



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS CRATEÚS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

ISABEL TERESA DE SOUSA SILVA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA E ESTIMATIVA DE CARGAS POLUIDORAS EM
UMA BACIA HIDROGRÁFICA RURAL**

CRATEÚS
2021

ISABEL TERESA DE SOUSA SILVA

MODELAGEM HIDROLÓGICA E ESTIMATIVA DE CARGAS POLUIDORAS EM UMA
BACIA HIDROGRÁFICA RURAL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da
Universidade Federal do Ceará, Campus de
Crateús, como requisito para obtenção ao título
de Bacharel em Engenharia Ambiental e
Sanitária.

Orientadora: Prof.a Me. Janine Brandão de
Farias Mesquita.

CRATEÚS

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S696m Silva, Isabel Teresa de Sousa.
Modelagem hidrológica e estimativa de cargas poluidoras em uma bacia hidrográfica rural / Isabel Teresa de Sousa Silva. – 2021.
51 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Ambiental, Crateús, 2021.
Orientação: Profa. Ma. Janine Brandão de Farias Mesquita .
1. Modelagem hidrológica. 2. SMAP. 3. Modelagem de qualidade da água. 4. Fósforo total. I. Título.
CDD 628
-

ISABEL TERESA DE SOUSA SILVA

MODELAGEM HIDROLÓGICA E ESTIMATIVA DE CARGAS POLUIDORAS EM UMA
BACIA HIDROGRÁFICA RURAL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da
Universidade Federal do Ceará, Campus de
Crateús, como requisito para obtenção ao título
de Bacharel em Engenharia Ambiental e
Sanitária.

Aprovada em ___/___/___.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Me. Janine Brandão de Farias Mesquita (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Me. Raimunda Moreira da Franca
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto
Universidade Federal do Ceará (UFC/DEHA)

A Deus.

Aos meus pais, João e Rita.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado sabedoria e discernimento durante toda esta etapa, foi e é minha força, coragem e refúgio.

Aos meus pais, João Evangelista e Rita de Cássia por terem sido meus guias, terem me incentivado e se alegrado com minhas conquistas.

Aos meus irmãos, João Francisco e Ana Luísa pelos cuidados e paciência.

Aos meus avós paternos, Francisco Alves e Maria do Socorro e meu avô materno, João Rodrigues, que muitas vezes sem entenderem o contexto das coisas, se alegravam e torciam por mim.

Aos meus tios, que foram ajuda e consolo diante de muitas situações.

À tia Dalba e tia Vera, que foram as primeiras que me acolheram em Crateús, e me trataram como filha, estive sempre aos seus cuidados.

À Gabriela, Leyanne, Fabrinny, Jenilson, Ivo, Luan e Felipe, por terem sido esses amigos que diretamente estiveram presente durante este tempo, e que me deram forças e apoio para continuar.

À Janine, minha orientadora e exemplo de profissional, por seu apoio, conselhos e paciência.

Aos meus amigos, que sempre torceram por mim.

À Comunidade Católica Shalom, Missão Crateús, pelo seu auxílio e sustento.

Aos meus professores da graduação, estes exemplos de profissionais, pelo apoio, incentivo e ensinamentos ao longo destes anos.

“Quando a situação for boa, desfrute-a. Quando a situação for ruim, transforme-a. Quando a situação não puder ser transformada, transforme-se.” (Viktor Frankl)

RESUMO

O estado do Ceará possui uma densa rede de reservatórios, no qual a água armazenada nestes locais é de extrema importância para a população, tornando-se necessário o monitoramento qualitativo destes ambientes, sendo fundamental a análise de poluentes neles lançados. Nesse contexto, o presente trabalho teve por objetivo analisar as cargas poluidoras de fósforo em uma bacia hidrográfica rural, localizada no semiárido cearense, considerando a variabilidade hidrológica da região. Desta forma, utilizou-se o modelo hidrológico SMAP juntamente com um modelo de qualidade da água transiente de mistura completa para analisar as concentrações de fósforo total. O estudo foi realizado na bacia hidrográfica do açude Quixeramobim, localizado no município de Quixeramobim no estado do Ceará, entre os anos de 1997 a 2017. Os processos de calibração e validação realizados no SMAP apresentaram um desempenho moderado do modelo diante das funções-objetivo utilizadas, atingindo-se 0,28 para o coeficiente de NASH e 0,61 para a correlação. O modelo de qualidade da água obteve média de carga mensal máxima de 19,36 ton/ano no mês de março, para a carga afluyente de fósforo. Para as médias de concentrações de fósforo alcançou-se taxas variando entre 0,040 g/m³ e 0,203 g/m³, no qual houve maior concentração no período de seca. Tais valores quando comparados aos dados estabelecidos pela resolução CONAMA nº 357/2005 estão acima do limite de 0,03 mg/l. A metodologia proposta pode contribuir com o gerenciamento qualitativo dos recursos hídricos, a fim de reduzir problemáticas, como as causadas pela eutrofização.

Palavras chave: Modelagem hidrológica. SMAP. Modelagem de qualidade da água. Fósforo Total.

ABSTRACT

The state of Ceará has a high number of reservoirs, in which the water stored in these places is extremely important for the population, making it necessary to monitor these environments qualitatively, and the analysis of pollutants released into them is essential. In this context, this study aimed to analyze the phosphorus polluting loads in a rural watershed, located in the semiarid region of Ceará, considering the hydrological variability of the region. Thus, the hydrological model SMAP was used together with a transient complete – mix water quality model to analyze the concentrations of total phosphorus. The study was carried out in the watershed of the Quixeramobim reservoir, located in the municipality of Quixeramobim in the state of Ceará, between 1997 and 2017. The calibration and validation processes performed in the SMAP presented a moderate performance of the model in relation to the objective functions used reaching 0.28 for the NASH coefficient and 0.61 for the correlation. The water quality model had an average maximum monthly load of 19.36 ton/year in March. For the average phosphorus concentrations, rates ranging between 0.040 g/m³ and 0.203 g/m³ were reached in which there was a higher concentration in the dry period. Such values, when compared to the data established by CONAMA resolution n° 357/2005, are above the limit of 0.03 mg/l. The proposed methodology can contribute to the qualitative management of water resources.

Keywords: Hydrological modeling. SMAP. Water quality modeling. Total Phosphorus.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Bacia hidrográfica do açude Quixeramobim | 23 |
| Figura 2 – Thiessen para a área de estudo do açude Quixeramobim, localizado em Quixeramobim, Ceará | 30 |
| Figura 3 – Precipitação média para Quixeramobim, Ceará | 30 |
| Figura 4 – Média de evapotranspiração para a região de Quixeramobim/CE pelo método de Thortwaite em comparação com as Normais climatológicas | 31 |
| Figura 5 – Regressão linear entre vazão de entrada e vazão de afluência no açude Quixeramobim, Quixeramobim/CE | 32 |
| Figura 6 – Calibração do modelo de Chuva-Vazão SMAP para a estação 36520000, Quixeramobim, Ceará | 34 |
| Figura 7 – Série temporal gerada para a estação 36520000 localizada em Quixeramobim, Ceará | 35 |
| Figura 8 – Variação Sazonal da vazão de entrada do açude Quixeramobim, Quixeramobim, Ceará | 35 |
| Figura 9 – Correlação de dados de carga afluente e vazão de entrada gerada para o açude Quixeramobim, Quixeramobim/CE | 38 |
| Figura 10 – Expansão mensal média de carga afluente no reservatório Quixeramobim entre os anos de 1997 e 2017..... | 39 |
| Figura 11 – Expansão anual de carga afluente ao reservatório Quixeramobim entre os anos de 1997 e 2017 | 40 |
| Figura 12 – Média anual de concentração de fósforo total entre os anos de 1997 e 2017..... | 41 |
| Figura 13 – Média mensal de concentração de fósforo total entre os anos de 1997 e 2017 | 41 |
| Figura 14 – Tempo de retenção mensal para o açude Quixeramobim, Quixeramobim/CE..... | 42 |
| Figura 15 – Relação entre vazões, carga afluente e concentrações de fósforo na entrada do Açude Quixeramobim, Quixeramobim/Ceará..... | 43 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Principais causas de poluição no Nordeste brasileiro | 17 |
| Tabela 2 – População dos municípios pertencentes a bacia do açude Quixeramobim | 23 |
| Tabela 3 – Estações para cálculo da precipitação média | 25 |
| Tabela 4 – Parâmetros calibrados para a estação fluviométrica 36520000 em Quixeramobim/CE | 32 |
| Tabela 5 – Resultados para as funções-objetivo na calibração do modelo SMAP..... | 33 |
| Tabela 6 – Dados de concentração de fósforo total no Açude Quixeramobim/CE | 36 |
| Tabela 7 – Dados de vazão de entrada do reservatório Quixeramobim/CE..... | 37 |
| Tabela 8 – Dados de vazão de saída do reservatório Quixeramobim/CE | 37 |
| Tabela 9 – Volume médio no Açude Quixeramobim/CE | 37 |
| Tabela 10 – Tempo de residência hidráulica..... | 38 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------|---|
| ANA | Agência Nacional de Águas |
| CAGECE | Companhia de Água e Esgoto do Ceará |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| COGERH | Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos |
| DNOCS | Departamento Nacional de Obras Contra as Secas |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| INMET | Instituto Nacional de Meteorologia |
| IPECE | Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará |
| SMAP | Soil Moisture Active Passive |
| SUDENE | Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 | Contextualização | 13 |
| 1.2 | Justificativa..... | 14 |
| 1.3 | Objetivos..... | 15 |
| 1.3.1 | <i>Objetivo geral</i> | 15 |
| 1.3.2 | <i>Objetivos específicos</i> | 15 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 2.1 | Poluição em bacias hidrográficas | 16 |
| 2.2 | Impactos ambientais nos recursos hídricos | 17 |
| 2.2.1 | <i>Eutrofização</i> | 18 |
| 2.3 | Modelagem hidrológica | 18 |
| 2.3.1 | <i>Modelo SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure)</i> | 19 |
| 2.4 | Modelagem da concentração de fósforo | 21 |
| 3 | METODOLOGIA | 22 |
| 3.1 | Caracterização da área de estudo..... | 22 |
| 3.2 | Levantamento de dados..... | 24 |
| 3.2.1 | <i>Dados de evapotranspiração</i> | 24 |
| 3.2.3 | <i>Dados pluviométricos</i> | 25 |
| 3.2.4 | <i>Dados fluviométricos</i> | 26 |
| 3.2.5 | <i>Concentração de Fósforo Total</i> | 26 |
| 3.2.6 | <i>Vazão de saída dos reservatórios</i> | 27 |
| 3.2.7 | <i>Volume médio do reservatório</i> | 27 |
| 3.3 | Modelagem do Sistema Chuva-Vazão | 27 |
| 3.3.1 | <i>Calibração e Validação</i> | 27 |
| 3.4 | Geração de séries temporais para o fósforo total (PT) | 28 |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 4.1 | Levantamento de dados..... | 29 |
| <i>4.1.1</i> | <i>Dados de precipitação.....</i> | <i>29</i> |
| <i>4.1.2</i> | <i>Dados de evapotranspiração.....</i> | <i>31</i> |
| <i>4.1.3</i> | <i>Dados Fluviométricos.....</i> | <i>31</i> |
| 4.2 | Modelagem do Sistema Chuva-Vazão | 32 |
| <i>4.2.1</i> | <i>Calibração do modelo.....</i> | <i>32</i> |
| 4.3 | Modelagem da carga poluidora | 35 |
| <i>4.3.1</i> | <i>Concentração de fósforo total</i> | <i>36</i> |
| <i>4.3.2</i> | <i>Vazão de entrada e saída do reservatório</i> | <i>36</i> |
| <i>4.3.3</i> | <i>Volume do reservatório e tempo de residência hidráulica.....</i> | <i>37</i> |
| <i>4.3.4</i> | <i>Carga afluyente de fósforo.....</i> | <i>38</i> |
| <i>4.3.5</i> | <i>Concentração de fósforo total expandida.....</i> | <i>40</i> |
| 5 | CONCLUSÃO | 43 |
| | REFERÊNCIAS | 45 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

No Brasil, a região Nordeste é uma das mais vulneráveis a mudanças climáticas sofrendo com grandes períodos de seca extrema (RÊGO, 2016). A sub-região do semiárido é caracterizada por precipitação média anual, igual ou inferior a 800mm e altas taxas de evaporação, reduzindo a quantidade de água ao longo do ano e como consequência, parte dos rios apresentam caráter intermitente (RÊGO, 2016; SUDENE, 2017). Os solos são do tipo rasos, pouco profundos e com argila de atividade alta, favorecendo grande escoamento superficial e baixa infiltração durante o período chuvoso (MARQUES *et. al*, 2014).

O Nordeste, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019), apresenta cerca de aproximadamente 57 milhões de habitantes. O crescimento populacional e econômico dessa região demanda um alto consumo de recursos hídricos para desenvolver as atividades produtivas, provocando um desequilíbrio entre o consumo e a demanda (CEARÁ, 2018).

