009	3,606	0,069	0,003	0,021	0,013	0,000	0,000	0,001	0,030	0,006	0,398
1981	0,016	0,017	2,516	0,673	0,003	0,013	0,002	0,002	0,000	0,000	0,000	0,001	0,270
1982	0,001	0,033	0,231	0,446	0,084	0,002	0,001	0,001	0,001	0,005	0,004	0,001	0,067
1983	0,010	0,053	0,075	0,175	0,007	0,012	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,029
1984	0,005	0,021	0,601	1,816	0,262	0,000	0,002	0,002	0,000	0,000	0,001	0,000	0,226
1985	0,073	2,683	1,889	5,757	0,596	0,313	0,096	0,062	0,002	0,000	0,000	0,095	0,964
1986	0,075	1,577	0,830	1,709	0,400	0,174	0,049	0,019	0,007	0,000	0,016	0,000	0,405
1987	0,006	0,105	0,808	1,232	0,003	0,217	0,009	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,198
1988	0,010	0,052	0,992	3,484	0,357	0,052	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000	0,044	0,418
1989	0,270	0,098	0,744	5,870	1,753	0,062	0,022	0,030	0,003	0,026	0,002	0,568	0,787
1990	0,059	0,304	0,090	2,070	0,647	0,035	0,011	0,016	0,039	0,002	0,004	0,000	0,273

Tabela 39 - Vazões afluentes ao açude Bartolomeu I (m³/s)

(conclusão)

Ano	Vazões afluentes - Bartolomeu I (m³/s)												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	MÉDIA
1991	0,231	0,233	0,863	1,382	0,075	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,232
1992	0,074	0,282	0,435	0,259	0,010	0,007	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,089
1993	0,001	0,014	0,016	0,074	0,271	0,001	0,068	0,002	0,003	0,001	0,002	0,000	0,038
1994	0,260	1,462	0,550	0,363	1,041	0,363	0,081	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,343
1995	0,017	0,052	0,617	1,965	0,728	0,030	0,086	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,291
1996	0,001	0,004	0,049	0,083	0,148	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,025
1997	0,015	0,044	0,423	0,249	0,304	0,000	0,014	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,087
1998	0,003	0,005	0,054	0,241	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,025
1999	0,001	0,012	0,190	0,101	0,076	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,011	0,033
2000	0,032	0,246	0,942	1,435	0,165	0,000	0,002	0,001	0,015	0,000	0,000	0,001	0,237
2001	0,001	0,006	0,332	0,008	0,000	0,017	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,011	0,031
2002	0,513	0,281	0,703	0,084	0,075	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,138
2003	0,007	0,018	0,136	0,054	0,012	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,019
2004	0,324	3,351	0,603	0,051	0,147	0,097	0,007	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,382
2005	0,005	0,007	0,720	0,376	0,056	0,040	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,100
2006	0,001	0,036	1,307	1,033	0,230	0,059	0,013	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,223
2007	0,000	0,092	0,033	0,048	0,029	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,017
2008	0,002	0,121	7,767	0,900	0,434	0,000	0,022	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,771
2009	0,002	0,077	0,105	0,769	0,888	0,000	0,019	0,008	0,000	0,000	0,000	0,001	0,156
2010	0,103	0,007	0,037	0,151	0,125	0,013	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,062	0,042
2011	0,346	2,436	0,157	0,258	0,406	0,029	0,050	0,008	0,000	0,059	0,084	0,009	0,320
2012	0,023	0,085	0,308	0,055	0,045	0,023	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,046
2013	0,001	0,012	0,172	0,245	0,056	0,185	0,011	0,001	0,000	0,000	0,000	0,006	0,057
2014	0,004	0,013	0,105	0,465	0,393	0,046	0,109	0,000	0,001	0,004	0,001	0,003	0,095
2015	0,001	0,004	0,243	0,063	0,047	0,032	0,038	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,036
2016	0,020	0,014	0,037	0,021	0,007	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,008
2017	0,003	0,032	0,066	0,162	0,097	0,085	0,033	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,040

