



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JOÃO BATISTA DE SOUSA RAULINO

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE A
QUALIDADE DA ÁGUA DE RESERVATÓRIOS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

FORTALEZA

2021

JOÃO BATISTA DE SOUSA RAULINO

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE A
QUALIDADE DA ÁGUA DE RESERVATÓRIOS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto.

Coorientador: Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira

FORTALEZA

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)

R189a Raulino, João Batista de Sousa.
Avaliação dos impactos das mudanças climáticas sobre a qualidade da água de reservatórios do semiárido brasileiro / João Batista de Sousa Raulino. – 2021.
87 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto.
Coorientação: Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira.

1. Mudanças climáticas. 2. Eutrofização. 3. Bacia semiárida. I. Título.

CDD 627

JOÃO BATISTA DE SOUSA RAULINO

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE A
QUALIDADE DA ÁGUA DE RESERVATÓRIOS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos

Aprovada em: 11/02/2021

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr^a. Ticiane Marinho de Carvalho Studart (Examinador Interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Alexandre Cunha Costa (Examinador Externo)
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

A minha mãe, Lili.

Aos meus irmãos e sobrinhos.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, Lili, aos meus irmãos, Leila, Eliane, Nonato, Lilia, Francisco e Michele, pelo incentivo e apoio incondicional nos meus estudos, mesmo diante de tantas dificuldades.

Ao Prof. Iran Eduardo Lima Neto, pelo incentivo, paciência, ensinamentos e prazer em transmitir seu conhecimento e apontar caminhos.

Ao Prof. Cleiton da Silva Silveira, pela contribuição essencial no desenvolvimento deste trabalho e dicas valiosas.

À Prof^a. Vanda Tereza Costa Malveira, pela minha inserção na pesquisa e responsável pela minha primeira bolsa de iniciação científica na graduação.

A Prof^a. Ticiania Marinho de Carvalho Studart e ao Prof. Alexandre Cunha Costa pela disponibilidade de participar da banca, além das sugestões valiosas.

Aos amigos do mestrado.

Aos professores do POSDEHA.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação Científica de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Não é a terra que é frágil. Nós é que somos frágeis. A natureza tem resistido a catástrofes muito piores do que as que produzimos. Nada do que fazemos destruirá a natureza. Mas podemos facilmente nos destruir.”

(James Lovelock)

RESUMO

A qualidade da água de lagos e reservatórios tem sido identificada como potencialmente vulnerável às mudanças climáticas. Este estudo tem como objetivo investigar os impactos das mudanças climáticas sobre a qualidade da água de reservatórios do semiárido brasileiro. Empregou-se uma abordagem integrada de modelos climáticos, hidrológico e qualidade da água. Parte das simulações revelou impacto significativo de decréscimo da vazão afluyente e, consequentemente, do volume armazenado. Os reservatórios tomados com estudos de caso (Castanhão e Orós) responderam às reduções da vazão afluyente e volume estocado com significativo aumento da concentração interna de PT, com o final do século XXI experimentando maior risco de eutrofização. Os resultados também apontaram influência da sazonalidade sobre a qualidade da água, com a maiores concentrações de PT sendo registradas durante o período seco (junho-janeiro). Estes resultados sugerem que os reservatórios do Nordeste do Brasil (NEB) são mais vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas do que outras regiões do mundo, pois já experimentam eventos de secas periódicas e reduções gradativas do volume estocado. Além disso, as estratégias de reduções de carga afluyente de PT e retiradas de água demonstraram ser imprescindíveis para minimizar o impacto das mudanças climáticas sobre a qualidade da água. Conclui-se que o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos de bacias semiáridas requer a avaliação dos impactos das mudanças climáticas tanto na quantidade quanto na qualidade da água, incorporando o efeito sazonalidade sobre a concentração de interna de poluentes e informações do risco de eutrofização dos reservatórios.

Palavras-chave: Mudanças climáticas. Eutrofização. Bacia semiárida.

ABSTRACT

The water quality of lakes and reservoirs has been identified as potentially vulnerable to climate change. This study aims to investigate the impacts of climate change on water quality in reservoirs in the Brazilian semiarid region. An integrated approach to climate, hydrological and water quality models was used. Part of the simulations revealed a significant impact of decreasing the streamflow and, consequently, of the stored volume. The reservoirs taken with case studies (Castanho and Orós) responded to reductions in the streamflow and stored volume with a significant increase in the internal TP concentration, with the end of the 21st century experiencing a higher risk of eutrophication. The results also pointed to the influence of seasonality on the water quality of the reservoirs, with the highest concentrations of TP being recorded during the dry period (June-January). These results suggested that NEB reservoirs are more vulnerable to the effects of climate change than other regions of the world, as they already experience periodic drought events and gradual reductions in the stored volume. Simultaneous reductions in both influent TP concentration and reservoir withdrawal are capable of significantly reducing the trophic state of the reservoir in most pessimistic scenarios. It is concluded that the sustainable management of water resources in semi-arid basins requires the assessment of the impacts of climate change both on the quantity and on the quality of the water, incorporating the seasonality effect on the concentration of internal pollutants and information on the risk of eutrophication of the reservoirs.

Keywords: Climate Change. Eutrophication. Semiarid Basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa do reservatório Castanhão localizado na sub-bacia do Médio Jaguaribe Estado do Ceará, Brasil	25
Figura 2 – Ilustração conceitual do modelo hidrológico SMAP usado neste estudo	27
Figura 3 – Localização da sub-bacia do Alto Jaguaribe e do Orós, Ceará, Brasil	57

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– a) calibração e b) validação do SMAP para o Castanhão	34
Gráfico 2	– Mudanças na vazão afluente gerada do SMAP usando cinco MCGs com a) RCP4.5 e b) RCP8.5 e três períodos futuros	35
Gráfico 3	– Mudança relativa no volume percentual do balanço hídrico do reservatório usando cinco MCGs sob os a) RCP4.5 e b) RCP8.5 e três períodos futuros	36
Gráfico 4	– Projeções do volume percentual médio sob os a) RCP4.5 e b) RCP8.5 para os períodos 2015-2044, 2045-2074 e 2075-2100	38
Gráfico 5	– Relação entre o volume percentual e a vazão afluente para o Castanhão para os cinco diferentes MCGs sob os dois RCPs para três períodos futuros	39
Gráfico 6	– Mudança relativa da concentração média de PT para cinco diferentes MCGs sob os a) RCP4.5 e b) RCP8.5 para três períodos futuros	41
Gráfico 7	– Projeções da concentração média anual de PT a partir dos cinco diferentes MCGs sob os a) RCP4.5 e RCP8.5 b) para três períodos futuros	42
Gráfico 8	– Relação entre a concentração média de PT e o volume percentual do reservatório Castanhão para o período amostrado 2008-2019	43
Gráfico 9	– Projeção da concentração representativa de PT a partir de cinco diferentes MCGs. O primeiro, segundo e terceiro período foram representados pelos números cardinais 1, 2 e 3, respectivamente, enquanto os RCP4.5 e RCP8.5 foram representados pelos números romanos I e II	45
Gráfico 10	– Calibração a) e validação b) do modelo SMAP para o Orós	59
Gráfico 11	– Concentração média representativa de PT no Orós para três períodos futuros usando cinco diferentes MCGs sob os a) RCP4.5 e b) RCP8.5	63
Gráfico 12	– Risco probabilístico do nível trófico para os outputs de cinco diferentes MCGs sob os RCP4.5 a) e RCP8.5 b) para três períodos futuros	65
Gráfico 13	– Projeção da concentração de PT no reservatório Orós para: a) RCP4.5 e b) RCP8.5. Os retângulos sem linhas diagonais representam o período chuvoso, e os retângulos com linhas diagonais, o período seco	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Classificação do nível trófico com base na concentração média de PT	33
Tabela 2	– Mudanças relativas para a vazão afluyente gerada pelo SMAP usando cinco diferentes MCGs com dois RCPs e três periodos futuros	60
Tabela 3	– Mudanças relativas para o volume percentual gerado pelo balanço hidrico do reservatório Orós usando cinco diferentes MCGs com dois RCPs e três periodos futuros	61
Tabela 4	– Mudanças relativas para concentração média de PT gerada pelo modelo de mistura completa usando cinco diferentes MCGs com dois RCPs e três periodos futuros	62
Tabela 5	– Número de anos nos quais o reservatório Orós atingiu o estado eutrófico e hipereutrófico usando diferentes MCGs com dois cenários de emissão e três periodos futuros	64
Tabela 6	– Probabilidade de excedência para niveis de PT dentro do reservatório Orós	68
Tabela 7	– Simulações de reduções da concentração afluyente de PT e da retirada de água do reservatório Orós. As reduções variaram de 10% a 30%	70
Tabela 8	– Efeitos das reduções da concentração afluyente de PT e retiradas no risco de eutrofização do reservatório Orós para dois cenários de emissão e três periodos futuros	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
CRU	<i>Climatic Research Unit</i>
CMIP6	<i>Coupled Model Intercomparison Project 6</i>
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
FDA	Função Densidade Acumulada
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GEE	Gás de Efeito Estufa
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IPCC-AR5	<i>Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MCG	Modelo de Circulação Geral
NEB	Nordeste do Brasil
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i>
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
SMAP	<i>Soil Moisture Account Procedure</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