Estes fatores afetam diretamente na disponibilidade hídrica local, ocasionando problemas de estresse hídrico (ANA, 2018). Devido a isto, muitos estados nordestinos tiveram a necessidade de buscar soluções que auxiliassem a população, sendo adotadas políticas de convivência com a seca, nas quais a parte estrutural é constituída de escavação de poços e construção de cisternas, adutoras e reservatórios (TOLEDO, 2013). Destas obras, uma das mais adotadas são os reservatórios, que geralmente são construídos em lugares estratégicos e servem para acumular e controlar a passagem de água. A finalidade de sua construção e operação tem objetivos diferentes, como abastecimento da população, irrigação, controle de cheias, geração de energia elétrica e navegação. Em períodos de cheias o acúmulo de água é importante para posterior abastecimento da população em tempos de estiagem, sendo de grande importância para as regiões que sofrem nos períodos de seca (RÊGO, 2016).

Dentre essas regiões, encontra-se o estado do Ceará, apresentando uma extensão territorial de 148.894,757 km² e uma população estimada de aproximadamente 9.132.078 habitantes (IBGE, 2019). O mesmo está inserido dentro do semiárido e por isso apresenta características que contribuem para a escassez hídrica. Dessa forma, o governo do Estado desenvolveu a Política Estadual de Recursos Hídricos, influenciada diretamente pelo ciclo das secas, no qual os impactos desencadearam no surgimento de ações governamentais reativas, como a construção de reservatórios (CEARÁ, 2018). De acordo com o Plano de Ações

Estratégicas de Recursos Hídricos do Ceará (2018), o estado possui um total de 153 reservatórios que representam mais de 95% do total de reserva hídrica superficial.

Todavia, os objetivos a serem alcançados pelos reservatórios são comprometidos pelas atividades antrópicas desenvolvidas na área de sua bacia hidrográfica (RÊGO, 2016). O despejo direto de efluentes sem tratamento adequado nos corpos d'água e as formas de uso e ocupação do solo comprometem a qualidade da água, a depender dos seus devidos usos. Em áreas rurais, a presença de zonas agrícolas aumenta significativamente a quantidade de nutrientes no solo, devido ao uso de fertilizantes e também pela presença de excretas de animais (ANDRADE *et al.*, 2020).

No Ceará, a contaminação das águas ocorre sobretudo devido à presença de atividades ligadas à agricultura, pecuária, piscicultura, matadouros, hospitais, lixões, ao despejo de esgotos domésticos e industriais, entre outras (PINHEIRO, 2015; CEARÁ, 2018).

Essas atividades, juntamente com as condições naturais do semiárido brasileiro, favorecem a eutrofização (MESQUITA, 2009) sendo um dos problemas que mais interfere na qualidade da água (RÊGO, 2016). Este processo é caracterizado pelas altas taxas de nutrientes na água causando diversos problemas, como a proliferação de algas, que pode causar anaerobiose de corpos d'águas, mortalidade de peixes, elevados custos no tratamento de água, toxicidade das algas, redução na navegação e capacidade de transporte, entre outros (VON SPERLING, 1996).

Em reservatórios o transporte e deposição de nutrientes se dá devido aos processos de escoamento e armazenamento (ANDRADE *et al.*, 2020). No estado do Ceará, muitos estudos mostram como a eutrofização vem afetando na qualidade da água destes locais (FIGUEIRÊDO *et al.*, 2007; VIDAL e NETO, 2014; ANDRADE *et al.*; 2020). De acordo com o Relatório de qualidade da água de reservatórios monitorados pela COGERH (2020), de 144 açudes avaliados, 119 encontram-se em estado eutrofizado (eutróficos e hipertróficos), representando 81, 84% do total.

1.2 Justificativa

Em reservatórios artificiais, a água possui características próprias do local onde os mesmos estão instalados. Segundo Von Sperling (1996) a qualidade da água para bacias hidrográficas depende de dois fatores: as condições naturais e a interferência do homem. Nestas áreas as fontes de poluição estão relacionadas com uso e ocupação do solo, contribuindo para o aumento de nutrientes em corpos hídricos, afetando a qualidade da água e

influenciando no seu devido uso (VON SPERLING, 1996; MENEZES *et. al.*, 2016; SOUZA, 2017).

A Política Nacional dos Recursos Hídricos tem como um de seus objetivos assegurar a atual e futuras gerações à necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos seus respectivos usos. A partir deste ponto, a política de açudagem do estado do Ceará tem como finalidade a utilização dos reservatórios para acumular água em tempos chuvosos e posterior uso nos períodos de seca, utilizando a água, por exemplo, para o abastecimento de comunidades rurais e urbanas (CEARÁ, 2018). Dessa forma, com um alto número de reservatórios no estado e sua importância para a população, torna-se necessário o monitoramento qualitativo da água destes locais, sendo fundamental a análise de poluentes lançados, a fim de minimizar a problemática causada pela eutrofização e seus impactos (ROCHA; MESQUITA; LIMA NETO, 2019).

Nesse sentido, podem ser utilizados diversos tipos de ferramentas a fim de monitorar e quantificar o excesso de nutrientes na água, principalmente os instrumentos de simulações matemáticas (MESQUITA; PEREIRA; LIMA NETO, 2020). Assim, este trabalho propõe uma abordagem metodológica que possa contribuir com o gerenciamento qualitativo dos recursos hídricos, partindo do uso de modelagem hidrológica para quantificar as cargas poluidoras aportadas aos reservatórios cearenses.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Analisar as cargas poluidoras de fósforo total em uma bacia hidrográfica rural, localizada no semiárido cearense, considerando a variabilidade hidrológica da região, aplicando um modelo hidrológico.

1.3.2 Objetivos específicos

- Delimitar a bacia hidrográfica do reservatório selecionado;
- Calibrar e validar o modelo SMAP para a bacia hidrográfica do açude estudado;
- Aplicar um modelo de qualidade da água transiente de mistura completa que avalie concentrações de fósforo;

- Estimar as cargas poluidoras de fósforo aportadas ao açude selecionado a partir de uma série temporal de vazões;
- Analisar a influência da sazonalidade pluviométrica nas cargas de fósforo aportadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Poluição em bacias hidrográficas

A poluição hídrica consiste na adição de substâncias ou formas de energia que, direta ou indiretamente, alterem as características físicas, químicas e biológicas da água, sendo decorrente de atividades humanas e processos naturais (VON SPERLING, 1996; BRASIL, 2013; PINHEIRO 2015). Os poluentes gerados podem chegar ao corpo d'água basicamente através de fontes pontuais e difusas (MESQUITA; PEREIRA; LIMA NETO, 2020).

As fontes pontuais referem-se aos lançamentos em regiões específicas do corpo d'água, como o despejo de efluentes por emissário submarino ao mar. Os lançamentos de origem difusas ocorrem de forma não concentrada, apresentando diversas origens e ocorrências, resultantes de ações dispersas na bacia hidrográfica, dificultando a identificação e mensuração (BARROS, 2008, ROCHA *et al.*, 2009).

De acordo com Pinheiro (2015), a poluição por fontes difusas está mais relacionada com o uso e ocupação do solo, podendo ocorrer em áreas urbanas e rurais. Para este mesmo autor a poluição difusa em zonas rurais é decorrente de atividades agrícolas e pecuária, mineração, chácaras de lazer e recreação, e também de áreas pouco alteradas, como zonas de matas. Segundo Prodanoff (2005) em bacias hidrográficas urbanas, os principais causadores da poluição difusa provêm de lixo acumulado nas ruas, dejetos de animais, obras de construção, desgastes das ruas e poluição atmosférica.

Na Tabela 1 são colocadas as principais causas de poluição hídrica na região Nordeste (ANA, 2012), em que para o estado do Ceará tem-se atividades como aquicultura, efluentes industriais, esgotos domésticos e mineração.

Tabela 1 – Principais causas de poluição no Nordeste brasileiro.

| Impacto | AL | BA | CE | MA | PB | PE | PI | RN | SE |
|---------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Agrotóxico | | | | x | | | | | |
| Agricultura | | x | | | | | | | |
| Aquicultura | | | x | | | | | | |
| Carcinicultura | | | | | | | X | x | |
| Desmatamento | | | | x | x | x | | x | |
| Efluentes Industriais | X | x | x | x | x | x | X | | X |
| Efluentes agroindustrial | | | | | | | | | |
| Erosão | | | | x | | x | X | | |
| Esgotos domésticos | X | x | x | x | x | x | X | x | X |
| Indústria Sacroalcooleira | | | | | x | x | X | | |
| Mineração | | x | x | x | | | | x | |
| Resíduos Sólidos | | | | | | | X | | |
| Rizicultura | | | | | | | X | | |
| Salinas | | | | | | | X | | |
| Salinização | | | | x | | x | X | x | |

Fonte: Elaborada pela autora (2021), adaptada ANA (2012).

2.2 Impactos ambientais nos recursos hídricos

Diversas atividades que acontecem no entorno de reservatórios acarretam em alterações no meio, ocasionando assim em impactos ambientais (RÊGO, 2016). A Resolução CONAMA nº 001/86, define o impacto ambiental como:

“Impacto Ambiental consiste em qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causadas por qualquer forma de matéria ou energia resultantes das atividades humanas que direta ou indiretamente, afetam: (I) a saúde, a segurança e o bem estar da população; (II) as atividades sociais e econômicas; (III) a biota; (IV) as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; (V) qualidade dos seus recursos ambientais (CONAMA, 1986, p. 2548-2549).”

Em corpos hídricos estes impactos são devido ao lançamento de poluentes e nutrientes, por fontes difusas e pontuais (PINHEIRO, 2015; MESQUITA; PEREIRA; LIMA NETO, 2020). No caso de reservatórios, por serem ambientes lênticos, a qualidade da água está sujeita a sofrer impactos, devido ao aumento de residência da água no mesmo trecho, reduzindo o mecanismo advectivo de transporte dos poluentes que os desloca no sentido montante-jusante, onde os principais impactos estão relacionados a eutrofização (VILELA, 2010).

2.2.1 Eutrofização

Em relação ao nível trófico, o corpo d'água pode ser classificado em oligotrófico, mesotrófico, eutrófico e hipereutrófico (LAMPARELLI, 2004). Os ambientes eutróficos, por exemplo, apresentam grande produtividade e são ricos em matéria orgânica e elementos minerais, sendo muito comum, principalmente em períodos quentes, o crescimento desordenado e excessivo de fitoplâncton (LARENTIS, 2004).

Este processo é denominado de eutrofização, que consiste no aumento de microrganismos no corpo hídrico, devido ao excesso de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, prejudicando tanto a biota aquática quanto o uso necessário do corpo d'água (TONÉ, 2016; WIEGAND *et al.*, 2016), onde o fósforo é um fator limitante na maioria dos ambientes (LAMPARELLI, 2004). Na ordem natural este fenômeno aconteceria de forma lenta, mas devido às atividades antrópicas, é acelerada (LARENTIS, 2004).

De acordo com Von Sperling (1996) a eutrofização ocorre mais em lagos e reservatórios, sendo menos frequente em rios, em razão das condições ambientais não serem muito favoráveis para o crescimento de algas ou plantas, como turbidez e velocidades elevadas. Para estes ambientes, isto é decorrente principalmente do despejo de esgotos domésticos e atividades agrícolas (TONÉ, 2016).

Dos problemas ocasionados pela eutrofização, destaca-se: o aumento dos custos com tratamento de água, perda de valor estético e turístico de lagos, represas e rios; mortandade de peixes em vista das condições anaeróbias no corpo hídrico, redução na navegação e capacidade de transporte, entre outros (VON SPERLING, 1996; BARROS, 2008).

2.3 Modelagem hidrológica

De acordo com Rennó (2003), um modelo, de forma geral, é a representação de forma simplificada de processos reais, favorecendo o entendimento de seus efeitos dentro da realidade. Para este mesmo autor um modelo hidrológico pode ser definido como uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes dentro da bacia hidrográfica.

Os modelos hidrológicos foram desenvolvidos a fim de entender melhor, representar e simular o comportamento de bacias hidrográficas e prever diferentes condições das observadas (MOREIRA, 2005).

Segundo Moreira (2005) estes modelos podem ser classificados de acordo com as variáveis usadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), o tipo de ligação entre estas variáveis (empíricos ou conceituais), a forma como os dados são representados (discretos ou contínuos), se existe ou não relações espaciais (concentrado ou distribuídos), e se ocorre dependência temporal (estacionários ou dinâmicos).

Dentro dos modelos hidrológicos, existem os denominados chuva-vazão, que utilizam dados iniciais de previsão de chuvas, podendo gerar vazões para pontos específicos dentro da bacia hidrográfica (BRIANEZI, 2015). Um modelo deste tipo é o SMAP (LOPES *et al.*, 1981), sendo utilizado em diversos estudos devido sua simplicidade. Exemplos incluem os trabalhos realizados por Silveira *et al.* (2018) e Paiva (2020), em que o modelo SMAP apresentou bom desempenho na obtenção de vazões para análise de interferência climática na previsão das mesmas, e como isso afetaria na operação e planejamento do sistema hidrelétrico brasileiro. Da mesma forma, no estudo feito por Filho *et al.* (2020), onde usou-se o modelo como sistema integrado de estimativa e previsão de precipitação em bacias hidrográficas da CESP.