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 40 - Vazões afluentes ao açude Engenheiro Ávidos (m<sup>3</sup>/s)

(continua)

Ano	Vazões afluentes - Engenheiro Ávidos (m <sup>3</sup> /s)												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	MÉDIA
1962	0,162	1,531	8,935	6,462	3,907	1,528	0,368	0,000	0,000	0,007	0,005	0,013	1,910
1963	0,210	30,658	70,181	8,014	1,791	0,647	0,002	0,000	0,001	0,006	0,009	0,106	9,302
1964	0,693	4,578	22,188	34,996	11,638	3,022	0,418	0,018	0,163	0,014	0,023	0,002	6,480
1965	0,110	0,073	4,193	38,338	2,584	5,093	0,405	0,359	0,003	0,055	0,000	0,000	4,268
1966	0,054	0,410	0,487	1,720	0,759	0,801	0,171	0,000	0,022	0,000	0,000	0,007	0,369
1967	0,124	3,722	39,981	119,326	37,030	0,421	0,149	0,029	0,002	0,000	0,000	0,003	16,732
1968	0,239	0,253	60,286	5,996	4,343	0,633	0,121	0,003	0,000	0,000	0,011	0,028	5,993
1969	0,216	2,571	7,261	22,967	5,988	2,984	1,039	0,090	0,021	0,013	0,000	0,005	3,596
1970	0,157	0,367	2,837	3,660	0,020	0,026	0,009	0,000	0,001	0,003	0,001	0,001	0,590
1971	0,324	6,310	8,432	39,279	7,090	4,294	0,860	0,014	0,016	0,063	0,001	0,001	5,557
1972	0,527	2,602	13,553	9,003	2,277	0,642	0,196	0,172	0,007	0,001	0,000	0,253	2,436
1973	0,294	1,401	5,314	83,029	7,404	3,412	1,125	0,510	0,165	0,003	0,001	0,026	8,557
1974	1,174	43,340	94,797	101,729	4,109	0,863	0,134	0,004	0,004	0,011	0,013	0,015	20,516
1975	0,470	3,651	33,711	28,550	7,675	3,531	4,552	0,002	0,040	0,022	0,001	0,020	6,852
1976	0,048	10,800	38,204	11,549	0,631	0,364	0,001	0,002	0,257	0,098	0,145	0,008	5,176
1977	0,293	2,161	14,324	38,653	12,900	6,394	2,241	0,037	0,000	0,023	0,000	0,068	6,424
1978	0,187	26,364	17,848	8,928	13,166	2,326	3,386	0,057	0,034	0,002	0,016	0,003	6,026
1979	1,479	22,546	25,713	18,161	5,389	0,397	0,057	0,036	0,079	0,054	0,009	0,002	6,160
1980	0,129	16,751	32,329	1,701	0,191	0,342	0,149	0,000	0,001	0,008	0,121	0,020	4,312
1981	0,302	0,268	32,646	5,194	0,009	0,147	0,005	0,006	0,000	0,000	0,001	0,054	3,219
1982	0,306	0,884	3,759	8,945	1,626	0,070	0,010	0,004	0,002	0,016	0,009	0,002	1,303
1983	0,041	1,124	1,503	1,740	0,051	0,057	0,021	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,378
1984	0,046	0,471	7,973	26,589	5,916	0,147	0,099	0,019	0,000	0,003	0,005	0,002	3,439
1985	4,447	35,970	73,120	152,593	10,899	3,501	1,303	0,189	0,011	0,001	0,003	0,449	23,541
1986	0,810	14,320	37,773	34,504	6,356	3,527	1,211	0,228	0,075	0,065	0,149	0,005	8,252
1987	0,117	0,758	22,692	9,822	0,628	1,608	0,086	0,012	0,008	0,000	0,000	0,000	2,978
1988	0,021	0,286	7,938	36,356	3,725	0,165	0,139	0,000	0,002	0,001	0,000	0,128	4,063
1989	1,875	0,962	6,851	52,811	24,201	2,380	0,726	0,193	0,236	0,093	0,008	1,393	7,644
1990	0,214	1,783	0,523	13,554	2,331	0,217	0,020	0,144	0,089	0,005	0,026	0,003	1,576
1991	0,599	1,598	9,658	5,663	5,616	0,308	0,004	0,010	0,000	0,000	0,001	0,000	1,955
1992	0,529	3,248	4,655	3,088	0,048	0,189	0,021	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,982
1993	0,001	0,081	0,733	1,273	2,059	0,002	0,250	0,006	0,010	0,002	0,002	0,000	0,368
1994	2,735	11,921	7,977	8,566	10,383	5,875	0,974	0,025	0,000	0,000	0,000	0,044	4,042
1995	0,573	1,430	5,213	19,588	21,185	0,702	0,491	0,000	0,000	0,000	0,009	0,001	4,099
1996	0,518	2,677	13,938	31,878	20,726	1,402	0,036	0,023	0,000	0,002	0,003	0,006	5,934
1997	1,366	1,822	7,615	6,196	4,425	0,018	0,123	0,017	0,000	0,001	0,022	0,012	1,802
1998	0,362	0,628	1,464	2,259	0,025	0,025	0,013	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,398
1999	0,087	0,741	8,773	4,901	5,243	0,168	0,023	0,008	0,004	0,002	0,006	0,574	1,711
2000	1,906	12,317	19,630	29,720	2,228	0,437	0,352	0,060	0,082	0,002	0,000	0,034	5,564
2001	0,052	0,599	11,102	1,962	0,119	0,286	0,008	0,004	0,000	0,006	0,001	0,108	1,187
2002	11,424	4,814	13,182	3,741	5,191	0,832	0,058	0,000	0,003	0,000	0,000	0,001	3,270