R_{soil}	Reservatório do solo
R_{gw}	Reservatório subterrâneo
SAT	Capacidade de saturação do solo
K_{es}	Taxa de geração de escoamento superficial
C_{rec}	Coefficiente de recarga
K	Constante de recessão
P	Precipitação
E_s	Escoamento superficial
E_p	Evapotranspiração potencial
E_r	Evapotranspiração real
C_{apc}	Capacidade de campo
K	Coefficiente de recessão
Q_a	Vazão afluente
A_d	Área da bacia
Rec	Recarga subterrânea
NS	Coefficiente de eficiência da Nash-Sutcliffe
V	Volume estocado
Q_r	Retiradas de água do reservatório
EL	Perdas médias de água da superfície líquida do lago
A	Área da superfície líquida do lago
S	Vazão vertida
V_p	Volume percentual
$V_{máx}$	Capacidade máxima do reservatório
PT	Concentração média de fósforo total
c_a	Concentração afluente
k	Coefficiente de decaimento de PT
Q_s	Vazão de saída
τ_w	Tempo de residência hidráulico
t	Tempo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	17
1.1	Objetivos	19
1.2	Estrutura da dissertação	19
2	AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE A HIDROLOGIA E QUALIDADE DA ÁGUA DE RESERVATÓRIOS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: ESTUDO DE CASO DO RESERVATÓRIO CASTANHÃO	20
2.1	Resumo	20
2.2	Introdução	21
2.3	Materiais e métodos	24
2.3.1	<i>Área de estudo</i>	24
2.3.2	<i>Modelagem</i>	25
2.3.3	<i>Modelo hidrológico SMAP</i>	26
2.3.3.1	<i>Estrutura do modelo</i>	26
2.3.3.2	<i>Calibração e validação</i>	28
2.3.4	<i>Cenários de mudanças climáticas</i>	29
2.3.5	<i>Balço hídrico e volume percentual</i>	31
2.3.6	<i>Modelo de qualidade da água do reservatório</i>	32
2.4	Resultados	34
2.4.1	<i>Desempenho do modelo hidrológico SMAP</i>	34
2.4.2	<i>Alteração na vazão afluente do reservatório</i>	34
2.4.3	<i>Efeitos sobre o nível da água</i>	36
2.4.3.1	<i>Mudança relativa no volume percentual</i>	36
2.4.3.2	<i>Projeção do volume percentual futuro</i>	37
2.4.4	<i>Concentração futura de PT sob cenários de mudanças climáticas</i>	40
2.4.4.1	<i>Mudança relativa na concentração de PT no reservatório</i>	40
2.4.4.2	<i>Projeção da concentração de PT no reservatório</i>	40
2.4.4.3	<i>Estado tráfico do reservatório sob cenários de mudanças climáticas</i>	43
2.5	Discussão	45
2.6	Conclusões	52

3	ANÁLISE DE RISCO DE EUTROFIZAÇÃO DE UM GRANDE RESERVATÓRIO DO NORDESTE DO BRASIL (NEB) SOB CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS	54
3.1	Resumo	54
3.2	Introdução	55
3.3	Materiais e métodos	56
3.3.1	<i>Área de estudo</i>	56
3.3.2	<i>Modelagem hidrológica</i>	57
3.3.3	<i>Cenários de mudanças climáticas</i>	57
3.3.4	<i>Modelo de mistura completa</i>	58
3.3.5	<i>Análise de risco de eutrofização</i>	58
3.4	Resultados e discussão	59
3.4.1	<i>Desempenho do modelo hidrológico SMAP</i>	59
3.4.2	<i>Impacto na disponibilidade hídrica</i>	59
2.4.2.1	<i>Alterações na vazão afluente do reservatório</i>	59
2.4.2.2	<i>Alterações no volume percentual do reservatório</i>	60
3.4.3	<i>Efeitos sobre a qualidade da água do reservatório</i>	61
2.4.3.1	<i>Alterações na concentração interna de PT</i>	62
2.4.3.2	<i>Projeções da concentração de PT no reservatório</i>	62
2.4.3.3	<i>Risco de eutrofização sob cenários de mudanças climáticas</i>	65
3.4.4	<i>Impactos na sazonalidade da concentração de PT</i>	66
2.4.4.1	<i>Projeções sazonais da concentração de PT</i>	66
2.4.4.2	<i>Riscos sazonais de eutrofização</i>	68
3.4.5	<i>Simulação de reduções da carga afluente de PT e retiradas de água do reservatório</i>	68
3.5	Conclusões	72
4	CONCLUSÕES GERAIS	73
	REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO GERAL

O Nordeste do Brasil (NEB) possui uma população de mais de 50 milhões de habitantes e é a terceira área econômica mais importante do país, mesmo enfrentando déficit hídrico natural devido ao seu clima semiárido e às secas periódicas (WIEGAND *et al.*, 2021). Historicamente, a construção de reservatórios é a principal prática de combate às secas na região (CAMPOS *et al.*, 2015). Por exemplo, os reservatórios Castanhão (6700 hm³) e Orós (1940 hm³), os dois maiores do estado do Ceará e objetos de estudo deste trabalho, abastecem a população de dez sedes urbanas, incluindo a Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), e suprem as necessidades hídricas da agricultura, indústria e dessedentação de animais ao longo do Vale do Rio Jaguaribe (ANA, 2017).

Reservatórios de regiões semiáridas, como o NEB, estão expostos a fatores que os tornam mais propensos à eutrofização (BARBOSA *et al.*, 2012), tais como: sazonalidade da vazão afluente (ARAÚJO; LIMA NETO; BECKER, 2019); ocorrência de chuvas após períodos secos (LISBOA *et al.*, 2020); redução significativa do volume (ROCHA JÚNIOR *et al.*, 2018); e chuvas intensas (SANTOS *et al.*, 2014). Corroborando isso, verificou-se que cerca de 3/4 dos reservatórios monitorados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará - COGERH já estão eutrofizados (COGERH, 2020).

Por outro lado, as mudanças projetadas para o clima futuro indicam potenciais modificações nos padrões climáticos, podendo ter efeitos adversos sobre a geração de energia, produção de alimentos e água (IPCC, 2014). Eventos meteorológicos e hidrológicos extremos podem propiciar maior frequência de secas e cheias, ampliando os riscos do gerenciamento dos recursos hídricos (SHRESTHA *et al.*, 2017). Existem evidências que a qualidade da água de reservatórios é influenciada por diversos mecanismos hidroclimáticos (MESQUITA *et al.*, 2020; WIEGAND *et al.*, 2021). Por essa razão, além dos efeitos sobre os aspectos quantitativos, as mudanças climáticas também podem afetar qualitativamente os corpos hídricos, interferindo na carga e na concentração interna de poluentes (COUTURE *et al.*, 2018; ME *et al.*, 2018; MESSINA *et al.*, 2020). Concentrações excessivas de nutrientes nos corpos hídricos podem provocar o fenômeno de eutrofização, que é um dos problemas ambientais mais sérios de lagos e reservatórios espalhados pelo mundo (CARVALHO *et al.*, 2014; JEPPESEN *et al.*, 2014; XIA *et al.*, 2016). O fósforo tem sido considerado como o nutriente limitante da eutrofização e muitos estudos têm usado a concentração de fósforo total (PT) como variável representativa da qualidade da água de lagos e reservatórios (LIMA; MAMEDE; LIMA NETO, 2018; LIRA; MEDEIROS; LIMA NETO, 2020; MOURA *et al.*, 2020; TONÉ; LIMA NETO, 2020).

A abordagem combinada de modelos climáticos, hidrológico e de qualidade da água tem sido empregada para investigar os impactos das mudanças sobre a qualidade de rios, lagos e reservatórios (GIRI; LATHROP; OBROPTA, 2020; THORNE; FENNER, 2011; TROLLE *et al.*, 2011). A metodologia convencional consiste em projetar dados futuros de temperatura e precipitação pelos Modelos de Circulação Geral (MCGs), forçados por *Representative Concentration Pathways* (RCPs), que servem de *inputs* para um modelo hidrológico e, finalmente, alimentam um modelo de qualidade da água para projetar o impacto sobre o corpo hídrico. A partir das concentrações futuras de PT no corpo hídrico é possível indicar o seu estado trófico. Adaptações e versões do modelo empírico de Vollenweider (1968) têm sido usadas com sucesso para estimar a concentração de PT em lagos e reservatórios ao redor do mundo. Nielsen *et al.* (2013) empregaram a versão permanente, tomando o volume constante, enquanto Lira, Medeiros e Lima Neto (2020) usaram a versão transiente e consideraram a alta variabilidade do volume estocado do reservatório investigado. Já Molina-Navarro *et al.* (2014) usaram a versão permanente, incluindo a variação do nível de água, para projetarem os impactos das mudanças climáticas sobre o estado trófico do reservatório Pareja, Espanha.

Embora seja reconhecida a importância da variabilidade hidroclimática sobre a qualidade da água dos reservatórios do semiárido tropical (MESQUITA *et al.*, 2020; ROCHA JÚNIOR *et al.*, 2018; WIEGAND *et al.*, 2021) e os potenciais efeitos negativos das mudanças climáticas sobre a qualidade da água (BUCAK *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2019), estudos de impactos das mudanças climáticas no NEB, e particularmente para o Ceará, têm se limitado a aspectos quantitativos (ESTÁCIO, 2020; GONDIM *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2020; TIEZZI *et al.*, 2019). Tal fato revela uma lacuna importante, pois a segurança hídrica estabelece os aspectos quantitativo e qualitativo dos recursos hídricos como seus dois principais pilares. Portanto, o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos do NEB também passa pela avaliação dos impactos das mudanças climáticas sobre a qualidade da água dos reservatórios.