2.3.1 Modelo SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure)

O SMAP consiste em um modelo de simulação hidrológica do tipo chuva-vazão, sendo determinístico, conceitual e agregado. O modelo foi desenvolvido por Lopes *et al.* (1981) e possui uma estrutura simples, cujos parâmetros estão associados com o ciclo hidrológico e as características físicas da bacia. Inicialmente apresentava intervalos de tempo diário para a previsão de vazões, posteriormente foi apresentada versões para intervalos horário e mensal, com algumas alterações em sua estrutura (LOPES, 1999).

Para utilização do modelo SMAP, inicialmente é necessário uso de dados para os parâmetros e variáveis de entrada. Para isso, deve-se calibrar e validar, depois são realizados os cálculos utilizando o modelo e, com isso, geram-se as variáveis de saída (BRIANEZI, 2015).

Na versão mensal o modelo consiste na utilização de dois reservatórios matemáticos de água. O R_{solo} e o R_{sub} , que respectivamente representam o reservatório do solo e o subterrâneo. As variáveis de estado são atualizadas a cada mês e são calculadas de acordo com as equações 2.1 e 2.2 (LOPES, 1999).

$$R_{solo}(i + 1) = R_{solo}(i) + P - E_s - E_r - Rec \quad (2.1)$$

$$R_{sub}(i + 1) = R_{sub}(i) + Rec - E_b \quad (2.2)$$

Em que:

R_{solo} = reservatório do solo (zona aerada) (mm)

R_{sub} = reservatório subterrâneo (zona saturada) (mm)

P = precipitação (mm)

i = intervalo de tempo (mês)

E_s = escoamento superficial (mm)

E_r = evapotranspiração real (mm)

Rec = recarga subterrânea (mm)

E_b = escoamento básico (mm)

Para inicializar o modelo é necessário estimar a taxa de umidade do solo e o escoamento de base, a partir disso é descrito o estado inicial dos reservatórios. Este processo é representado de acordo com as equações 2.3 e 2.4:

$$R_{solo}(1) = T_{uin} * Str \quad (2.3)$$

$$R_{sub} = \frac{E_{bin}}{Ad * 2360} \quad (2.4)$$

Em que:

T_{uin} = taxa de umidade do solo (%)

E_{bin} = escoamento de base ($m^3.s^{-1}$)

Str = capacidade de saturação (mm)

kk = constante de recessão ($mês^{-1}$)

Ad = área de estudo (km^2)

A interação entre os dois reservatórios é dada através de 4 equações de transferência (LOPES, 1999), descritas nas equações 2.5 a 2.8.

$$E_s = T_{u}^{Pes} * P \quad (2.5)$$

$$E_r = T_u * E_p \quad (2.6)$$

$$Rec = C_{rec} * T_u^4 * R_{solo} \quad (2.7)$$

$$E_b = 1 - K_k * R_{sub} \quad (2.8)$$

Em que:

E_s = escoamento superficial ($m^3.s^{-1}$)

E_r = evapotranspiração real (mm)

Rec = recarga subterrânea (mm)

E_b = escoamento básico ($m^3.s^{-1}$)

C_{rec} = coeficiente de recarga (%)

P_{es} = escoamento superficial (ad)

T_u = taxa de umidade no mês (%)

Com os parâmetros de transferências definidos, estes são aplicados nas equações que redefinem os valores de cada reservatório. Os valores definidos para o escoamento superficial e básico serão utilizados para o cálculo da vazão, dada pela equação 2.10.

$$Q_{calc} = (E_s + E_b) * \frac{Ad}{2360} \quad (2.10)$$

Em que:

Q_{calc} = vazão calculada ($m^3.s^{-1}$)

2.4 Modelagem da concentração de fósforo total

Como visto no tópico 2.3 o modelo matemático, representa de forma simplificada os processos reais, a fim de favorecer o entendimento dos seus efeitos dentro da realidade. De acordo com CHAPRA (1997), a modelagem de qualidade da água é a representação idealizada da resposta que um sistema físico oferece ao receber estímulos externos.

Dentre os vários modelos de qualidade da água, temos o modelo de Vollenweider (1968), utilizado para calcular concentrações de fósforo em lagos, sendo caracterizado por ser de balanço de massa em regimes de mistura completa (TONÉ, 2016). No qual é representado, em seu estado permanente, na equação 2.11. Tal modelo, também foi utilizado por CHAPRA (1997), no intuito de verificar a dinâmica do fósforo em lagos temperados (TONÉ; LIMA NETO, 2018).

$$PT = \frac{W}{Q_s + kV} \quad (2.11)$$

$$P = P_0 e^{-\lambda t} + \frac{W}{\lambda V} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2.12)$$

$$\lambda = \frac{Q_s}{V} + k \quad (2.13)$$

$$k = \frac{4}{\sqrt{TR}} \quad (2.14)$$

$$TR = \frac{Q_e}{V} \quad (2.15)$$

Em que:

P = concentração de fósforo total ao longo do tempo (g/m^3)

P_0 = concentração de fósforo total no instante inicial (g/m^3)

W = carga de fósforo afluyente (ton/ano)

V = volume do reservatório (m^3)

t = tempo (ano)

λ = taxa de recuperação do corpo hídrico (ano^{-1})

Q_e = vazão de entrada do reservatório ($m^3.s^{-1}$)

Q_s = vazão de saída do reservatório ($m^3.s^{-1}$)

k = coeficiente de decaimento do fósforo (ano^{-1})

TR = tempo de residência hidráulica (ano)

O cálculo do coeficiente de decaimento do fósforo é adaptado para a região do semiárido, equação proposta por Toné (2016), no qual esta variável depende do tempo de residência hidráulica. Segundo este mesmo autor, tal adaptação é recorrente das altas taxas de evaporação e temperaturas médias, juntamente aos altos valores de tempo de residência hidráulica.

Neste contexto, as concentrações de fósforo total estarão ligadas ao tempo de retenção do açude. Em que este tempo de retenção indica o tempo que a água permanecerá no sistema, ou seja, quanto maior o tempo de retenção hidráulica, menor será a renovação da água. Para o estado do Ceará, a média para o tempo de retenção em reservatórios é de 400 dias (ANA, 2012), a depender da forma como estes locais são alimentados se por rios permanentes ou temporários.

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização da área de estudo

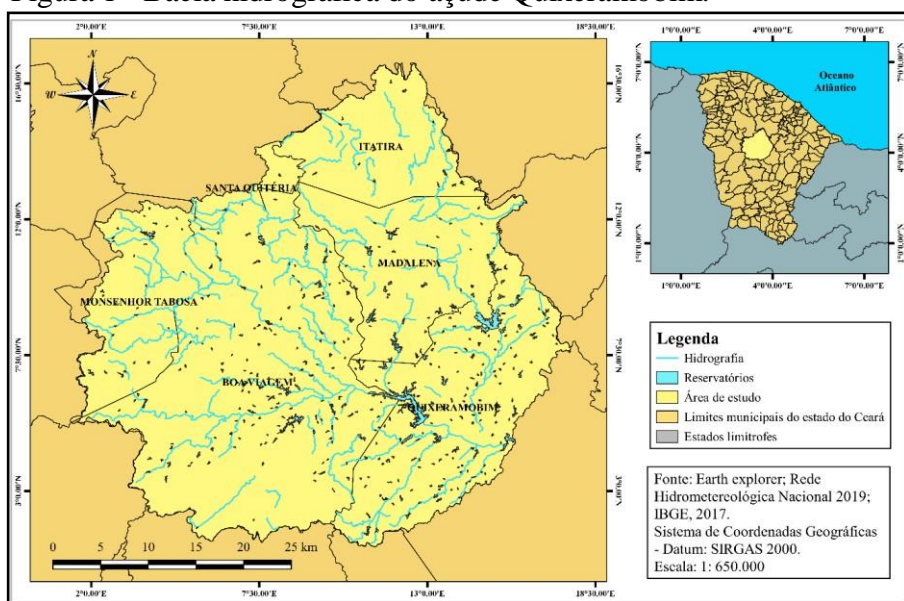
O açude Quixeramobim, com coordenadas de longitude 465009 e latitude 9425422, fica localizado no município de Quixeramobim, no estado do Ceará (COGERH, 2019), tendo como principal afluyente o rio Quixeramobim (COGERH, 2011). Sua construção foi concluída em 1960 realizada pelo Governo Federal através do Departamento Nacional de Obras contra as Secas (DNOCS).

Situado na Bacia Hidrográfica do Banabuiú, inserida na região semiárida, este reservatório tem a capacidade de 54.000.000,00 m^3 e uma altura máxima de 13,4 m, totalizando uma bacia hidráulica de 4.608 ha (IPECE, 2016; COGERH, 2011). Sua bacia hidrográfica, além de Quixeramobim, abrange também os municípios, Monsenhor Tabosa, Boa Viagem, Santa Quitéria, Itatita, Madalena (GOGERH, 2011).

A área de drenagem foi obtida a partir da delimitação realizado pelo *software* GRASS, presente no QGIS versão 3.10.3. Utilizando do mosaico oferecido pelo Modelo Digital de Elevação (MDE) a partir de dados SRTM. No qual, a área abrangeu aproximadamente 6988, 53 km², apresentada na Figura 1.

De acordo com o Inventário Ambiental do Açude Quixeramobim (2011), essa bacia hidrográfica possui um índice de compacidade de 1,58 e o fator forma de 0,58, equivalendo a uma boa distribuição de escoamento, oferecendo em períodos de grandes precipitações, baixo risco a enchentes.

Figura 1– Bacia hidrográfica do açude Quixeramobim.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

A seguir, na Tabela 2, é colocada a população de cada município que faz parte desta região. Os dados são de acordo com o Perfil Básico Municipal de 2017 (IPECE, 2018a; IPECE, 2018b; IPECE, 2018c; IPECE, 2018d; IPECE, 2018e; IPECE, 2018f), baseados no Censo Demográfico de 2010, feito pelo IBGE.

Tabela 2 – População dos municípios pertencentes a bacia do açude Quixeramobim.

| Município | População (Censo 2010) |
|------------------|------------------------|
| Boa Viagem | 54.049 |
| Itatira | 20.675 |
| Madalena | 19.800 |
| Monsenhor Tabosa | 17.038 |
| Quixeramobim | 78.658 |
| Santa Quitéria | 43.763 |

Fonte: IBGE (2010)

A bacia hidrográfica do açude Quixeramobim possui clima Tropical Quente Semiárido (IPECE, 2007a), com precipitação média de 668,54mm (COGERH, 2011). Como parte integrante do semiárido, o período chuvoso ocorre de dezembro a agosto, com maiores precipitações entre dezembro e abril e o período seco ocorre de agosto a novembro (MOURA, 2013). As temperaturas nesta região variam entre 22° a 28° (IPECE,2018a; IPECE, 2018b; IPECE,2018c; IPECE, 2018d; IPECE, 2018e; IPECE, 2018f). Como parte integrante da bacia do rio Banabuiú, essa região é caracterizada por déficit hídrico devido as baixas precipitações, altas temperaturas e taxas de evaporação. Sendo assim, as porcentagens maiores de escoamento se restringem ao período chuvoso.

A vegetação da região é composta pela Caatinga Arbustiva Densa, Floresta Caducifólia Espinhosa e Mata Úmida. O relevo é representado pela depressão sertaneja e maciços residuais, onde a declividade não excede os 15° na maior parte da região, entretanto observa-se pontos onde há uma variação de 30° e 60°. As altitudes variam de 190 m à pouco mais que 1100 m. A região é marcada pela predominância de rochas do embasamento cristalino e pequenas áreas com sedimentos detríticos conglomeráticos, arenosos e argilosos. Quanto ao tipo de solo é marcada pela presença de argissolos, luvisolos, neossolos, chernossolos e planossolos. (IPECE, 2007b; COGERH, 2011).

Esta região possui algumas fontes de contaminação pontuais e difusas, como lançamento de esgotos e resíduos sólidos, irrigação e agricultura (CSBH, 2009; COGERH, 2011). Além disso, há uma grande degradação ambiental devido ao crescimento populacional e consequente exploração de áreas terrestres (COGERH, 2011). Derivando também em grandes taxas de desmatamento, trazendo como consequências, enchentes e assoreamento, poluição dos mananciais, desertificação, etc.

3.2 Levantamento de dados

3.2.1 Dados de evapotranspiração

A evapotranspiração potencial é necessária para obtenção da evapotranspiração real utilizada pelo SMAP. Para obtê-la usou-se o método de Thortwaite (COLISCHONN E DORNELLES, 2013), em razão da reduzida quantidade de dados a serem utilizados.

$$E = 16 * \left[\frac{10 * T^a}{I} \right] \quad (3.1)$$

$$I = \sum_{j=1}^{12} \left[\frac{T_j^{1,514}}{5} \right] \quad (3.2)$$

$$a = 6,75 * 10^{-7} * I^3 - 7,71^{-5} * I^2 + 1,792 * 10^{-2} * I + 4,939 \quad (3.3)$$

Em que:

E = evapotranspiração potencial (mm. mês⁻¹)

T = temperatura média do mês (C°)

I = índice de calor da região

a = coeficiente dependente

Os dados para estimar a evapotranspiração potencial foram obtidos da base de dados do Instituto de Pesquisa e Meteorologia (INMET). Para a região em estudo há a influência de apenas uma estação, localizada em Quixeramobim. A série utilizada de temperatura contém um período de 1988 a 2020, com dados não contínuos.