Tabela 40 - Vazões afluentes ao açude Engenheiro Ávidos (m³/s)

(conclusão)

Ano	Vazões afluentes - Engenheiro Ávidos (m³/s)												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	MÉDIA
2003	0,144	0,321	3,072	4,578	1,436	0,201	0,024	0,002	0,004	0,002	0,001	0,004	0,816
2004	6,391	39,255	9,942	2,651	3,606	1,182	0,398	0,039	0,001	0,000	0,001	0,004	5,289
2005	0,047	0,077	12,320	4,019	1,715	0,379	0,024	0,010	0,000	0,000	0,000	0,033	1,552
2006	0,092	4,464	50,953	41,210	10,329	0,736	0,329	0,013	0,000	0,008	0,001	0,005	9,012
2007	0,011	2,094	1,555	2,130	1,229	0,242	0,011	0,001	0,000	0,000	0,001	0,003	0,606
2008	0,185	5,657	204,177	6,653	5,614	0,204	0,383	0,039	0,001	0,000	0,000	0,003	18,576
2009	0,105	0,931	4,355	47,830	25,402	1,400	0,578	0,192	0,000	0,003	0,001	0,015	6,734
2010	0,931	0,212	0,428	2,722	0,791	0,575	0,005	0,000	0,000	0,085	0,000	0,248	0,500
2011	10,053	33,286	4,942	8,533	7,447	0,733	0,854	0,082	0,000	0,593	0,229	0,034	5,566
2012	0,175	1,077	4,584	1,648	0,732	0,261	0,028	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,709
2013	0,003	0,041	1,403	2,940	1,515	1,788	0,247	0,018	0,003	0,003	0,002	0,066	0,669
2014	0,045	0,641	6,367	9,716	3,009	0,434	0,451	0,036	0,003	0,019	0,175	0,230	1,761
2015	0,098	0,233	6,000	1,424	0,776	0,685	0,608	0,010	0,000	0,001	0,000	0,001	0,819
2016	0,320	0,178	4,015	2,927	1,078	0,064	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,716
2017	0,157	0,797	2,319	4,320	1,605	0,832	0,443	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,873