Outro problema importante no estudo de mudanças climáticas são as incertezas nas projeções futuras, cujo espalhamento das variáveis de estado da qualidade da água pode dificultar a tomada de decisão (MOLINA-NAVARRO *et al.*, 2014; NAZARI-SHARABIAN *et al.*, 2019). Nesse sentido, Chang *et al.* (2015) sugerem a organização dos outputs dos modelos de qualidade da água como Funções Densidades de Probabilidade (FDAs) e, dessa forma, informações do risco de eutrofização da qualidade da água podem ser extraídas. Embora essa metodologia não seja a análise de risco de todas as etapas da abordagem combinada, ela oferece ao tomador de decisão informações mais adequadas ou, pelo menos, mais convenientes para a elaboração de medidas de mitigação do fenômeno de eutrofização.

Neste estudo, uma abordagem integrada de modelos climáticos, hidrológico e de qualidade da água foi usada para projetar as concentrações de PT nos dois maiores reservatórios do estado do Ceará sob cenários de mudanças climáticas. Também foram derivadas equações empíricas para auxiliar a gestão da qualidade da água de reservatórios do semiárido tropical. Além disso, foi avaliado o risco futuro de eutrofização, bem como análise dos efeitos da sazonalidade e reduções da carga de PT e retiradas de água sobre a concentração de PT. Na visão do autor, trata-se do primeiro estudo sobre o tema para o Ceará, bem como para o NEB.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste estudo é avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre a qualidade da água de reservatórios do semiárido tropical, gerando informações para o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos dessa região. Os reservatórios Castanhão e Óros, localizados no estado do Ceará, Brasil, são tomados como estudos de casos.

Para esta tarefa, os seguintes objetivos específicos são estabelecidos:

- a) Projetar os impactos sobre a vazão afluyente e volume percentual dos reservatórios;
- b) Identificar possíveis relações entre vazão afluyente, volume percentual e a concentração de PT;
- c) Quantificar o risco de eutrofização usando o conceito de FDA;
- d) Analisar o impacto da sazonalidade sobre a concentração de PT; e
- e) Simular os efeitos de medidas mitigadoras sobre a qualidade da água.

1.2 Estrutura da dissertação

Seguindo uma recente tendência no programa do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) da Universidade Federal do Ceará (UFC), esta dissertação foi estruturada como artigos científicos, alocados em dois capítulos. São eles:

- a) Avaliação dos impactos das mudanças climáticas sobre a qualidade da água de reservatórios do semiárido brasileiro: estudo de caso do reservatório Castanhão; e
- b) Análise de risco de eutrofização de um grande reservatório do Nordeste do Brasil (NEB) sob cenários de mudanças climáticas.

2 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE A QUALIDADE DA ÁGUA DE RESERVATÓRIOS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: ESTUDO DE CASO DO RESERVATÓRIO CASTANHÃO¹

2.1 Resumo

A escassez e a poluição hídrica têm impactado negativamente os recursos hídricos do Nordeste do Brasil (NEB), resultando em grandes prejuízos à população e ao desenvolvimento da região. Somado a isso, as mudanças climáticas têm demonstrado capacidade de impactar tanto na quantidade e quanto na qualidade dos recursos hídricos. Com o objetivo de elucidar os impactos das mudanças climáticas sobre a qualidade da água de reservatórios do semiárido tropical empregou-se uma abordagem integrada de modelos climáticos, hidrológico e da qualidade da água. O reservatório Castanhão localizado no estado do Ceará, Brasil, foi tomado com estudo de caso. Também foi investigado as influências da vazão afluente e do volume percentual sobre a qualidade da água do reservatório. Os resultados indicaram fortes incertezas nos outputs dos modelos climáticos, propagando-se ao longo da modelagem integrada. Verificou-se, também, decréscimo da vazão afluente e, conseqüentemente, do volume armazenado. Por outro lado, observou-se um aumento da concentração média de fósforo total (PT) no reservatório para a metade dos cenários agregados em relação à *baseline* (2008-2014), como resposta principalmente à redução do volume estocado. Verificou-se, também, que eventos de seca podem ser potencializados sob cenários de mudanças climáticas, principalmente no final do século XXI para o RCP8.5, podendo aumentar significativamente a concentração de TP nos reservatórios do semiárido brasileiro. Este resultado sugeriu que os corpos hídricos dessa região podem ser mais vulneráveis à eutrofização em cenários de mudanças climáticas comparado a reservatórios de outras regiões ao redor do mundo. Conclui-se que a metodologia de combinação de modelos climáticos, hidrológico e de qualidade da água mostrou-se capaz de fornecer informações relevantes e auxiliar os tomadores de decisão no desenvolvimento de medidas mitigadoras de combate aos efeitos negativos das mudanças climáticas sobre a qualidade da água dos reservatórios do semiárido brasileiro.

Palavras-chave: Mudanças climáticas. Qualidade da água. Semiárido.

¹ RAULINO, J. B. S.; SILVEIRA, C. S.; LIMA NETO, I. E. Assessment of the impact of climate change on hydrology and water quality of large semi-arid reservoirs. **Hydrological Sciences Journal**, 2020. (Submetido)

2.2 Introdução

A escassez hídrica e a poluição hídrica têm impactado negativamente os recursos hídricos da região do Nordeste do Brasil (NEB), trazendo grandes prejuízos à população e ao desenvolvimento da região. No estado do Ceará, Brasil, verificou-se que o percentual acumulado dos 155 reservatórios monitorados quantitativamente pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) é de 34,44% e 92 dos 127 monitorados qualitativamente estão eutrofizados, representando cerca de 3/4 do total (COGERH, 2020). As atividades humanas são responsáveis pela produção de nutrientes capazes de deteriorar mais fortemente a qualidade da água dos corpos hídricos. Os esgotos não tratados entram nos cursos de água dos rios e são conduzidos para os lagos e reservatórios. A sub-bacia do Médio Jaguaribe trata apenas 33% de seus esgotos (COGERH, 2011), valor próximo ao do NEB (36,24%) (Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS, 2018). O uso do solo, em particular para agricultura e pecuária, também pode gerar impactos negativos sobre a qualidade da água (du PLESSIS; HARMSE; AHMED, 2015). Isso ocorre principalmente em razão do uso fósforo na forma fertilizantes (práticas agrícolas) e a presença desse nutriente nos dejetos de animais (pecuária). Então, a combinação dos aportes de nutrientes provenientes de esgotos brutos, práticas agrícolas e pecuária promovem a eutrofização dos corpos hídricos (SCHINDLER *et al.*, 2016). A eutrofização pode favorecer florações de cianobactérias, as quais podem afetar negativamente o ecossistema aquático, elevar o custo de tratamento da água e afetar saúde da população (ARAÚJO; LIMA NETO; BECKER, 2019; CARVALHO *et al.*, 2013; LIMA; MAMEDE; LIMA NETO, 2018; PACHECO; LIMA NETO, 2017).

A alteração do clima também pode afetar a qualidade da água de corpos hídricos, especialmente em regiões com alta variabilidade espacial e temporal da precipitação, como o NEB (IPCC, 2014). As secas que periodicamente afetam o NEB constituem um fenômeno natural que causa grandes impactos sociais, econômicos e ambientais, configurando-se como um dos principais problemas da política governamental da região (da SILVA, 2004). A construção de reservatórios espalhados ao longo do território da região para armazenamento da água no período chuvoso e utilização ao longo dos anos, especialmente nos períodos mais secos, tem sido a principal política de combate às secas da região (CAMPOS, 2015). As secas prolongadas, além de impactar a produção agrícola e o abastecimento urbano e rural (da SILVA, 2004), são responsáveis por reduções gradativas do volume estocado nos reservatórios (ROCHA JUNIOR *et al.*, 2018). Além disso, devido à intermitência dos rios do semiárido nordestino, no período seco é transportado basicamente esgoto bruto para os reservatórios

(ARAÚJO; LIMA NETO; BECKER, 2019). Nesse sentido, a qualidade da água de lagos e reservatórios de ambientes semiáridos podem ser particularmente sensíveis aos efeitos das mudanças no clima, pois a qualidade da água sofre influência da vazão afluenta e do volume estocado de tais corpos hídricos (CHAVES *et al.*, 2013; SANTOS *et al.*, 2014). Por outro lado, uma maior frequência de eventos de chuvas intensas pode aumentar o carreamento de sedimentos e nutrientes da bacia para os lagos e reservatórios, aumentando a concentração interna de nutrientes (BUDA *et al.*, 2009) e favorecendo florações de cianobactérias (SCHINDELER *et al.*, 2016). Embora as mudanças climáticas tenham demonstrado potencial impacto sobre a quantidade e qualidade da água de lagos e reservatórios em muitas regiões ao redor do mundo, todos os estudos sobre efeitos das mudanças climáticas no NEB e, mais especificamente na bacia do Rio Jaguaribe, concentram-se em aspectos quantitativos dos recursos hídricos (FERNANDES *et al.*, 2017; GONDIM *et al.*, 2012; SILVEIRA; SOUZA FILHO; VASCONCELOS JUNIOR, 2016; TIEZZI *et al.*, 2019). A ausência de estudos sobre impactos qualitativos das mudanças climáticas na região é preocupante, uma vez que vários estudos ao redor do mundo têm demonstrando que as mudanças climáticas podem ter efeitos adversos na qualidade da água dos corpos hídricos e intensificar muitas formas de poluição hídrica (e.g. ME *et al.*, 2018; PARK *et al.*, 2014). No entanto, os efeitos das mudanças climáticas podem apresentar respostas distintas dependendo da região e do cenário climático usado, podendo também influenciar a resposta da dinâmica física e ecológica dos lagos e reservatórios, por essa razão devem ser avaliados diretamente (MOOIJ *et al.*, 2005; PERAZZOLI; PINHEIRO; KAUFMANN, 2013). Portanto, para assegurar quantidade suficiente de água em boa qualidade para as futuras gerações, é importante avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre a qualidade da água. Esse contexto é uma das razões que fazem este estudo necessário e passível de contribuições relevantes para o NEB.