3.2.3 Dados pluviométricos

Os dados pluviométricos foram extraídos do portal *Hidroweb*, da rede de monitoramento da Agência Nacional de Água (ANA). Inicialmente foram levantadas 40 estações dentro da área de estudo, nas quais permaneceram 14 com melhor série de dados, com o mínimo de 20 anos, no período de 1988 a 2019. Na Tabela 3 são listadas estas estações.

A fim de obter dados contínuos e determinar as precipitações inexistentes para este período, foi realizado o preenchimento de falhas pelo Método de Regressão Linear, e em seguida verificada a consistência por meio do Método de Dupla Massa. Definindo-se 13 estações pluviométricas para estudo, que são listadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Estações para cálculo da precipitação média.

| Código | Estação |
|--------|----------------------|
| 439012 | Lagoa do Mato |
| 439028 | Fazenda Monte Alegre |
| 439045 | Ibuaçu |
| 439061 | Lagoa do Mato |

| Código | Estação |
|---------------|----------------------|
| 439063 | Madalena |
| 440011 | Espírito Santo |
| 440029 | Monsenhor Tabosa |
| 539017 | Coroata |
| 539029 | Boa Viagem |
| 539066 | Passagem – Fogareiro |
| 539067 | São Miguel |
| 539068 | Manituba |
| 540039 | Barreiros |

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

Com isso aplicou-se o Método do Polígono de Thiessen para a calcular a média de precipitação sobre a bacia, utilizando o *software* QGis. Este método, equação 3.4, consiste na utilização da área de influência para cada posto escolhido para ponderar os dados.

$$P = \frac{\sum Ai * Pi}{A} \quad (3.4)$$

Em que:

P = precipitação média (mm)

Pi = média ponderada (mm)

A = área total da bacia (km²)

Ai = média ponderada (km²)

3.2.4 Dados fluviométricos

Os dados fluviométricos, da mesma forma que os dados pluviométricos, foram obtidos do portal *Hidroweb*. Para a área de estudo existe apenas a estação fluviométrica 3652000 contendo dados referentes a vazão (Q_{obs}), que abrange uma área de 7050 km². A série de dados corresponde ao período de 1986 a 2019, com presença de algumas falhas. No qual, para o preenchimento destas falhas foi utilizado o método de regressão linear.

3.2.5 Concentração de Fósforo Total

As concentrações de Fósforo total foram obtidas do banco de dados da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH), onde as coletas ocorrem trimestralmente. Os dados para o açude Quixeramobim estão disponíveis de 2009 a 2017,

com ausência em alguns meses. Neste caso, os dados foram considerados suficientes para os cálculos referentes à qualidade da água.

3.2.6 Vazão de saída dos reservatórios

A vazão de saída (Q_s) foi obtida do Portal Hidrológico do Ceará (CEARÁ, 2021). Neste caso, foi considerada a vazão regularizada de saída como o somatório do volume liberado com a vazão de sangria. Para efeito de cálculo, considerou-se também que esta vazão de saída, corresponde à vazão mensal média no reservatório estudado.

3.2.7 Volume médio do reservatório

O volume do reservatório Quixeramobim também foi obtido da base de dados da COGERH, sendo fornecidos na forma diária, no período de 1986 a 2018.

3.3 Modelagem do Sistema Chuva-Vazão

O modelo de chuva-vazão, SMAP, foi utilizado para calcular a vazão usada para estimar a carga poluidora no local em estudo. Entretanto, inicialmente é necessário que ele seja calibrado e validado para fornecer dados mais precisos. A calibração de um modelo consiste em sua automatização por meio do ajuste de seus parâmetros, a fim de melhorar a qualidade de simulação (FUJITA, 2018).

3.3.1 Calibração e Validação

O modelo SMAP pode ser calibrado e validado de forma automática e manual. Primeiramente, antes da calibração e validação do modelo, foram inseridos na planilha os valores para A_d , E_p , E_{bin} e T_{uin} . Em seguida, as séries geradas de P e Q_{obs} para o período de calibração escolhido e por último, as equações 2.1 a 2.10. É recomendado que o período de calibração seja iniciado em sequência de dias secos, pois deste modo, a umidade do solo e a vazão básica estarão com valores baixos (LOPES, 1990).

Na calibração automática é utilizada a ferramenta *Solver* do *Microsoft Excel*, os parâmetros calibrados são Str , kk e $Crec$, no qual apresentam limites de variação. Após um ajuste razoável destes três parâmetros de acordo com a função objetivo utilizada, todos os

parâmetros de entrada são calibrados, mas de forma manual. Isto ocorre por meio de “tentativa e erro” alterando cada parâmetro por vez, até que seja obtida uma boa calibração. Após esta etapa, é importante que o modelo seja validado para outro período a fim de calcular a previsão de vazão com os dados calibrados.

Durante estas etapas, é importante a análise da previsão da qualidade da vazão por meio do desempenho do modelo. Sendo utilizadas algumas funções-objetivo, neste estudo usou-se a correlação e o coeficiente de eficiência NASH-SUTCLIFFE (MORIASI *et al.*, 2007; BRIANEZI, 2015), definidos respectivamente nas equações 3.5 e 3.6. Estas funções irão verificar significância da variância residual, comparando com os dados medidos.

$$C = \text{correl} * \left(\frac{Q_{calc}}{Q_{obs}} \right) \quad (3.5)$$

$$NASH = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{calc})^2}{\sum(Q_{obs} - Q_{m_{obs}})^2} \quad (3.6)$$

Em que:

Q_{obs} = vazão prevista no dia (m^3/s)

$Q_{m_{obs}}$ = vazão média calculada a partir da vazão prevista (m^3/s)

O NASH varia entre $-\infty$ e 1, quanto mais próximo a 1 melhor a relação entre os dados. De acordo com Moriasi *et al.* (2007) valores entre 0 e 1 podem ser considerados aceitáveis, e que valores negativos consideram que os valores observados são melhores que os calculados, sendo inaceitável. Da mesma forma para a correlação, quanto mais próxima a 1 melhor será o desempenho, onde valores acima de 0,5 são considerados satisfatórios. No entanto, a correlação é sensível a grandes variações.

3.4 Geração de séries temporais para o fósforo total (PT)

A quantificação dos poluentes na região de estudo é apresentada em termos de cargas. Com auxílio da série de vazões geradas e calculadas através do modelo SMAP, estimou-se a carga poluidora na região da bacia hidrográfica do Açude Quixeramobim, através do Modelo de Vollenweider (1968), adaptado por Toné e Lima Neto (2020) contido na equação 2.12. O poluente analisado foi o fósforo total (PT).

Inicialmente, foi necessário a obtenção de dados característicos do açude importantes para a modelagem de PT, sendo: concentração de fósforo total, vazões de entrada e saída, carga afluyente e volume. Estes dados foram adquiridos nos processos 3.2.5 a 3.2.7 e

na modelagem pelo SMAP. A partir deles obteve-se também k e TR contidos na equação 2.14 e 2.15.

Como as concentrações de fósforo adquiridas eram medidas na saída do reservatório, necessitou-se da obtenção destes dados na área de entrada. Com isso, primeiramente, foi realizada a estimativa da carga afluyente do açude através da manipulação da equação 2.11, de acordo com a equação 3.7. O tempo de modelagem correspondeu a 11/03/2009 a 26/07/2017, por ser o período com dados disponíveis de fósforo total, variável importante para dar início a este processo.

$$W = (P - P_0 e^{-\lambda t}) * \frac{\lambda V}{(1 - e^{-\lambda t})} \quad (3.7)$$

Com isso, os valores de carga afluyente obtidos foram correlacionados com as vazões de entrada geradas pelo SMAP, neste mesmo período. Desta forma, a partir da correlação adquirida foram obtidos valores extrapolados desta carga para os anos de interesse deste trabalho. Por fim, com o período de estudo definido realizou-se a modelagem do fósforo total na área de entrada do açude.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta etapa é destinada a apresentação e discussão dos resultados referentes a modelagem realizada pelo SMAP (LOPES, 1999) com aplicação do modelo de Vollenweider (1968), modificado por Toné e Lima Neto (2020).

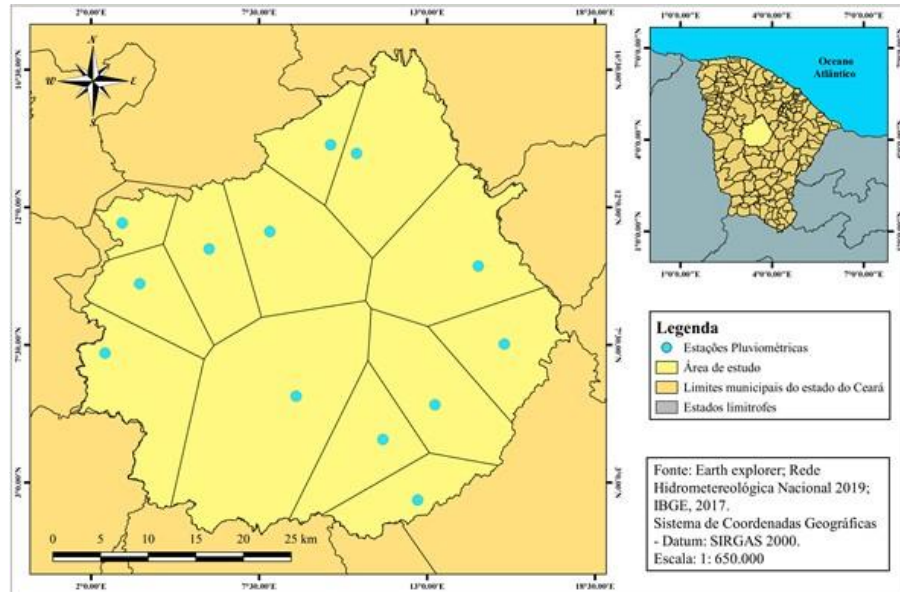
Primeiramente, são discutidos os processos para o levantamento de dados necessários para a calibração do modelo SMAP e logo em seguida os resultados referentes as séries de vazões geradas. Por fim, são expostos os dados necessários para o modelo de qualidade da água e os resultados referentes as concentrações de fósforo total calculadas.

4.1 Levantamento de dados

4.1.1 Dados de precipitação

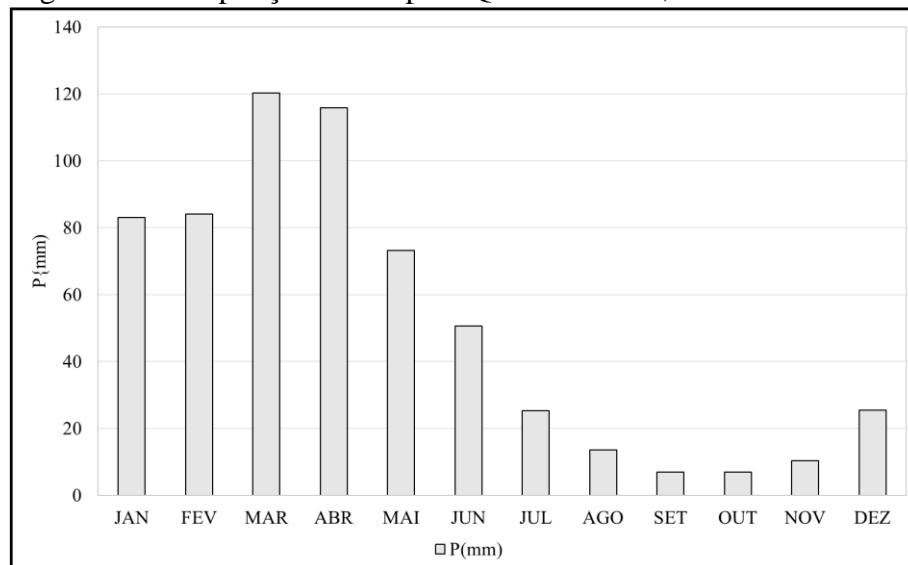
Os resultados das estações e suas áreas de influências são mostrados na Figura 2 e a precipitação média é apresentada na Figura 3.

Figura 2 – Thiessen para a área de estudo do açude Quixeramobim, localizado em Quixeramobim, Ceará.



Fonte: Elaborada pela autora (2021)

Figura 3 – Precipitação média para Quixeramobim, Ceará.