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 41 - Vazões afluentes ao açude São Gonçalo (m³/s)

(continua)

Ano	Vazões afluentes - São Gonçalo (m³/s)												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	MÉDIA
1962	0,098	1,063	13,498	15,041	5,980	0,812	0,180	0,000	0,000	0,001	0,001	0,009	3,057
1963	0,426	16,000	85,926	14,896	2,516	0,756	0,000	0,000	0,001	0,012	0,003	0,080	10,051
1964	0,236	13,948	43,810	44,762	16,324	2,379	0,375	0,216	0,243	0,025	0,004	0,002	10,194
1965	0,283	0,036	3,407	75,567	2,485	5,732	0,637	0,003	0,000	0,046	0,000	0,001	7,350
1966	0,005	0,101	0,207	0,291	0,665	1,142	0,317	0,003	0,007	0,004	0,002	0,004	0,229
1967	0,111	7,706	26,687	56,164	54,281	0,234	0,138	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	12,110
1968	0,072	0,179	38,748	7,977	3,471	0,438	0,083	0,001	0,000	0,000	0,000	0,002	4,248
1969	0,164	2,275	6,631	27,255	6,117	1,637	1,184	0,035	0,000	0,003	0,000	0,002	3,775
1970	0,116	0,319	7,753	4,536	0,097	1,041	0,001	0,002	0,001	0,006	0,006	0,000	1,156
1971	0,996	20,231	21,013	48,629	6,799	15,008	0,920	0,002	0,010	0,098	0,000	0,001	9,476
1972	0,347	2,920	9,629	6,813	3,982	0,529	0,069	0,075	0,000	0,000	0,000	0,114	2,040
1973	0,087	0,899	7,169	257,757	0,593	0,335	0,230	0,006	0,010	0,002	0,000	0,006	22,258
1974	0,414	13,594	38,317	121,378	7,654	0,655	0,319	0,000	0,018	0,002	0,033	0,001	15,199
1975	0,630	1,594	20,407	48,297	4,742	1,062	2,759	0,004	0,019	0,004	0,001	0,001	6,627
1976	0,001	4,116	23,511	3,854	0,412	0,137	0,001	0,000	0,004	0,017	0,013	0,002	2,672
1977	0,352	6,420	80,700	30,673	27,783	3,596	0,948	0,001	0,000	0,001	0,000	0,052	12,544
1978	0,520	34,075	33,556	3,662	7,191	0,751	0,800	0,007	0,003	0,011	0,014	0,000	6,716
1979	2,282	24,015	25,639	11,798	5,570	0,731	0,257	0,018	0,039	0,011	0,004	0,000	5,864
1980	0,056	17,961	37,196	2,179	0,388	0,568	0,054	0,000	0,002	0,001	0,004	0,001	4,867
1981	0,123	1,535	114,753	1,615	0,003	0,023	0,001	0,002	0,000	0,000	0,008	0,013	9,840

Tabela 41 – Vazões afluentes ao açude São Gonçalo

(conclusão)