Os Modelos de Circulação Geral (MCGs) são ferramentas importantes que podem ser usadas para avaliar a resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica às mudanças climáticas (ZHANG *et al.*, 2019). Técnicas de *downscaling* são necessárias para projetar as variáveis climáticas em uma resolução compatível com a área de estudo, sendo os métodos dinâmico e estatístico as estratégias usualmente empregadas para realizar essa tarefa (FAIZ *et al.*, 2018). Os MCGs permitem simular a descarga futura da bacia hidrográfica que alimenta um corpo hídrico ao serem acoplados a um modelo hidrológico. O modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) tem sido comumente utilizado para projetar a descarga futura, no entanto exige um banco de dados importante que nem sempre está disponível (SHRESTHA *et al.*, 2017). Uma alternativa é usar modelos simplificados, como o *Soil Moisture Account*

Procedure (SMAP), o qual necessita apenas de dados de evaporação e precipitação para a calibração, além de um período de vazões afluentes para a validação (LOPES; BRAGA; CONEJO, 1982). As vazões afluentes podem ser incorporadas a um modelo de qualidade da água para realizar as projeções futuras da concentração média de fósforo total (PT) no corpo hídrico e, assim, caracterizar o seu estado trófico (BUCAK *et al.*, 2018). Diversos estudos têm utilizado essa abordagem integrada de modelos climáticos, hidrológicos e de qualidade da água para avaliar os impactos das mudanças climática sobre o estado trófico de lagos e reservatórios ao redor do mundo, no entanto os estudos são referentes a corpos hídricos de clima tropical e temperado (ARHEIMER *et al.* BUCAK *et al.*, 2018; 2015; COUTURE *et al.*, 2018; ME *et al.*, 2018; MESSINA *et al.*, 2020; MOLINA-NAVARRO *et al.*, 2014; NAZARI-SHARABIAN *et al.*, 2019; THORNE; FENNER, 2011; TROLLE *et al.*, 2011; ZHANG *et al.*, 2019). O modelo de mistura completa proposto por Vollenweider (1968), bem como suas derivações, tem sido aplicado com sucesso para estimar a concentração de PT de lagos e reservatórios (LIRA; MEDEIROS; LIMA NETO, 2020; NIELSEN *et al.*, 2013). Molina-Navarro *et al.* (2014), inclusive, usaram a versão permanente desse modelo para projetar a concentração de PT do reservatório Pareja, Espanha, sob cenários de mudanças climáticas.

O principal objetivo deste estudo foi avaliar o impacto das mudanças climáticas sobre a qualidade da água no reservatório Castanhão, o qual está localizado na região semiárida do estado do Ceará, Brasil, e é considerado o maior reservatório multiuso da América Latina. A concentração de PT foi usada com variável de estado da qualidade da água do reservatório, uma vez que o fósforo é considerado o nutriente limitante da eutrofização (LIMA; MAMEDE; LIMA NETO, 2018; LIRA; MEDEIROS; LIMA NETO, 2020; MOURA *et al.*, 2020). O estudo contou com a combinação de modelos climáticos, hidrológico e de qualidade da água para projetar a condição trófica futura do reservatório. Foram avaliados os efeitos dos cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5 sobre o estado trófico para os períodos futuros 2015-2044, 2045-2074 e 2075-2100. O modelo de qualidade da água usado foi a versão transiente do modelo empírico de Vollenweider (1968), mas com ajustes para considerar as características climáticas da região e a grande variabilidade do volume dos reservatórios do semiárido brasileiro (ARAÚJO; LIMA NETO; BECKER, 2019; LIRA; MEDEIROS; LIMA NETO, 2020; ROCHA; MESQUITA; LIMA NETO, 2019; TONÉ; LIMA NETO, 2020). Baseado nas simulações dos modelos e no entendimento atual do comportamento ecossistêmico dos reservatórios de regiões semiáridas, foi realizada uma discussão ampla sobre as restrições da metodologia utilizada, incertezas associadas à modelagem integrada e as contribuições do estudo para o NEB.

2.3 Materiais e métodos

2.3.1 Área de estudo

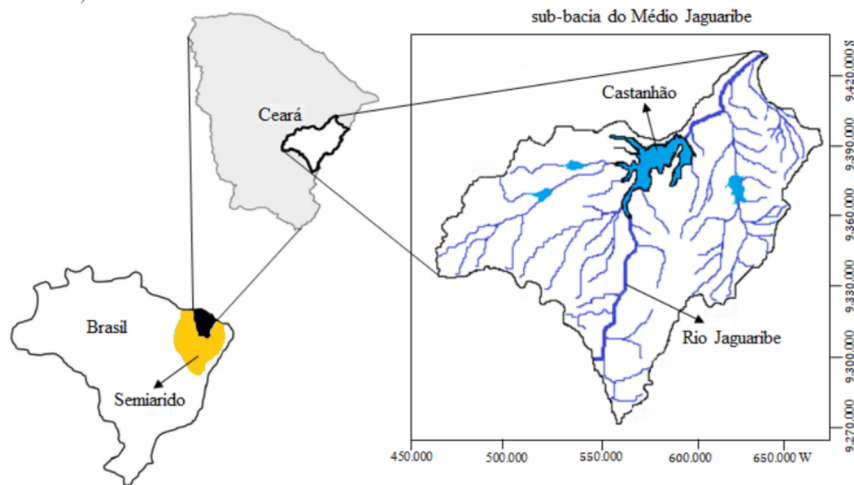
O estado do Ceará, Brasil, está localizado no Nordeste do Brasil (NEB) e é marcado por eventos climáticos extremos, incluindo secas frequentes e cheias esporádicas. A variabilidade interanual é alta devido ao El Niño-Oscilação Sul (ENOS). O principal sistema meteorológico atuante é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), responsável pelo período chuvoso propriamente dito do estado entre os meses de fevereiro e maio (GONDIM *et al.*, 2018). Existem dois outros sistemas atuantes, embora de menor relevância: Frentes Frias e Vórtices Ciclônicos, responsáveis pela pré-estação chuvosa (dezembro a janeiro), e as Ondas de Leste, responsável pela pós estação (junho e julho) (CAVALCANTI *et al.*, 2009). Mas, basicamente, o ano possui dois períodos bem distintos: um chuvoso, fevereiro-maio, com cerca de 75% no total precipitado do ano ocorrendo neste período, e um seco, nos meses restantes (CAMPOS; SOUZA FILHO; LIMA, 2014). Como resultado, tem sido adotado a estratégia de construção de reservatórios espacialmente distribuídos no território do estado para armazenar água no período e anos chuvosos para atender as necessidades hídrica nos meses secos e eventos de secas, além de evitar cheias ocasionais (CAMPOS, 2015).

Localizado no município cearense de Alto Santo, o reservatório Castanhão está inserido na bacia do Rio Jaguaribe que se destaca por sua grande extensão, abrangendo praticamente metade do território cearense (72.645 km², 48% da área total do Estado). O Rio Jaguaribe, que é principal aporte hídrico da bacia, tem extensão de 610 km de sua fonte a seu ponto de desagüe no Oceano Atlântico. A bacia do rio Jaguaribe é dividida em cinco sub-bacias: Alto, Médio e Baixo Jaguaribe, Salgado e Banabuiú. O reservatório Castanhão está inserido na sub-bacia do Médio Jaguaribe. Tal sub-bacia, junto com seus afluentes, localiza-se na porção leste do estado do Ceará e abrange uma área com cerca de 10.355 km² (13% do território cearense), sendo o Rio Jaguaribe o principal rio desta sub-bacia (Figura 1). O clima desta sub-bacia possui características semiáridas, com temperatura média anual de 28°C e precipitação média anual de aproximadamente 700 mm. A estação fluviométrica de Icó (6°41'N, 38°87'S) está localizada no município de mesmo nome e é considerada representativa para mensurar a vazão afluente do reservatório. Essa estação pertence à Agência Nacional de Águas (ANA), mas é operada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) (CAMPOS; SOUZA FILHO; LIMA, 2014; COGERH, 2011).

A sub-bacia do Médio Jaguaribe está sobre o domínio hidrogeológico cristalino predominando principalmente os tipos de solo neossolo litólico, luvisolo crômico e planossolos. Trata-se de uma região com taxa média de urbanização de 49%, densidade populacional de aproximadamente 22 hab./km², com uma cobertura de saneamento básico de apenas 33%. A economia é baseada majoritariamente nos setores de serviços e na agropecuária. A associação da alta concentração do regime de precipitação em quatro meses do ano (75% do total precipitado) com o solo cristalino que cobre mais de 80% da bacia resulta na intermitência do Rio Jaguaribe (CAMPOS; SOUZA FILHO; LIMA, 2014; COGERH, 2011).