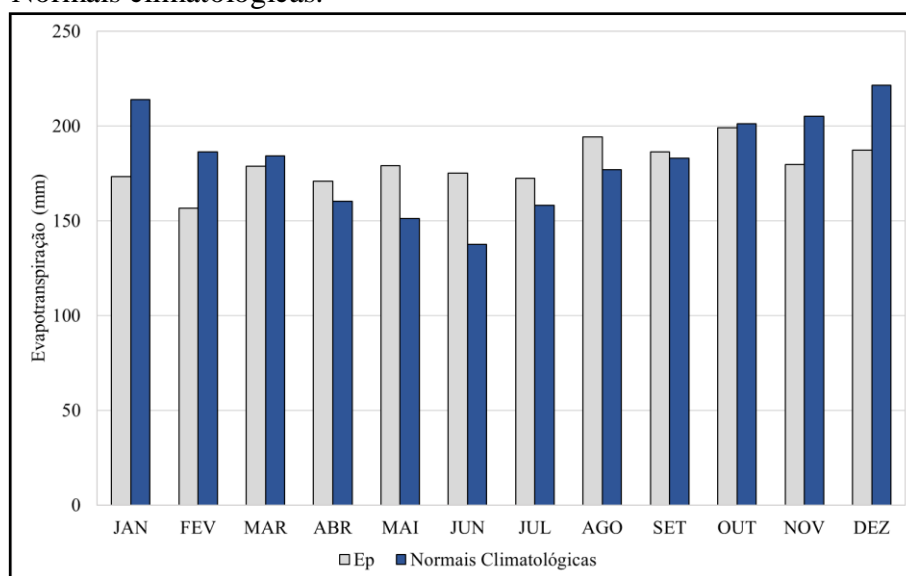
Fonte: Elaborado pela autora (2021)

É possível observar na Figura 3 que os meses de maior precipitação estão entre janeiro e maio, atingindo uma máxima de 120,32 mm em março. Logo em seguida ocorre redução na estação chuvosa para a região, onde há um decaimento destas precipitações chegando a mínima de 6,85 mm no mês de setembro.

4.1.2 Dados de evapotranspiração

A série gerada compreende os anos de 1988 a 2019 no qual a média ao longo deste tempo, relacionada com as Normais Climatológicas da estação de Quixeramobim (INMET, 2020), é apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Média de evapotranspiração para a região de Quixeramobim/CE pelo método de Thortwaite em comparação com as Normais climatológicas.



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

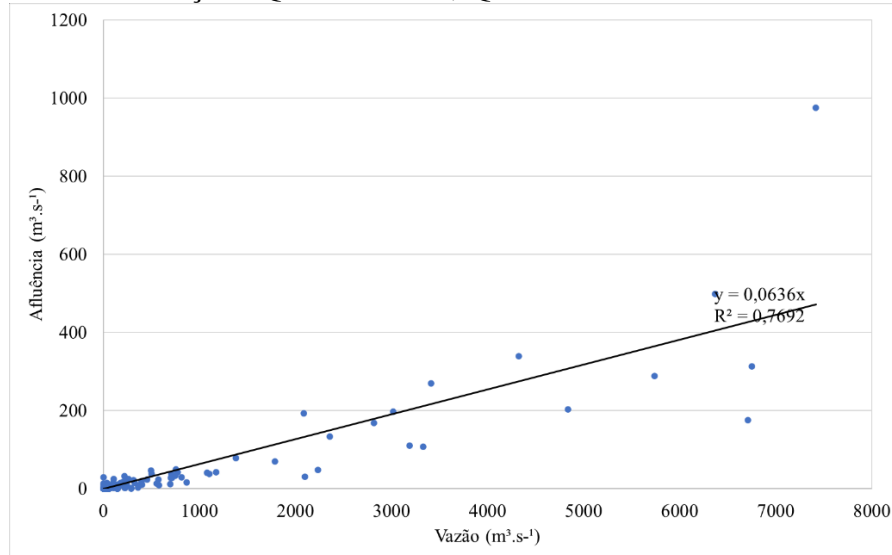
É visto que as médias de evapotranspiração potencial (Ep) através de Thortwaite tiveram pequenas variações ao longo dos meses, sendo algo esperado devido este método depender apenas da temperatura média do ar. Observa-se que as maiores taxas de Ep foram entre os meses de maio e outubro, atingindo um pico de 198,94 mm. Estes meses compreendem um baixo período chuvoso com altas taxas de temperaturas. Em comparação com as Normais Climatológicas que apresentam um valor máximo de 221,4 mm, é observado um comportamento aproximado entre os meses de novembro e abril.

4.1.3 Dados Fluviométricos

Devido a presença de falhas nos dados fluviométricos da estação 36520000, estes foram correlacionados com os dados de Afluência do açude, obtidos do Sistema da COGERH. O método utilizado para o preenchimento das falhas foi a Regressão Linear,

obtendo-se um valor de 0,76 para o R^2 , expressado na Figura 5. A partir desta análise gerou-se uma nova série de vazão no período de 1988 a 2019.

Figura 5 – Regressão linear entre vazão de entrada e vazão de afluência no açude Quixeramobim, Quixeramobim/CE.



Fonte: Elaborada pela autora (2021)

4.2 Modelagem do Sistema Chuva-Vazão

4.2.1 Calibração do modelo

Após a preparação dos dados de entrada do SMAP foi dado início ao processo de calibração e ajustes do modelo para a estação fluviométrica 36520000, localizada em Quixeramobim, Ceará. O período escolhido para esta etapa foi 01/01/1999 a 31/12/2019, por apresentar tempos de cheia e recessão.

Na etapa de calibração, os resultados finais dos parâmetros são apresentados na Tabela 4. Observou-se que durante este processo, os parâmetros da constante de recessão e de recarga subterrânea não apresentaram sensibilidade ao modelo, sendo mantidos os mesmos valores do padrão do modelo.

Tabela 4 - Parâmetros calibrados para a estação fluviométrica 36520000 em Quixeramobim/CE.

| Parâmetros e variáveis de entrada | Valores |
|-----------------------------------|---------|
| Taxa de umidade do solo | 0,1 |
| Escoamento de base | 0,0 |
| Constante de recessão | 3 |

| Parâmetros e variáveis de entrada | Valores |
|--|----------------|
| Capacidade de saturação | 3057 |
| Escoamento Superficial | 1,5 |
| Coeficiente de recarga subterrânea | 0 |

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Estes resultados, são em função dos valores obtidos das funções-objetivos utilizadas, que podem ser vistas na Tabela 5. No qual, foram os melhores valores ajustados para o período analisado.

Tabela 5 - Resultados para as funções-objetivo na calibração do modelo SMAP.

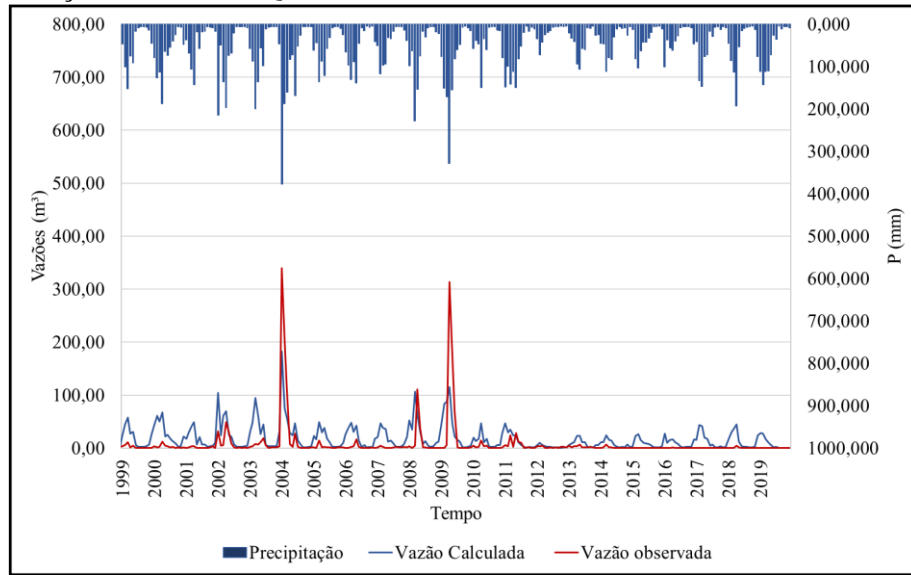
| Correlação | NASH |
|-------------------|-------------|
| 0,61 | 0,28 |

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Após cada ajuste, a correlação atingiu 0,61 de aproximação entre os dados, mostrando uma significativa relação entre as vazões calculadas e observadas. Neste caso, a correlação foi mantida como prioritária diante dos resultados analisados, com isso o valor de NASH permaneceu em 0,28, pois tal modificação acarretaria na redução da correlação.

Tais resultados foram verificados juntamente ao comportamento do gráfico representado na Figura 6. Observa-se que ao longo dos anos de 1999 a 2012 ocorre um comportamento aproximado entre os dados observados e calculados, apesar dos valores não serem exatamente os mesmos. As vazões de recessão se adequaram melhor em comparação com as vazões de pico, havendo melhor representatividade para o ano de 2004. Tal projeção foi a que melhor se adequou aos valores das funções-objetivo.

Figura 6 – Calibração do modelo de Chuva-Vazão SMAP para a estação 36520000, Quixeramobim, Ceará.

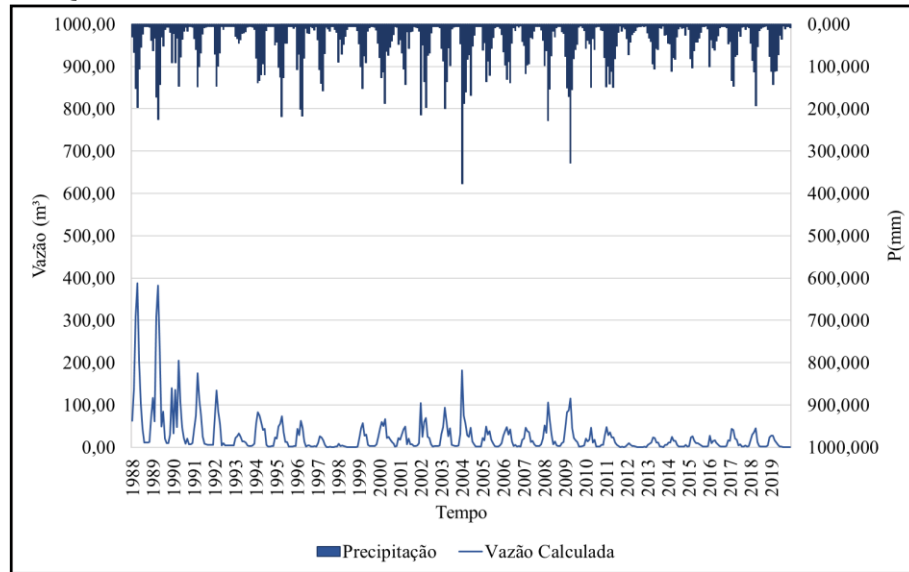


Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Na Figura 7, são apresentadas as séries geradas de vazão para a estação 36520000 após os parâmetros calibrados, no período de 1988 a 2019, em um total de 31 anos. É visto que para estes anos que os escoamentos ocorridos são proporcionais as precipitações, ou seja, com o aumento de chuvas consequentemente há maiores vazões.

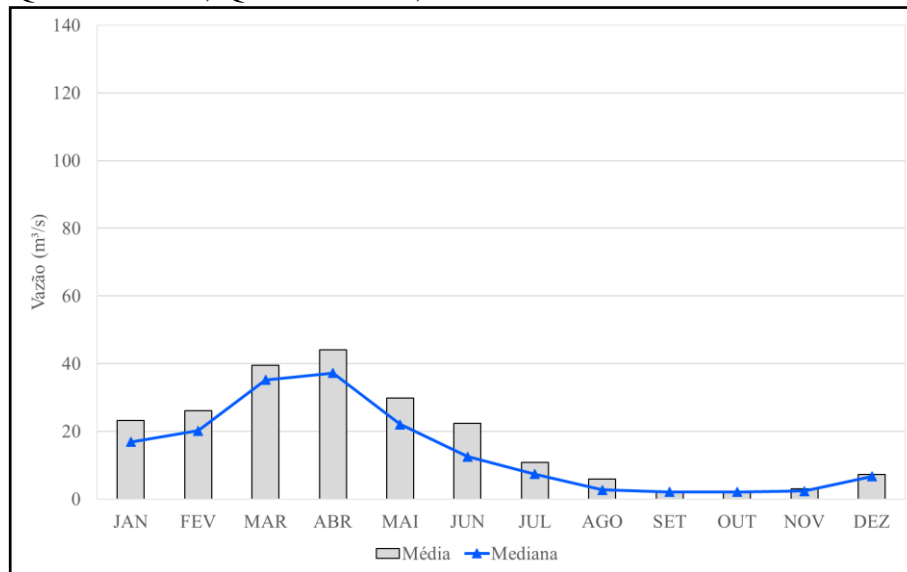
Em seguida, na Figura 8, é observada a variação das vazões calculadas em decorrência da sazonalidade, sendo representadas mensalmente sua média e mediana. É possível verificar que os maiores escoamentos ocorrem nos meses de fevereiro a abril, proporcionalmente ao maior período chuvoso na região, que é entre os meses de dezembro e abril (MOURA, 2013), onde atingiu-se uma vazão de $44 \text{ m}^3/\text{s}$. A partir de maio há um decaimento destas vazões, tendo uma leve ascensão em dezembro, onde a mínima atingida foi de $2,29 \text{ m}^3/\text{s}$ no mês de outubro.