Ano	Vazões afluentes - São Gonçalo (m <sup>3</sup> /s)												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	MÉDIA
1982	1,022	2,755	5,883	17,524	4,181	0,312	0,010	0,010	0,000	0,042	0,011	0,001	2,646
1983	0,012	0,862	1,223	0,637	0,008	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,229
1984	0,098	0,413	6,237	33,525	16,698	0,282	0,070	0,024	0,000	0,003	0,009	0,081	4,787
1985	9,535	61,956	67,845	191,725	17,563	9,448	3,795	0,043	0,106	0,000	0,000	0,295	30,193
1986	0,591	4,496	32,861	40,869	10,069	1,980	1,243	0,149	0,067	0,004	0,051	0,002	7,698
1987	0,043	0,399	44,575	5,948	0,928	0,453	0,264	0,108	0,022	0,000	0,000	0,000	4,395
1988	0,010	0,161	13,283	55,050	9,733	0,235	0,053	0,000	0,000	0,000	0,000	0,087	6,551
1989	1,014	0,185	9,879	84,908	14,447	3,022	1,322	0,140	0,375	0,086	0,048	2,353	9,815
1990	0,915	1,662	2,133	40,386	2,825	0,000	0,026	0,099	0,000	0,001	0,004	0,002	4,005
1991	0,743	1,818	23,797	11,520	27,081	1,481	0,041	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	5,540
1992	0,974	5,578	11,390	10,667	0,335	0,403	0,007	0,000	0,008	0,000	0,000	0,000	2,447
1993	0,000	0,064	2,353	3,562	3,490	0,000	0,164	0,001	0,002	0,002	0,001	0,002	0,803
1994	2,689	14,247	6,845	11,421	4,137	8,231	1,287	0,066	0,018	0,000	0,000	0,021	4,080
1995	0,206	1,404	6,486	17,393	44,760	0,900	0,222	0,000	0,000	0,003	0,005	0,000	5,948
1996	0,785	12,069	20,124	123,704	15,181	1,138	0,145	0,061	0,000	0,008	0,005	0,002	14,435
1997	1,157	1,239	17,054	18,594	12,061	0,091	0,226	0,053	0,000	0,002	0,009	0,033	4,210
1998	3,962	6,782	4,584	3,428	0,041	0,057	0,021	0,007	0,000	0,000	0,000	0,002	1,574
1999	0,483	0,912	22,146	6,427	20,240	0,274	0,054	0,000	0,017	0,016	0,023	0,274	4,239
2000	1,506	21,413	33,999	22,905	5,309	0,920	0,697	0,278	0,032	0,007	0,000	0,056	7,260
2001	0,007	0,254	9,552	0,984	0,020	0,156	0,016	0,007	0,000	0,001	0,000	0,020	0,918
2002	5,656	2,852	18,498	9,903	19,755	3,339	0,232	0,000	0,000	0,008	0,001	0,002	5,021
2003	0,323	2,902	16,920	31,779	4,071	0,665	0,195	0,060	0,000	0,001	0,000	0,004	4,743
2004	5,025	43,710	26,767	8,453	4,273	2,650	0,221	0,002	0,000	0,000	0,000	0,005	7,592
2005	0,052	0,103	27,696	10,015	3,744	0,755	0,001	0,005	0,000	0,000	0,000	0,004	3,531
2006	0,011	1,135	22,704	56,634	18,914	0,364	0,310	0,008	0,000	0,002	0,001	0,003	8,340
2007	0,050	13,636	7,045	8,760	5,081	1,007	0,024	0,000	0,000	0,000	0,003	0,001	2,967
2008	0,470	5,710	235,910	15,095	32,137	1,550	0,889	0,021	0,000	0,000	0,000	0,002	24,315
2009	0,047	0,250	2,366	59,166	35,822	3,429	1,649	0,335	0,000	0,003	0,000	0,006	8,589
2010	0,186	0,203	0,367	4,530	0,805	1,398	0,001	0,000	0,000	0,099	0,000	0,137	0,644
2011	13,486	105,086	8,051	8,439	5,661	2,014	0,682	0,021	0,000	1,037	0,374	0,036	12,074
2012	0,159	1,402	1,804	4,819	1,009	0,340	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,795
2013	0,002	0,071	1,966	1,884	2,079	1,971	0,306	0,016	0,005	0,012	0,003	0,071	0,699
2014	0,104	1,219	10,486	15,048	3,187	0,368	0,352	0,000	0,000	0,024	0,029	0,047	2,572
2015	0,083	0,425	16,634	2,608	0,490	0,519	0,505	0,017	0,000	0,002	0,000	0,000	1,774
2016	0,350	0,116	50,684	13,778	2,526	0,184	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	5,637
2017	0,064	1,454	7,671	8,501	4,696	1,715	1,222	0,000	0,008	0,000	0,001	0,001	2,111

Fonte: Elaborado pela autora.