O reservatório Castanhão (6.700 hm³) é o maior reservatório multiuso da América Latina, sendo responsável pelo abastecimento de sete municípios no Ceará. Vale ressaltar que esse reservatório é o manancial que alimenta o Canal da Integração e, juntamente com os reservatórios Banabuiú e Pedras Brancas, pereniza o rio Jaguaribe, onde ocorre a captação do Canal do Trabalhador. Ambos os canais abastecem a Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). As duas principais demandas do reservatório Castanhão são relativas às necessidades hídricas para a RMF e irrigação, com demandas de 79,5% e 18,6%, respectivamente (ANA, 2017).

Figura 1 – Mapa do reservatório Castanhão localizado na sub-bacia do Médio Jaguaribe, estado do Ceará, Brasil.



Fonte: elaborado pelo autor.

2.3.2 Modelagem

Neste estudo, uma abordagem combinada de modelos climáticos, hidrológico e de qualidade da água foi utilizada para a caracterizar a qualidade da água do reservatório Castanhão sob cenários de mudanças climáticas. Após a calibração e validação do modelo hidrológico SMAP, os outputs dos modelos climáticos (temperatura e precipitação), com *downscaling* e remoção do viés, forçados pelos RCP4.5 e RCP8.5, alimentaram o SMAP com o objetivo de projetar a vazão afluente futura do reservatório. A carga de nutrientes foi simulada utilizando uma correlação entre a vazão afluente do reservatório e a concentração afluente de PT, como alternativa à escassez de dados da concentração afluente de PT. O uso do solo da sub-bacia foi considerado inalterado no processo de modelagem. As vazões afluentes projetadas pelos MCGs serviram de inputs para o cálculo do balanço hídrico do reservatório a fim de determinar o volume estocado. Essas duas variáveis (vazão afluente e volume estocado) foram os principais dados de entrada do modelo de Vollenweider (1968), empregado neste trabalho para determinar a qualidade da água do reservatório. A concentração média de PT dentro do reservatório foi usada como variável de estado da qualidade da água do reservatório para três períodos futuros (2015-2044, 2045-2074 e 2075-2100). O período de registro de dados de qualidade da água 2008-2014 foi usado como *baseline*. O modelo de mistura completa foi empregado no regime transiente, considerado também a alta variabilidade do nível de água do reservatório. De acordo com as concentrações futuras de PT, foi realizada a classificação do estado trófico do reservatório para cada um dos três períodos futuros investigados a fim de avaliar a resposta qualitativa do reservatório às mudanças climáticas.

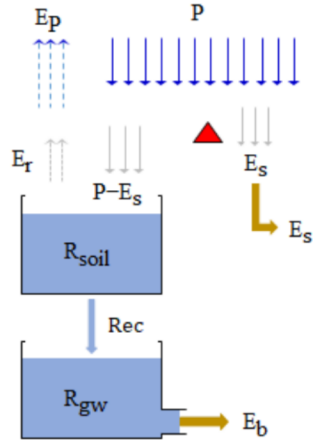
2.3.3 Modelo hidrológico SMAP

2.3.3.1 Estrutura do modelo

O modelo SMAP foi desenvolvido por Lopes, Braga e Conejo (1982), inicialmente na versão diária e posteriormente nas versões horária e mensal. O SMAP tem sido aplicado com sucesso em várias bacias brasileiras (BLOCK *et al.*, 2009; GONDIM *et al.*, 2018; KWON *et al.*, 2011; SILVEIRA; SOUZA FILHO; VASCONCELOS JUNIOR, 2016). Trata-se de um modelo de simulação hidrológica do tipo chuva-vazão, classificado ainda como determinístico, conceitual e de estrutura concentrada. O SMAP, na sua versão mensal, contém dois reservatórios lineares (reservatório do solo, R_{soil} , e subterrâneo, R_{gw}) e quatro parâmetros: capacidade de saturação do solo (SAT) em mm; taxa de geração de escoamento superficial (Kes), adimensional; coeficiente de recarga (Crec), adimensional e; constante de recessão (K)

em mês^{-1} . A separação entre precipitação e escoamento superficial é baseada na equação do *Soil Conservation Service* (SCS). A Figura 2 representa a estrutura do modelo com seus dois reservatórios lineares.

Figura 2 – Ilustração conceitual do modelo hidrológico SMAP usado neste estudo



Fonte: adaptado de Lopes, Braga e Conejo (1982)

A cada evento de precipitação (P) é realizado um balanço de massa, sendo uma parcela da precipitação transferida como escoamento superficial (E_s). Esse cálculo é feito através do método do SCS, como mencionado anteriormente. A lâmina de precipitação restante subtraída do escoamento superficial sofre perda por evaporação em nível de evapotranspiração potencial (E_p), então a lâmina remanescente é adicionada a um reservatório que representa a camada superior do solo. Neste, a umidade do solo é atualizada ao longo do tempo através de perdas por evapotranspiração real (E_r), as quais dependem do nível do reservatório subterrâneo e da capacidade de saturação do solo. Outra saída deste reservatório é a recarga no reservatório subterrâneo, a qual é utilizada o conceito de capacidade de campo (C_{apc}) para seu cálculo. O nível de água existente no reservatório subterrâneo sofre recessão segundo o coeficiente K . A soma do escoamento superficial e de base gera o fluxo total no ponto de controle da bacia, vazão afluente.

A vazão afluente (Q_a), gerada em m^3/s , é calculada como:

$$Q_a = (E_s + E_b) \frac{A_d}{2630} \quad (1)$$

em que A_d é a área da bacia em km^2 . A expressão que descreve o escoamento superficial é:

$$E_s = \left(\frac{R_{soil}}{SAT} \right)^{Kes} P \quad (2)$$

sendo que a precipitação P deve ser fornecida em mm. A evaporação é determinada a partir da seguinte expressão:

$$E_r = \left(\frac{R_{soil}}{SAT} \right) E_p \quad (3)$$

sendo a evapotranspiração E_p fornecida em mm. A recarga subterrânea (Rec) é modelada por:

$$Rec = Crec \left(\frac{R_{soil}}{SAT} \right)^4 R_{soil} \quad (4)$$

O escoamento de base é calculado pela expressão:

$$E_b = (1 - K)R_{gw} \quad (5)$$

Existem duas equações que governam a água armazenada nos dois reservatórios lineares do modelo SMAP, denominadas de variáveis de estado, expressas como:

$$R_{soil}(t + 1) = R_{soil}(t) + P - E_s - E_r - Rec \quad (6)$$

$$R_{gw}(t + 1) = R_{gw}(t) + Rec - E_b \quad (7)$$

em que t (mês) é tempo para o período de simulação.

Mais detalhes sobre o funcionamento do modelo hidrológico SMAP podem ser encontrados em Lopes, Braga e Conejo (1982).

2.3.3.2 Calibração e validação

A calibração do SMAP na versão mensal para regiões de solo cristalino, como o caso da sub-bacia do Médio Jaguaribe, é feita apenas para os dois parâmetros: SAT e Kes. O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) foi usado como função objetivo para mensurar o desempenho do SMAP nos processos de calibração e validação, o qual é descrito pela seguinte expressão.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)^2} \quad (8)$$

em que Q_o (L^3T^{-1}) é a vazão afluyente observada no mês i ; \bar{Q}_o (L^3T^{-1}) é a média das vazões afluyentes observadas no periodo usado para a calibração/validação; Q_s (L^3T^{-1}) é a vazão afluyente simulada no mês i ; \bar{Q}_s (L^3T^{-1}) é a média das vazões afluyentes simuladas no periodo usado para a calibração/validação. O valor de NS varia no intervalo $(-\infty, 1]$. Se $NS = 1$, então existe uma perfeita correspondência entre as vazões observadas e simuladas. Valores de NS entre 0 e 1 indica que as vazões simuladas e observadas estão próximas uma da outra, em cada mês i avaliado, enquanto que valores de NS negativos indicam que a vazão afluyente média tem maior representativa do fenômeno do que o modelo usado.

Os periodos 2005-2008 e 2009-2010 foram usados para a validação e calibração, respectivamente. Lopes, Braga e Conejo (1982) sugerem de dois a nove anos como o periodo necessário para o processo de calibração. É aconselhável escolher um periodo com anos secos e úmidos, começando com um ano seco. Isto permite que a umidade inicial do solo possa ser considerada nula ou suficientemente pequena. Os dados de vazão afluyente foram obtidos da ANA (website: <http://www.snirh.gov.br/>). Os dados de precipitação dos postos com influência na sub-bacia do Médio Jaguaribe foram obtidos da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) (website: <http://www.funceme.br/>). A precipitação média na sub-bacia em cada mês foi calculada usando o Polígono de Thiessen. Já a Normal Climatológica da evapotranspiração potencial foi fornecida pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (website: <http://www.inmet.gov.br/>).