Figura 7 – Série temporal gerada para a estação 36520000 localizada em Quixeramobim, Ceará.



Fonte: Elaborada pela autora (2021)

Figura 8 – Variação Sazonal da vazão de entrada do açude Quixeramobim, Quixeramobim, Ceará.



Fonte: Elaborada pela autora (2021)

4.3 Modelagem da carga poluidora

Após a obtenção da série temporal de vazões pelo SMAP, iniciou-se o processo de modelagem da taxa de fósforo total para o açude Quixeramobim. A primeira parte, correspondeu a obtenção da carga afluente, sendo necessário a obtenção de dados característicos do reservatório. O tempo de modelagem correspondeu ao período de 11/03/2009 a 26/07/2017 por abranger os dados disponíveis de fósforo total.

4.3.1 Concentração de fósforo total

Os dados de concentração de fósforo total e volume médio obtidos do banco de dados da COGERH para o açude Quixeramobim são expostos na Tabela 6. Os dados disponíveis correspondem aos meses de 11/03/2009 a 26/07/2017.

De acordo com a Resolução 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), corpos hídricos de água doce que não receberem seu enquadramento serão considerados como Classe 2 (BRASIL, 2005), incluindo assim o açude de Quixeramobim (CEARÁ, 2018). Desta forma, segundo esta mesma Resolução, o valor máximo de fósforo total para ambientes lênticos é 0,030 mg/L. Com isto, é perceptível que para os meses em análise todos, com exceção da data de 30/07/13, estão com valores excedentes ao permitido.

Tabela 6 – Dados de concentração de fósforo total no Açude Quixeramobim/CE.

| Data | P[t]mg/L | Data | P[t] mg/L | Data | P[t] mg/L |
|----------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 11/03/09 | 0,209 | 04/09/12 | 0,037 | 13/05/14 | 0,202 |
| 17/05/10 | 0,124 | 24/10/12 | 0,068 | 07/08/14 | 0,324 |
| 06/12/10 | 0,052 | 06/02/13 | 0,106 | 11/11/14 | 0,223 |
| 07/02/11 | 0,061 | 23/04/13 | 0,068 | 04/02/15 | 0,290 |
| 29/02/12 | 0,108 | 30/07/13 | 0,016 | 13/05/15 | 0,336 |
| 08/05/12 | 0,080 | 15/10/13 | 0,304 | 26/07/17 | 0,127 |

Fonte: COGERH (2021)

4.3.2 Vazão de entrada e saída do reservatório

Os resultados para a vazão de entrada e saída do reservatório estão contidos nas Tabelas 7 e 8. A vazão de entrada foi gerada da série temporal da transformação de chuva-vazão pelo SMAP e a vazão de saída de acordo com o tópico 3.2.6.

As vazões de entrada possuem maior regime entre dezembro e abril, como já mencionado no tópico 4.2.1 é o maior período chuvoso na região, consequentemente maior quantidade de vazão afluente ao açude. Nas vazões de saída a maior parte das médias fornecidas pelo Portal Hidrológico estavam zeradas.

Tabela 7 – Dados de vazão de entrada do reservatório Quixeramobim/CE.

| Data | Qe(m ³ /s) | Data | Qe(m ³ /s) | Data | Qe(m ³ /s) |
|----------|-----------------------|----------|-----------------------|----------|-----------------------|
| 11/03/09 | 86,55 | 04/09/12 | 1,01 | 13/05/14 | 14,71 |
| 17/05/10 | 11,01 | 24/10/12 | 0,83 | 07/08/14 | 1,17 |
| 06/12/10 | 28,40 | 06/02/13 | 8,78 | 11/11/14 | 6,32 |
| 07/02/11 | 29,29 | 23/04/13 | 23,02 | 04/02/15 | 22,99 |
| 29/02/12 | 9,95 | 30/07/13 | 11,06 | 13/05/15 | 10,35 |
| 08/05/12 | 2,67 | 15/10/13 | 0,97 | 26/07/17 | 7,20 |

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

Tabela 8 – Dados de vazão de saída do reservatório Quixeramobim/CE

| Data | Qs(hm ³ /mês) | Data | Qs(hm ³ /mês) | Data | Qs(hm ³ /mês) |
|----------|--------------------------|----------|--------------------------|----------|--------------------------|
| 11/03/09 | 0,00 | 04/09/12 | 0,00 | 13/05/14 | 0,00 |
| 17/05/10 | 0,13 | 24/10/12 | 0,00 | 07/08/14 | 0,00 |
| 06/12/10 | 0,00 | 06/02/13 | 0,00 | 11/11/14 | 0,00 |
| 07/02/11 | 0,03 | 23/04/13 | 0,02 | 04/02/15 | 0,00 |
| 29/02/12 | 0,02 | 30/07/13 | 0,00 | 13/05/15 | 0,00 |
| 08/05/12 | 0,07 | 15/10/13 | 0,00 | 26/07/17 | 0,00 |

Fonte: CEARÁ (2021)

4.3.3 Volume do reservatório e tempo de residência hidráulica

Nas Tabelas 9 e 10 estão listados respectivamente o volume médio e o tempo de residência hidráulico para o reservatório de Quixeramobim. O volume utilizado corresponde a dados diários no período analisado. A partir dos volumes e vazões de entrada adquirida do SMAP, foi obtido o tempo de residência hidráulica.

Tabela 9 – Volume médio no Açude Quixeramobim/CE.

| Data | V(m ³) | Data | V(m ³) | Data | V(m ³) |
|----------|--------------------|----------|--------------------|----------|--------------------|
| 11/03/09 | 6.080.718,00 | 04/09/12 | 5.549.242,00 | 13/05/14 | 4.716.728,00 |
| 17/05/10 | 7.880.000,00 | 24/10/12 | 5.049.740,00 | 07/08/14 | 3.459.818,00 |
| 06/12/10 | 5.792.839,00 | 06/02/13 | 3.513.290,00 | 11/11/14 | 2.332.705,00 |
| 07/02/11 | 7.125.008,00 | 23/04/13 | 4.137.154,00 | 04/02/15 | 1.431.614,00 |
| 29/02/12 | 5.947.853,00 | 30/07/13 | 6.368.613,00 | 13/05/15 | 1.233.900,00 |
| 08/05/12 | 6.036.435,00 | 15/10/13 | 4.332.663,00 | 26/07/17 | 241.995,00 |

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

Tabela 10 – Tempo de residência hidráulica.

| Data | TR (anos) | Data | TR (anos) | Data | TR (anos) |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 11/03/09 | 0,0022 | 04/09/12 | 0,1745 | 13/05/14 | 0,0102 |
| 17/05/10 | 0,0227 | 24/10/12 | 0,1928 | 07/08/14 | 0,0941 |
| 06/12/10 | 0,0065 | 06/02/13 | 0,0127 | 11/11/14 | 0,0117 |
| 07/02/11 | 0,0077 | 23/04/13 | 0,0057 | 04/02/15 | 0,0020 |
| 29/02/12 | 0,0190 | 30/07/13 | 0,0183 | 13/05/15 | 0,0038 |
| 08/05/12 | 0,0718 | 15/10/13 | 0,1420 | 26/07/17 | 0,0011 |

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

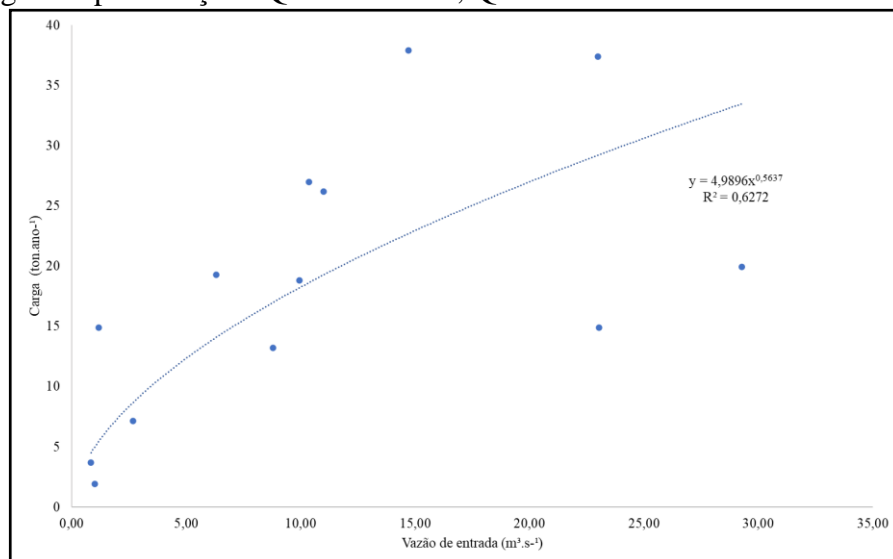
Comparando-se os meses presentes na Tabela 9, é visto que os maiores valores estão entre os meses de agosto e outubro, atingindo maior tempo de residência hidráulica em 24/10/12 com valor de 0,1928.

4.3.4 Carga afluyente de fósforo

A carga afluyente de fósforo inicialmente foi obtida da manipulação da equação 2.11, de acordo com a equação 3.7. Os dados utilizados estão contidos nos tópicos 4.3.1 a 4.3.3, no período mensal de 11/03/2009 a 26/07/2017.

Desse modo, com os dados calculados de carga afluyente, foi gerada uma correlação com a vazão de entrada gerada pelo SMAP neste mesmo período. O resultado pode ser visto na Figura 9. A correlação foi do tipo potência, por apresentar a melhor aproximação de dados e valor considerável para o coeficiente de determinação R^2 , obtendo-se 0,62.

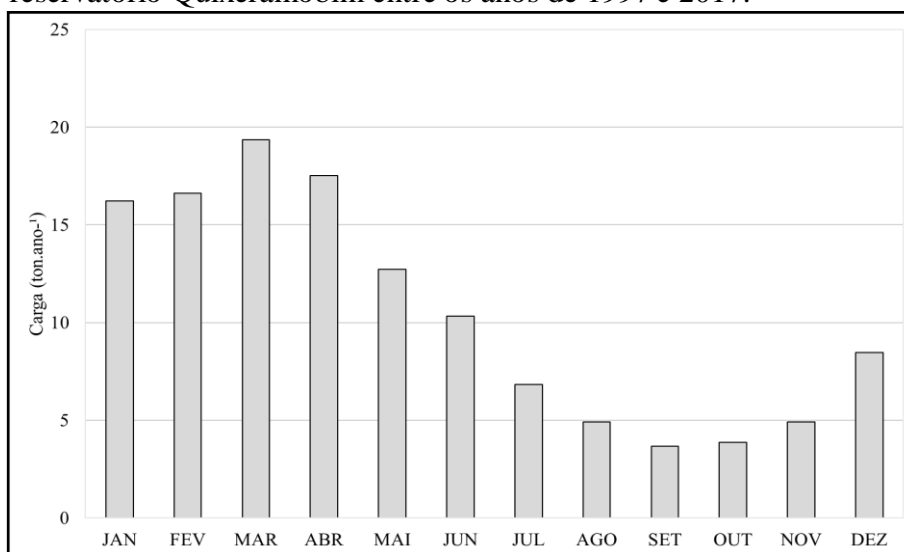
Figura 9 – Correlação de dados de carga afluyente e vazão de entrada gerada para o açude Quixeramobim, Quixeramobim/CE.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A partir desta correlação realizou-se a expansão de dados de carga para o período de 1997 a 2017, em um total de 20 anos. Na Figura 10, estão contidas as médias mensais referentes a esta distribuição, onde pode ser visto os maiores valores nos meses de março e abril, meses de período chuvoso. Atingiu-se a máxima de 19,36 ton/ano no mês de março e a mínima de 3,67 ton/ano em setembro.

Figura 10 – Expansão mensal média de carga afluyente de fósforo no reservatório Quixeramobim entre os anos de 1997 e 2017.

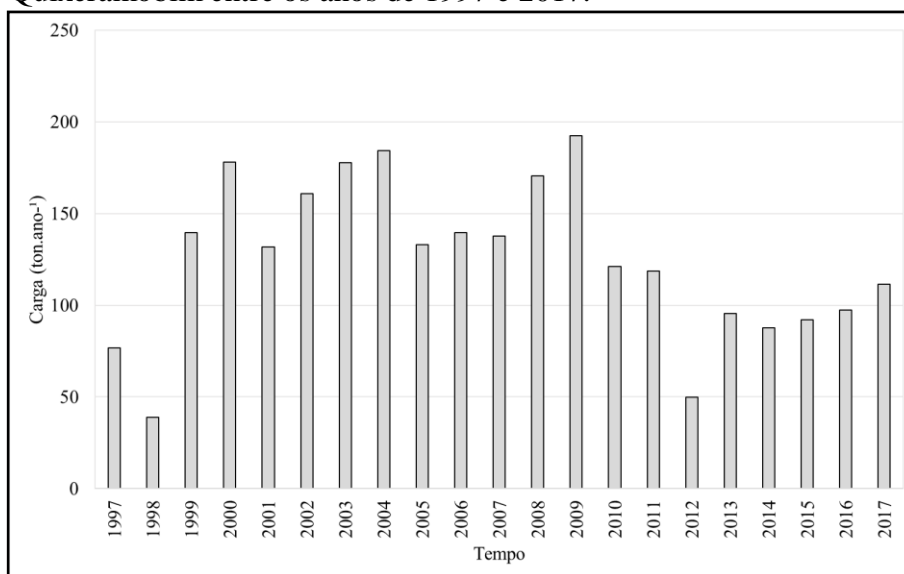


Fonte: Elaborada pela autora (2021)

Na Figura 11, as cargas são colocadas de forma anual, onde a soma atingiu 192,72 ton/ano no ano de 2009, para a carga de contribuição do fósforo. Tal resultado permanece acima dos adquiridos nos estudos realizados para o Inventário Ambiental do Açude Quixeramobim (COGERH, 2011), onde calculou-se um total de 29,75 ton/ano, este valor correspondeu a amostra do mês novembro. Da mesma forma, em comparação aos estudos realizados na bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio (LIMA; MAMEDE; LIMA NETO, 2018), que apresentou uma contribuição de 13,7 ton/ano. Em relação as análises realizadas no açude Rivaldo de Carvalho (COGERH, 2011), este resultado se mantém abaixo, pois apesar deste açude possuir uma área de contribuição menor apresentou valores acima de 1000 ton/ano de fósforo.

Para a bacia hidrográfica do açude Quixeramobim, segundo a COGERH (2011), isto é relacionado a atividades de pecuária, agricultura, lançamentos de esgotos, entre outras. Havendo uma porcentagem de contribuição de 33% da agricultura.

Figura 11 – Expansão anual de carga afluyente ao reservatório Quixeramobim entre os anos de 1997 e 2017.



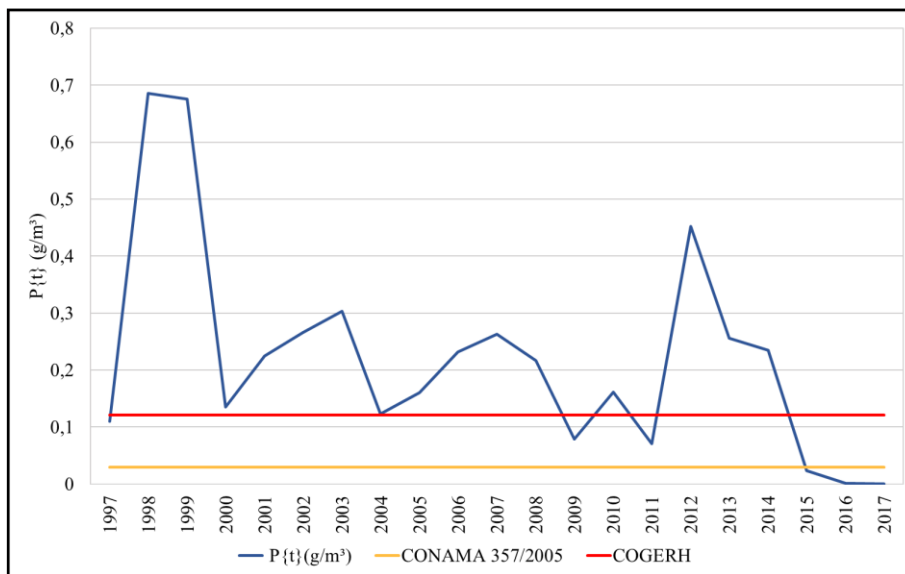
Fonte: Elaborada pela autora (2021)

4.3.5 Concentração de fósforo total expandida

Com a geração da série temporal da carga afluyente no período de 1997 a 2017, foi estimada a concentração de fósforo neste mesmo período através da equação 2.11, no qual as médias anuais e mensais são observadas, respectivamente, nas Figura 12 e 13. Tais resultados são comparados a média anual e as concentrações estabelecidas pela resolução CONAMA 357/2005. Para esta estimativa usou-se como ponto inicial a média de concentração no valor de 0,2 g/m³.

Na figura 12, são apresentados os valores de médias anuais de concentração de fósforo ao longo dos anos de 1997 a 2017. O valor máximo atingido correspondeu ao ano de 1998, com 0,68 g/m³. Em relação aos valores estabelecidos pela CONAMA 357/2005 quase todos os anos apresentaram médias anuais acima do valor limite. Para a região do semiárido, o comportamento de PT em comparação ao estudo realizado na bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio (LIMA; MAMEDE; NETO, 2018), onde obteve-se 0,56 mg/L para concentração do fósforo, apresenta-se abaixo deste valor ao longo da maioria dos anos analisados. Em relação ao açude Cruzeta (FREITAS, 2008) com média de 0,146 mg/L os valores obtidos apresentam limites acima.

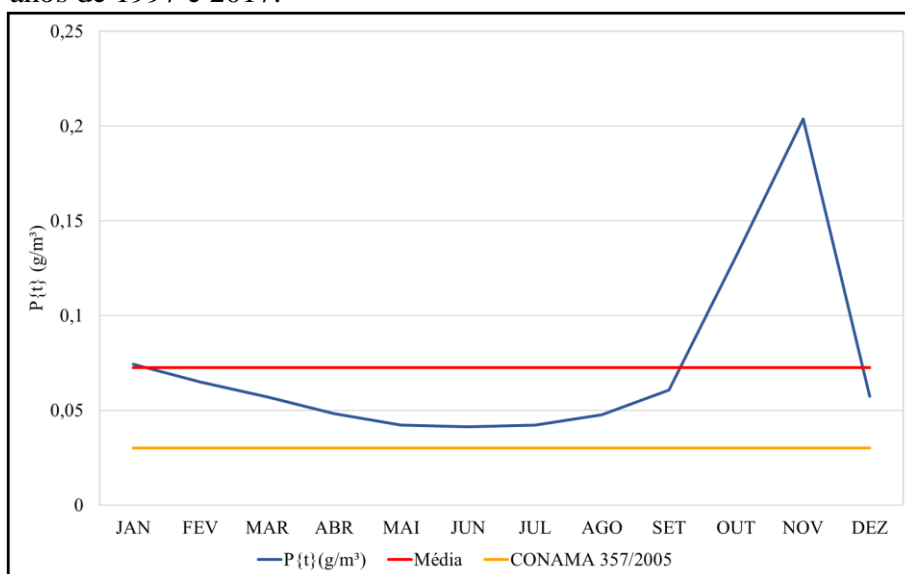
Figura 12 – Média anual de concentração de fósforo total entre os anos de 1997 e 2017.



Fonte: Elaborada pela autora (2021)

De acordo com a Figura 13 é visto que as concentrações de fósforo variaram de fósforo total foram de 0,121mg/L, mantendo-se entre as estimativas adquiridas neste estudo. Segundo a CONAMA 357/2005 que estabelece valores de 0,03 mg/L de PT em ambientes lênticos, observa-se que os valores estimados para o açude Quixeramobim, encontram-se acima do valor limite, sendo que o valor máximo atingido (0,203 g/m³) é quase 700% vezes maior ao estabelecido.

Figura 13 – Média mensal de concentração de fósforo total entre os anos de 1997 e 2017.

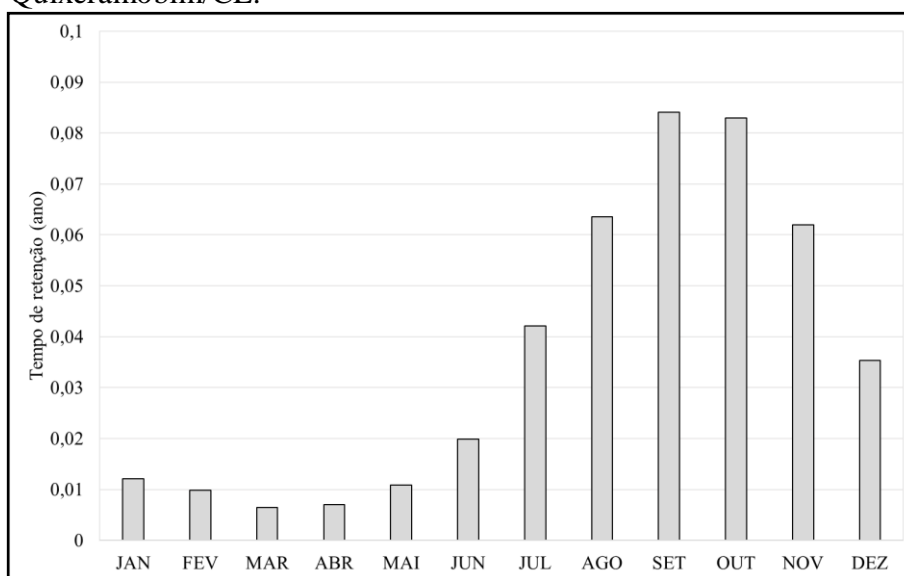


Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Ainda de acordo com a Figura 13 é possível observar que nos primeiros meses até julho há um decaimento na concentração de fósforo e logo em seguida uma ascensão até o mês de novembro. Altas concentrações no segundo semestre podem ser em vista do maior tempo de retenção do açude neste período, observado na Figura 14, reduzindo assim o tempo de renovação da água do local (WEIGAND *et. al.*, 2016), o que favorece maior concentração de nutrientes acumulados, neste caso o fósforo total. Tal processo, sendo favorecido pela redução do volume do açude, devido as baixas precipitações neste mesmo período (CAVALCANTE; ARAÚJO; BECKER, 2018). Em contrapartida, no primeiro semestre a diminuição nas concentrações de fósforo são acompanhadas pelo aumento das vazões de entrada e também de carga afluente no reservatório, visto na Figura 15, em um processo de diluição simples dessas concentrações (ROCHA; LIMA NETO, 2020).

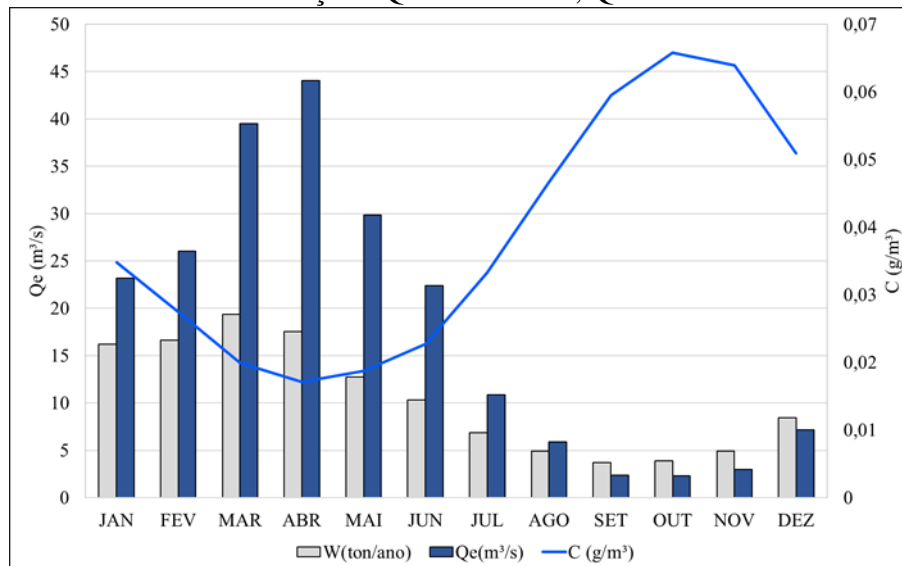
Conforme estudos realizados nos açudes Gargalheiras e Cruzeta (CAVALCANTE; ARAÚJO; BECKER, 2018) na região semiárida do Rio Grande do Norte, em que para PT foram obtidas, respectivamente, médias 0,744 mg/L e 0,559 mg/L, observou-se que houve maiores concentrações deste nutriente, durante os meses de seca, à medida que estes açudes reduzem o volume. Da mesma forma, na análise de 18 reservatórios do Ceará (ROCHA; LIMA NETO, 2021), mesmo não havendo grande diferença das concentrações de PT entre o período úmido e de seca, houve levemente uma quantidade maior de nutrientes no período de estiagem.

Figura 14 – Tempo de retenção mensal para o açude Quixeramobim, Quixeramobim/CE.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Figura 15 – Relação entre vazões, carga afluente e concentrações de fósforo na entrada do Açude Quixeramobim, Quixeramobim/Ceará.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

5 CONCLUSÃO

O estudo teve como enfoque a estimativa da concentração de carga poluidora de fósforo total em uma bacia hidrográfica rural a partir da análise hidrológica. A área delimitada para estudo abrangeu aproximadamente 6988,53 km². O modelo hidrológico SMAP mostrou-se sensível a calibração e validação. Foi verificado um desempenho moderado para este modelo, diante dos resultados obtidos pelas funções-objetivo, o coeficiente de NASH e a correlação obtiveram os valores de 0,28 e 0,61 respectivamente. Com isso, observou-se uma aproximação considerada razoável entre as vazões observadas e calculadas. A partir do gráfico gerado foi visto pouca sobreposição de vazões nos períodos de pico e recessão. Tais resultados podem ter sido em vista da qualidade dos dados e período em análise.