2.3.4 Cenários de mudanças climáticas

Os MCGs são ferramentas empregadas para realizar projeções climática de escala de tempo sazonal à decenal. Tais modelos buscam reproduzir os processos físicos atmosféricos e oceânicos (NAZARI-SHARABIAN *et al.*, 2019). Os *Representative Concentration Pathway* (RCPs) são quatro trajetórias de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEEs) adotadas pelos relatórios avaliativos do IPCC (TAYLOR; STOUFFER; MEEHL, 2012). Os RCP2.6, RCP4.5, RCP6.5 e RCP8.5 são quatro grupos que consideram mudanças futuras na atmosfera e no uso e cobertura do solo. Os RCPs são usados para investigar a resposta do sistema climático a várias emissões de GEEs. Os números associados aos RCPs indicam a projeção da forçante radiativa (FR) até o final do 2100, representando, respectivamente, as FRs 2,6 W/m², 4,5 W/m², 6,5 W/m² e 8,5 W/m² (VUUREN *et al.*, 2011).

Neste estudo, foram usados cinco diferentes MCGs disponibilizados pelo *Coupled Model Intercomparison Project 6* – CMIP6 no momento de realização deste trabalho (BCC-CM6A-LR, CanESM5, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0). Esses modelos climáticos foram forçados pelos cenários de emissão RCP4.5 (moderado) e RCP8.5 (extremo) com o objetivo de obter os valores futuros de temperatura e precipitação. Especificamente, o cenário RCP4.5 representa emissões de GEEs atingindo um pico em 2040, depois a FR declina, sem ultrapassar 4,5 W/m² após 2100. Este cenário de emissão pressupõe a estabilização da demanda energética mundial, programas de reflorestamento e políticas climáticas rigorosas. Já o RCP8.5 assume crescimento da FR até 2100, atingindo o valor de 8,5 W/m². Este cenário sugere um crescimento contínuo da população associado a um desenvolvimento tecnológico lento, resultando em emissões significativas de dióxido de carbono (CO₂). Trata-se do futuro mais pessimista em termos de emissão de poluentes atmosféricos, uma vez que considera forte utilização de combustíveis fósseis e ausência de qualquer política para reduzir as emissões de CO₂ (VUUREN *et al.*, 2011). Os dados de precipitação e temperatura foram obtidos para a bacia de interesse usando interpolação para uma grade pontos pré-definida por meio do Polígono de Thiessen. Este procedimento pode ser enquadrado com *downscaling* estatístico, mas com a necessidade de correção de viés (ESTÁCIO, 2020). Então, após a realização do *downscaling* para os valores mensais de precipitação e temperatura, foi realizada correção do viés usando a FDA com distribuição gama para a precipitação e correção média mensal da temperatura, mensalmente com o objetivo de corrigir também a sazonalidade (ESTÁCIO, 2020). Os dados observados foram oriundos do *Climatic Research Unit* (CRU) no período 1971-2000 e os outputs dos MCGs das previsões inversas (*hindcasts*) utilizando este mesmo período. As metodologias empregadas foram semelhantes às utilizadas por BLOCK *et al.* (2009) e por GONDIM *et al.* (2018) para as correções estatísticas da precipitação e temperatura, respectivamente, onde mais detalhes sobre os procedimentos podem ser encontrados. As projeções futuras de temperatura e precipitação foram realizadas para três períodos: 2015-2044, 2045-2074 e 2075-2100. As projeções futuras também passaram por correção do viés. Os dados de temperaturas mínimas, máximas e médias projetadas pelos MCGs foram usadas para o cálculo da evapotranspiração potencial usando o método Hargreaves (HARGREAVES; SAMANI, 1985).

Após realização das projeções de precipitação e evapotranspiração potencial, as vazões afluentes futuras foram projetadas pelo SMAP, já calibrado e validado, para os três períodos futuros, a fim de fornecer a vazão afluente do reservatório Castanhão, para posterior avaliação dos impactos no nível e na qualidade da água do reservatório.

2.3.5 Balanço hídrico e volume percentual

O volume estocado futuro do reservatório Castanhão, sob os efeitos das mudanças, foi determinado pelo seu balanço hídrico. A vazão de retirada do reservatório foi considerada com a sua vazão regularizada, a fim de simplificar o processo de operação do reservatório para o cálculo do seu volume estocado. A vazão regularizada é definida como a vazão afluyente ao reservatório com 90% de confiabilidade (CAMPOS *et al.*, 2016). A perda de água da superfície do reservatório foi considerada como o produto da diferença entre a evaporação e a precipitação direta e a área reservatório, relativo à superfície líquida, mantida constante ao longo da simulação, sendo outra simplificação adotada. A expressão que governa o balanço hídrico do reservatório é apresentada a seguir.

$$V_{i+1} = V_i + Q_{a,i} - Q_{r,i} - EL_i A_i - S_i \quad (9)$$

em que $i + 1$ (T) e i (T) se referem ao tempo presente e tempo passado, respectivamente, V (L^3) é o volume de água, Q_r (L^3T^{-1}) denota as retiradas de água do reservatório, EL (LT^{-1}) perdas médias de água do reservatório, A (L^2) representa a área da superfície líquida do reservatório e S (L^3T^{-1}), é o vazão vertida no reservatório pelo vertedouro.

O valor da vazão regularizada e a curva Cota-Área-Volume (CAV) foram obtidas junto à COGERH (<http://www.hidro.ce.gov.br/>). O vetor de evaporação líquida mensal do reservatório Castanhão foi adquirido a partir do estudo sobre os reservatórios do semiárido brasileiro realizado pela ANA (ANA, 2017).

Uma relação útil para avaliar o nível de água de lagos e reservatórios é o volume percentual, definido como a razão entre o volume armazenado no reservatório e o seu volume máximo. Essa relação é descrita matematicamente a seguir.

$$V_p = \left(\frac{V}{V_{\max}} \right) \times 100 \text{ (\%)} \quad (10)$$

em que V_p é o volume percentual do reservatório (%) e V_{\max} (L^3), é a capacidade máxima do reservatório.

2.3.6 Modelo de qualidade da água do reservatório

Os impactos das mudanças climáticas sobre a qualidade da água do reservatório Castanhão foram estimados considerando o balanço de massa do reservatório na hipótese de

mistura completa. Foi utilizado a concentração média de PT como a variável representativa da qualidade da água. Esse nutriente tem sido estabelecido como o fator limitante da eutrofização em lagos e reservatórios e por esta razão foi considerada como a variável de estado. A expressão abaixo foi proposta por Vollenweider (1968), mas com ajustes sugeridos por Chapra (2008). A expressão foi usada satisfatoriamente por Lira, Medeiros e Lima Neto (2020) para considerar a variação do volume, uma vez que os reservatórios do semiárido brasileiro experimentam grande variabilidade do nível da água, em resposta à variabilidade espacial e temporal da precipitação e aos efeitos de secas periódicas.

$$TP_{i+1} = TP_i \frac{V_i}{V_{i+1}} + \frac{(Q_{a,i}c_{a,i} - Q_{s,i}TP_i - k_iTP_iV_i)}{V_{i+1}}(t_{i+1} - t_i) \quad (11)$$

em que PT é a concentração média de fósforo total no reservatório (ML^{-3}), c_a é a concentração afluenta de PT (ML^{-3}), k é o coeficiente de decaimento de PT (T^{-1}) e Q_s (L^3T^{-1}), a vazão de saída do reservatório. É importante ressaltar que a vazão de saída representa todas as formas de retirada de água do reservatório capazes de transportar junto o fósforo, ou seja, vazões de retirada, vertida e infiltrada (CHAPRA, 2008). No entanto, desconsiderou-se a perda de água do reservatório por infiltração (CAMPOS *et al.*, 2016; MESQUITA *et al.*, 2020).

Um problema intrínseco aos reservatórios de regiões semiáridas são as temperaturas mais elevadas ($\sim 30^\circ C$), que afetam a taxa de consumo do fósforo pela atividade biológica e a viscosidade da água, facilitando o processo de sedimentação desse poluente (CASTAGNINO, 1982). Em virtude disso, este trabalho empregou a Eq. (12), proposta por Toné e Lima Neto (2020), para considerar as características do clima semiárido tropical sobre o coeficiente de decaimento do PT. Essa fórmula empírica é uma correção das expressões propostas por Vollenweider (1968) e Salas e Martino (1991), que foram desenvolvidas para reservatórios de clima temperado ($\sim 10^\circ C$) e tropical ($\sim 20^\circ C$), respectivamente.

$$k = \frac{4}{\sqrt{\tau_w}} \quad (12)$$

em τ_w é o tempo de residência hidráulica (T), que representa o tempo necessário para que o volume do reservatório possa ser renovado, o qual é definido como a razão entre o volume do reservatório (L^3) e a sua vazão afluenta (L^3T^{-1}). Essa abordagem para estimar o tempo de residência é adequada para lagos de mistura completa (PILOTTI; SIMONCELLI; VALERIO, 2014). Consistentemente, os reservatórios do semiárido brasileiro apresentam contrastes de estratificação muito pequenos do topo ao fundo (faixa de $1-4^\circ C$), os quais são desfeitos em ciclos diários (ver LIMA NETO, 2019; MESQUITA *et al.*, 2020). É importante observar,

também, que a Eq. (12) foi ajustada e validada por Toné e Lima Neto (2020) para um grande número de reservatórios do semiárido brasileiro. Além disso, também foi validada por Lima, Mamede e Lima Neto (2018) e Araújo, Lima Neto e Becker (2019) para reservatórios localizados especificamente no estado do Ceará.