Na geração de cargas poluidoras, as médias de concentração de fósforo variaram mensalmente entre 0,04 g/m³ a 0,203 g/m³, havendo maiores concentrações no período de seca. Como já citado, tal comportamento pode ser em vista do aumento do tempo de residência hidráulico, favorecido pelas baixas precipitações e conseqüentemente redução do volume do açude, sendo acentuada pelas atividades locais, a exemplo da irrigação e agricultura que ocorrem periodicamente. Estes resultados quando comparados aos dados

propostos pela CONAMA 357/2005 para ambientes lênticos de Classe 2, tornam-se acima do limite permitido.

Tais resultados, mostram que a metodologia utilizada pode contribuir com o gerenciamento qualitativo dos recursos hídricos, no monitoramento e quantificação do excesso de nutrientes da água. Com isso, podem ser propostas novas sugestões para trabalhos futuros, entre elas:

- Definir uma base cartográfica desta área que possibilite a análise de aspectos hidrológicos e ambientais, a fim de compreender o comportamento da bacia hidrográfica.
- Estabelecer relações empíricas entre as cargas poluidoras e as variáveis sanitárias presentes na bacia hidrográfica;
- Compreender os padrões da bacia a partir da análise dos cenários de qualidade da água de acordo com a variabilidade climática.

REFERÊNCIAS

- ANA. Agência Nacional das Águas. **A questão da água no Nordeste**. Brasília, 2012. 436p.
- ANA. Agência Nacional das Águas. **Cuidando das águas: soluções para melhorar a qualidade dos recursos hídricos**. Brasília, 2013.
- ANA. Agência Nacional das Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2018: informe anual**. Brasília, 2018.
- ANDRADE, E. M. *et al.* Balanço de nitrogênio e fósforo em um reservatório no semiárido tropical. **Revista Ciência Agronômica**. Fortaleza, v. 51, n. 1, mar. 2020. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-66902020000100420 Acesso em: 06 mai. 2020.
- BARROS, A. M. L.; **Modelagem da poluição pontual e difusa: aplicação do modelo Moneris à Bacia hidrográfica do rio Ipojuca**. 2008. 193f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **nº 001, de 23 de janeiro de 1986**. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para o Relatório de Impacto Ambiental - RIMA. Brasília, DF, 1986. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html> Acesso em: 30 mai. 2020.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **nº 357, de 18 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, DF, 2005. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459> Acesso em: 24 abr 2021.
- BRASIL. **Lei nº 9433, 08 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm Acesso em: 10 ago. 2020.
- BRIANEZI, T. R.; **Aplicação do SMAP para a Bacia do Rio Tietê**. 2015. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) — Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2015.
- CAVALCANTE, H. ARAÚJO, F. BECKER, V. Dinâmica do fósforo na água de reservatórios do semiárido tropical em período prolongado de seca. **Acta limnol. Bras.** Rio Claro, v.30, out. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s2179-975x1617> Acesso em: 28 abr. 2021.
- CEARÁ, G.E. Secretária dos Recursos Hídricos. **Plano de ações de recursos hídricos do estado do Ceará**. Fortaleza: SRH, 2018.

CEARÁ. **Portal hidrológico do Ceará**. 2021. Disponível em: http://www.hidro.ce.gov.br/hidro-ce-zend/hidro-ce-zend/acude/aporte/mensal?validado=&reservatorio=16&data_ini=01%2F01%2F2008&data_fim=09%2F06%2F2008 Acesso em: 30 mar. 2021.

CHAPRA, Steven C. **Surface water-quality modeling**. Wavelend Press, 1997. 844p.

COGERH. Companhia de Gestão de Recursos Hídricos. **Qualidade da água dos açudes monitorados pela COGERH em 11/2020**. Relatório final. Fortaleza: COGERH, 2020.

COGERH. Companhia de Gestão de Recursos Hídricos. **Inventário Ambiental açude Quixeramobim**. Fortaleza, 2011.

COGERH. Companhia de Gestão de Recursos Hídricos. **Inventário Ambiental açude Rivaldo Pereira**. Fortaleza, 2011.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. Porto Alegre, 2013. 335p.

CSBH. Comitê da Sub-Bacia Hidrográfica do Banabuiú, 2009. Sub-Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú – Características Gerais. Disponível em: <https://www.srh.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/90/2018/07/Caracteriza%C3%A7%C3%A3o-da-Bacia-Hidrogr%C3%A1fica-Banabui%C3%BA.pdf> Acesso em: 10 ago. 2020.

FIGUEIRÊDO, M. C. B. et al. Avaliação da vulnerabilidade ambiental de reservatórios à eutrofização. **Engenharia Ambiental e Sanitária**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 4, 399-409, out./dez. 2007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522007000400006> Acesso em: 07 mai. 2020.

FILHO, A. J. P. et al. Sistema integrado de estimativa de previsão de precipitações para bacias hidrográficas da CESP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 12, n. 4, 529-552, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/mDgGx44SYqkDW7LgTgBxjrN/?lang=pt> Acesso em: 22 jul. 2021.

FUJITA, T. **Calibração e modelação de um modelo hidrológico para a Bacia Hidrográfica do Rio Ivaí**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2018.

FREITAS, F. R. S. **Eutrofização do reservatório Cruzeta na bacia representativa do rio Seridó – RN**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Tabelas de estimativas da população residente no Brasil e Unidades da Federação em 01/07/2019**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?edicao=25272&t=resultados> Acesso em: 26 mai. 2020.

INMET. Instituto de Pesquisa Nacional de Meteorologia. **Dados de temperatura**. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/> Acesso em: 27/02/2021.

INMET. Instituto de Pesquisa Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas**. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/servicos/normais-climatolo%C3%B3gicas> Acesso em: 24 abr 2021.

IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Caracterização Territorial. Tipos Climáticos**. 2007a. Disponível em: <http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12/126.htm> Acesso em: 23 abr. 2021.

IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Caracterização Territorial. Classes de solos**. 2007b. Disponível em: <http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12/124.htm> Acesso em: 23 abr. 2021.

IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Região semiárida cearense**. 2016. Disponível em: https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2014/02/TD_76.pdf Acesso em: 23 abr. 2021.

IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Perfil Municipal 2017 Boa Viagem**. Fortaleza: IPECE, 2018a.

IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Perfil Municipal 2017 Itatira**. Fortaleza: IPECE, 2018b.

IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Perfil Municipal 2017 Madalena**. Fortaleza: IPECE, 2018c.

IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Perfil Municipal 2017 Monsenhor Tabosa**. Fortaleza: IPECE, 2018d.

IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Perfil Municipal 2017 Quixeramobim**. Fortaleza: IPECE, 2018e.

IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Perfil Municipal 2017 Santa Quitéria**. Fortaleza: IPECE, 2018f.

LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia de corpos d'água no estado de São Paulo: Avaliação de métodos de monitoramento**. 2004. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Ecossistemas Terrestres e Aquáticos) — Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2004.

LARENTIS, D. G. **Modelagem matemática da qualidade da água em grandes bacias: sistema Taquari-Antas-RS**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

LIMA, B. P.; MAMEDE, G. L.; LIMA NETO, I. E., Monitoramento e modelagem da qualidade da água em uma bacia hidrográfica semiárida. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. Rio de Janeiro, v.23 n.1, p. 125-135, jan/fev 2018. DOI: 10.1590/S1413-41522018167115. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-41522018167115> Acesso em: 28 abr. 2021.

LOPES, J. E. G. **Manual do Modelo SMAP**. 1999.

MARQUES, F. A. *et. al.* **Solos do Nordeste**. Recife: EMBRAPA, 2014.

MENEZES, J. P. C. *et al.* Relação entre padrões de uso e ocupação do solo e qualidade da água em uma bacia hidrográfica urbana. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. Rio de Janeiro, v. 21 n. 3, p. 519-534, jul./set 2016. DOI: 10.1590/S1413-41522016145405. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016145405>. Acesso em: 05 mai. 2020.

MESQUITA, J. B. F.; PEREIRA, S. P.; LIMA NETO, I. E. Modelagem da drenagem urbana e avaliação das cargas bacteriológicas na Vertente Marítima de Fortaleza, Ceará. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, 205-216, jan./fev. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-41522020189161> Acesso em: 06 mai. 2020.

MESQUITA, T. P. N. **Eutrofização e a capacidade de carga do fósforo de seis reservatórios da bacia do rio Seridó, Região Semiárida do estado do RN**. 61 f. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

MORIASI, D. N. *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 3, 885-900, 2007. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/media/1312/moriasimodeleval.pdf> Acesso em: 10 jul. 2020.

MOURA, I. B. M. **Estudos das águas da Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú no trecho entre Quixeramobim e Banabuiú**. 244f. 2013. Tese (Doutorado em Geologia) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

PAIVA, L. F. G. **Interferência da previsão climática de vazões e suas consequências para a operação e planejamento do sistema interligado nacional: aplicação na Bacia do Rio São Francisco**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

PINHEIRO, M. I. T. **Segurança da água em bacias hidrográficas: formulação de um modelo institucional**. 2015. 221f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

PRODANOFF, J. H. A. **Avaliação Difusa Gerada por Enxurradas em Meio Urbano**. 2005. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) — Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

RÊGO, F. L. M. **Avaliação dos impactos ambientais no Reservatório Encanto**. 2016. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

RENNÓ, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas**. 158 p. Tese Doutorado em Sensoriamento Remoto) — Sensoriamento Remoto. INPE, São José dos Campos, 2003.

ROCHA, M. J. D.; LIMA NETO, I. E. Phosphorus mass balance and input load estimation from the wet and dry periods in tropical semiarid reservoirs. **Environmental Science and Pollution Research**. v.1 Disponível em: <https://www.researchsquare.com/article/rs-352835/v1> Acesso em: 08 abr. 2021.

ROCHA, M. J. D.; LIMA NETO, I. E. Relação entre fósforo total e vazão afluente nos principais reservatórios rurais do estado do Ceará no semiárido brasileiro. **Revista AIDIS**. V. 13, n.3, p. 715-730, dez. 2020. Disponível em: <http://www.revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/68153> Acesso em: 23 jul. 2021.

ROCHA, S. A.; LOUGON, M. S.; GARCIA, G. O. Influência de diferentes tipos de poluição no processo de eutrofização. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável Grupo Verde de Agricultura Alternativa (GVAA)**, Mossoró, v.4, n.4, p. 01-06, out./dez. 2009. Disponível em: <https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/207/207> Acesso em: 07 mai. 2020.

ROCHA, S. M. G.; MESQUITA, J. B. F.; LIMA NETO, I. E. Análise e modelagem das relações entre nutrientes e fitoplâncton em reservatórios no Ceará. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais** (Online). n.54, p. 134-147, dez. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820190536> Acesso em: 10 ago. 2020.

SILVEIRA, C. *et. al.* Mudanças climáticas e o setor hidroelétrico brasileiro: uma análise com base em modelos do IPCC-AR5. **Brazilian Journal of Environmental Sciences** (Online). n. 47, 46-60, mar. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820180210> Acesso em: 22 jul. 2021.

SOUZA, F. A. R. **Modelagem espacial da qualidade da água usando geotecnologias na Bacia Hidrográfica de Santana-RJ**. 168 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) — Engenharia Civil. UFRJ/COOPE, Rio de Janeiro, 2017.

SUDENE. Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste. **Resolução nº 107/2017**. Estabelece critérios técnicos e científicos para delimitação do Semiárido Brasileiro e procedimentos para revisão de sua abrangência. Disponível em: <http://sudene.gov.br/images/2017/arquivos/Resolucao-107-2017.pdf> Acesso em: 26 mai 2020.

TOLEDO, C. E. de. **Conectividade hidrológica em ambiente semiárido: estudo de caso Bacia Hidrográfica do Açude Orós**. 136f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) — Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

TONÉ, A. J. A. **Análise e modelagem de fósforo em reservatórios localizados em regiões semiáridas**. 2016. 173f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

TONÉ, A. J. A, LIMA NETO. I. E. Modelagem simplificada do fósforo total em lagos e reservatórios brasileiros. **Revista DAE**. São Paulo, v. 68, n. 221, 142-156, 2018.

VIDAL, T. F., NETO, J. C. Dinâmica de nitrogênio e fósforo em reservatório na região semiárida utilizando balanço de massa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 18, n. 4, 402-407, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000400007> Acesso em: 10 jul. 2020.

VILELA, M. A. M. A. **Metodologia para monitoramento da qualidade da água de reservatórios utilizando sensoriamento remoto**. 2010. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2010.

VON SPERLING, M. **Introdução a qualidade da água e ao tratamento de esgotos: princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. 2. ed. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 1996. 1 v. 243 p.

WIEGAND, M.C.; PIEDRA, J.I.G.; ARAÚJO, J.C. Vulnerabilidade à eutrofização de dois lagos tropicais de climas úmido (Cuba) e semiárido (Brasil). **Engenharia Sanitária e Ambiental**. Rio de Janeiro, v. 21, n. 2, p. 415-424, abr./jun. 2016. DOI: 10.1590/S1413-41522016139527. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-41522016139527> Acesso em: 07 mai. 2020.