O modelo do tipo concentração-vazão (c_a - Q_a) para o reservatório Castanhão proposto por Rocha e Lima Neto (2020), descrita pela Eq. (13), que relaciona a concentração afluyente de PT e a vazão afluyente. Os dados utilizados para ajuste da fórmula foram relativos ao período 2012-2017. Trata-se de uma ferramenta importante para o gerenciamento da qualidade da água em escala de bacia (BIEROZA *et al.*, 2018). Além disso, é ser necessário para conectar os impactos das mudanças climáticas do sistema bacia-reservatório.

$$c_a = 8,884Q_a^{-1,065} \quad (R^2 = 0,91) \quad (13)$$

A Eq. (13) requer que a vazão afluyente seja em m^3/s , gerando a concentração afluyente de PT em mg/L . Também foi necessário restringir o domínio da expressão para representar adequadamente a física do fenômeno. Então foi considerado o valor mínimo de $0,1 m^3/s$, que corresponde à concentração afluyente máxima de PT de $103,18 mg/L$.

Cabe salientar que modelos empíricos simplificados para estimar a concentração de fósforo de corpos hídricos têm sido comumente usados para a geração de informações para tomadas de decisão frente aos modelos físicos e matemáticos mais sofisticados, pois estes possuem estruturas mais complexas e exigem, muitas vezes, uma gama de coeficientes e dados de entrada (LIRA; MEDEIROS; LIMA NETO, 2020; MOLINA-NAVARRO *et al.*, 2014; NIELSEN *et al.*, 2013; TONÉ; LIMA NETO, 2020). Os modelos empíricos também podem ser usados para classificar os reservatórios quanto ao seu estado trófico (CHAPRA, 2008). Neste estudo, foi utilizado a classificação do estado trófico, com base na concentração média de PT (Tabela 1), ou seja, a mesma adotada pela COGERH para os seus reservatórios monitorados (KLIPPEL *et al.*, 2020; TOLEDO *et al.*, 1983).

Tabela 1 - Classificação do nível trófico com base na concentração média de PT

Nível trófico	Concentração de PT no reservatório (mg/L)
Oligotrófico	$\leq 0,026$
Mesotrófico	$0,027 - 0,052$
Eutrófico	$0,053 - 0,211$
Hipereutrófico	$> 0,211$

Fonte: adaptado de Toledo *et al.* (1983)

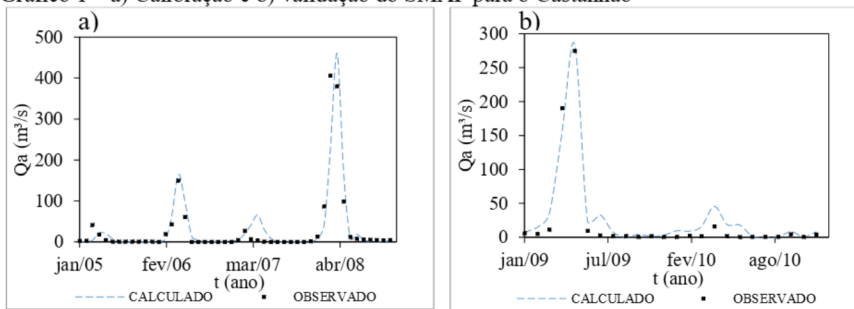
2.4 Resultados

2.4.1 Desempenho do modelo hidrológico SMAP

O modelo hidrológico SMAP foi calibrado e validado utilizando os períodos 2005-2008 e 2009-2010, respectivamente (Gráfico 1). O período de calibração considerou anos secos e úmidos, aconselhável para o processo de calibração do modelo. O modelo SMAP reproduziu satisfatoriamente o padrão da vazão afluyente, apresentando desempenho superior no período de validação. A calibração e validação apresentaram as seguintes estatísticas, respectivamente: $NS = 0,82$ e $NS = 0,95$.

Após realizados os processos de calibração e validação, os outputs dos modelos climáticos BCC-CM6A-LR, CanESM5, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0, forçados pelos RCP4.5 e RCP8.5, foram usados para rodar o SMAP para os períodos 2015-2044, 2045-2074 e 2075-2100 a fim de simular as vazões afluentes futuras do reservatório Castanhão.

Gráfico 1 – a) Calibração e b) validação do SMAP para o Castanhão

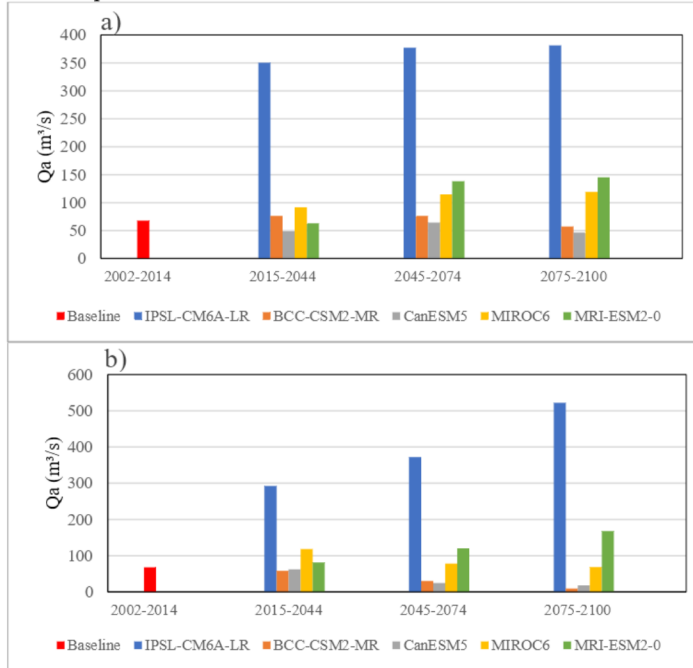


Fonte: elaborado pelo autor

2.4.2 Alteração na vazão afluyente do reservatório

O Gráfico 2 mostra a vazão afluyente média para as condições da *baseline* (2002-2014) e de mudanças climáticas.

Gráfico 2 – Mudanças na vazão afluente gerada do SMAP usando cinco MCGs com a) RCP4.5 e b) RCP8.5 e três períodos futuros



Fonte: elaborado pelo autor

A vazão afluente do reservatório Castanhão para a *baseline* foi de 67,80 m³/s. A partir do modelo SMAP, os cinco diferentes modelos climáticos utilizados projetaram consideráveis variações na vazão afluente média futura. O RCP8.5 exibiu efeito mais forte nas mudanças relativas da vazão afluente comparado ao RCP4.5. Sob o RCP4.5, projetou-se mudanças relativas variando entre -29% a 416% no período 2015-2044, com os modelos climáticos CanESM5 e MRI-ESM2-0 exibindo as maiores reduções, respectivamente. No segundo período, para este mesmo cenário de emissão, todos os modelos climáticos, com exceção do CanESM5, projetaram aumento da vazão afluente média, com mudanças relativas variando de 12% a 456%. No último período, os modelos BCC-CSM2-MR e CanESM5 projetaram reduções de -16% e -31%, respectivamente, ao passo que todos os outros modelos projetaram mudanças relativas positivas, as quais variaram de 75% a 462%. Para o RCP8.5, os modelos climáticos BCC-CSM2-MR e CanESM5 projetaram, respectivamente, mudanças relativas de -15% e -9% para período 2015-2044, enquanto os outros três modelos climáticos projetaram mudanças relativas variando de 20% a 332%. Para o período 2045-2074, os modelos

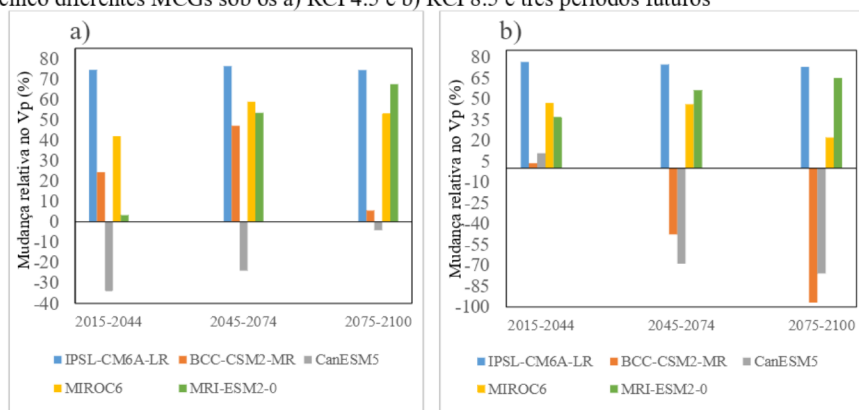
climáticos IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0 projetaram aumento da vazão afluente média, com mudanças relativas variando de 15% e 449%, enquanto os modelos BCC-CSM2-MR e CanESM5 projetaram reduções de -56% e -64%, respectivamente. No período 2075-2100, a maioria dos modelos climáticos projetaram crescimento da vazão afluente média em relação à *baseline*, com mudanças relativas variando de 24% a 847%. No entanto, os modelos BCC-CSM2-MR e CanESM5 projetaram reduções significativas da vazão afluente média. O primeiro projetou decréscimo de -84% e o segundo, decréscimo de -67%.

2.4.3 Efeitos sobre o nível de água

2.4.3.1 Mudança relativa no volume percentual

O Gráfico 3 exibe as mudanças relativas do volume percentual do reservatório Castanhão usando cinco modelos climáticos forçados pelos cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5 para três períodos futuros.

Gráfico 3 - Mudança relativa no volume percentual do balanço hídrico do reservatório usando cinco diferentes MCGs sob os a) RCP4.5 e b) RCP8.5 e três períodos futuros



Fonte: elaborado pelo autor

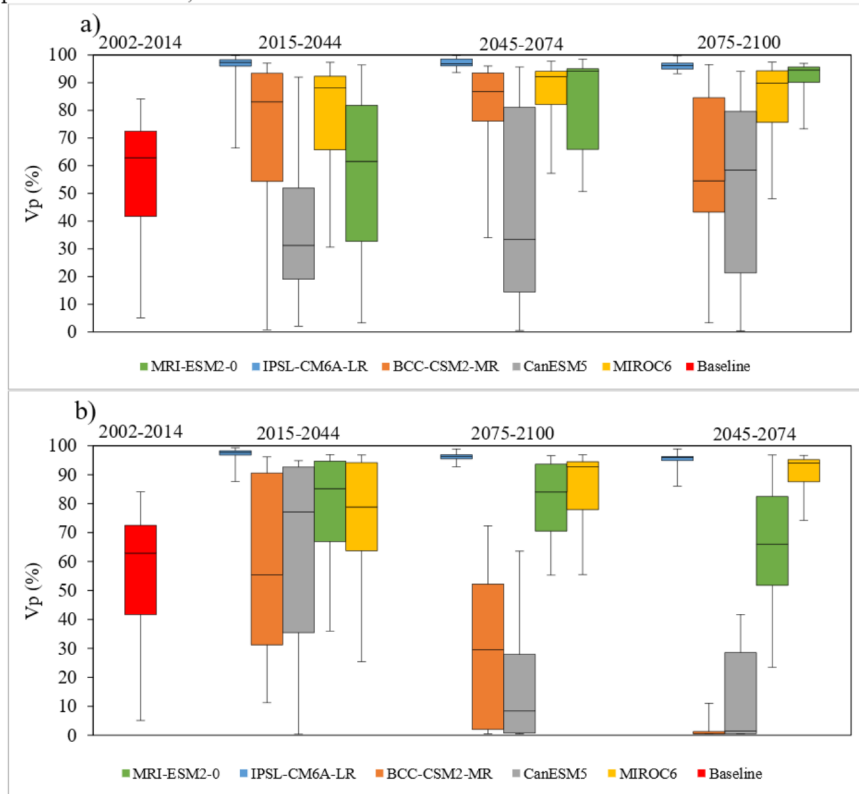
O volume percentual médio na *baseline* (2002-2014) foi de 55,10%. Os resultados indicaram grande flutuação do volume percentual futuro sob cenários de mudanças climáticas. As máximas mudanças relativas foram similares nos dois RCPs, mas o RCP8.5 exibiu mudanças relativas negativas mais acentuadas. Para o RCP4.5, todos os MCGs, com exceção

do CanESM5, projetaram aumento do volume percentual em relação à *baseline* nos três períodos futuros. As mudanças relativas positivas variaram de 3% a 76%, enquanto o modelo CanESM5 projetou reduções de -34%, -24% e -5% no primeiro, segundo e terceiro período, respectivamente. Sob o RCP8.5, no período 2015-2044 as projeções indicaram aumento do volume percentual variando de 2% a 42% em relação à *baseline*. Nos dois últimos períodos, a maioria dos MCGs apontaram aumento do volume percentual, mas os modelos BCC-CSM2-MR e CanESM5 projetaram reduções mais significativas. O primeiro modelo projetou decréscimo de -48% no período 2045-2074 e de -97% no período 2075-2100, enquanto o segundo projetou reduções de -69% e -76% no primeiro e segundo período, respectivamente.

2.4.3.2 Projeção do volume percentual futuro

O Gráfico 4 exibe os valores do volume percentual obtido pelo balanço hídrico dentro do reservatório Castanhão usando cinco diferentes MCGs com dois cenários de emissão e três períodos futuros. Os valores do volume percentual médio exibiram considerável variação em torno da mediana do volume percentual (62,89%) da *baseline* (2002-2014). De maneira geral, as medianas do volume percentual médio do RCP8.5 sofreram reduções para todos os MCGs em relação ao RCP4.5, com um forte decréscimo no último período (Gráfico 4). Para o RCP4.5, mais da metade dos MCGs projetaram medianas do volume percentual médio maiores do que a mediana da *baseline* para o período 2015-2044. Para este mesmo período, o modelo MRI-ESM2-0 projetou mediana ligeiramente inferior à mediana da *baseline*, enquanto o CanESM5 indicou volume percentual médio menor do que 31% na maior parte do tempo. No período 2045-2074, apenas o modelo CanESM5 projetou mediana do volume percentual médio menor do que a mediana da *baseline*, sendo que para 70% do período foram projetados volumes percentuais médios menores do que 20%. No último período, os modelos BCC-CSM2-MR e CanESM5 projetaram redução da mediana em relação à *baseline*, com este último projetando 25% dos valores de volume percentual médio menor do que 7%. Sob o RCP8.5, os modelos BCC-CSM2-MR e CanESM5 exibiram forte decréscimo das medianas dos volumes percentuais médios para os três períodos. O modelo CanESM5 apresentou mediana do volume percentual médio de 77% no primeiro período, mas sofreu redução para 8% no segundo e quase atingiu o valor de 0% no último. Já o modelo BCC-CSM2-MR projetou mediana do volume percentual médio de 55% no período 2015-2044, 30% no período 2045-2074, sendo que 25% do tempo deste período foram projetados volumes percentuais médios de aproximadamente 0%, e no período 2075-2100 todos os anos indicaram volume percentual próximo a 0%.

Gráfico 4 - Projeções do volume percentual médio sob os a) RCP4.5 e b) RCP8.5 para os períodos 2015-2044, 2045-2074 e 2075-2100



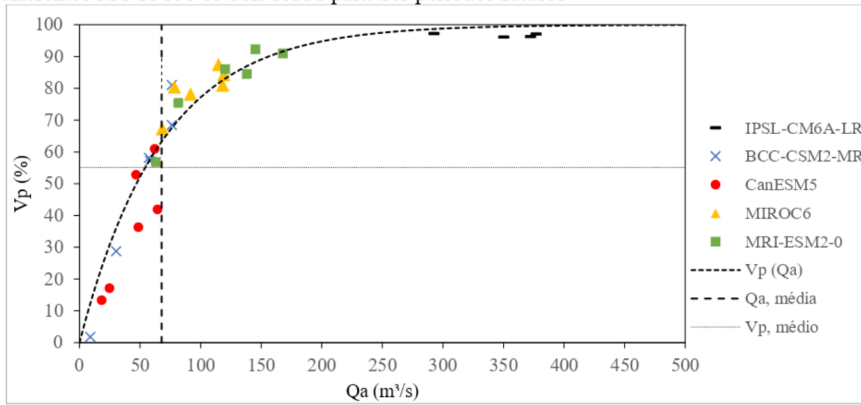
Fonte: elaborado pelo autor

O Gráfico 5 exibe os volumes percentuais médios juntamente com as vazões afluentes médias representativas para os três períodos futuros avaliados, considerando todos os modelos climáticos.

A partir do Gráfico 5, foi possível inferir que a redução do volume percentual do Castanhão estava relacionada ao decréscimo da vazão afluente do reservatório. Os cenários mais pessimistas associaram volumes percentuais menores que 20% e vazões afluentes médias anuais com reduções de mais de 50% em relação à *baseline*. Consistente com isso, o modelo CanESM5 exibiu reduções significativas do volume percentual e o modelo BCC-CSM2-MR projetou maior possibilidade de seca prolongada em resposta às reduções da vazão afluente média. Adicionalmente, as projeções da vazão afluente média superiores à vazão da *baseline* indicaram volume percentual médio acima da *baseline*, com destaque para o modelo IPSL-

CM6A-LR que projetou volumes estocados próximos ao volume máximo do reservatório, independente do período e cenário de emissão.

Gráfico 5 - Relação entre o volume percentual e a vazão afluyente para o Castanhão para os cinco diferentes MCGs sob os dois RCPs para três períodos futuros



Através de uma inspeção visual dos resultados exibidos no Gráfico 5, identificou-se um comportamento matemático característico, com volume percentual crescendo exponencialmente em uma região e em outra exibindo comportamento assintótico. Então, ajustou-se bem ao modelo monomolecular, considerando uma parametrização por meio do conceito de tempo de meia vida, uma vez que tinha uma interpretação mais conveniente ao se aproximar do volume percentual máximo (100%). Dessa forma, com o objetivo de fornecer informações do impacto das mudanças climáticas sobre o volume percentual do reservatório Castanhão a partir das projeções das vazões afluentes, foi proposta uma expressão que relaciona tais variáveis [Eq. (14)], englobando os cinco diferentes modelos climáticos, os dois cenários de emissão e os três períodos futuros avaliados.

$$V_p = 100 [1 - e^{-0,0148Q_a}] \quad (R^2 = 0,94) \quad (14)$$

Os parâmetros do modelo monomolecular foram determinados usando o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), considerando as vazões afluentes projetadas pelos cinco diferentes MCGs e as vazões afluentes do modelo proposto. A curva exibiu bom ajuste aos dados, como indicado pelo alto valor do R^2 (0,94). Além disso, foi possível estabelecer a assíntota horizontal como o volume percentual máximo.

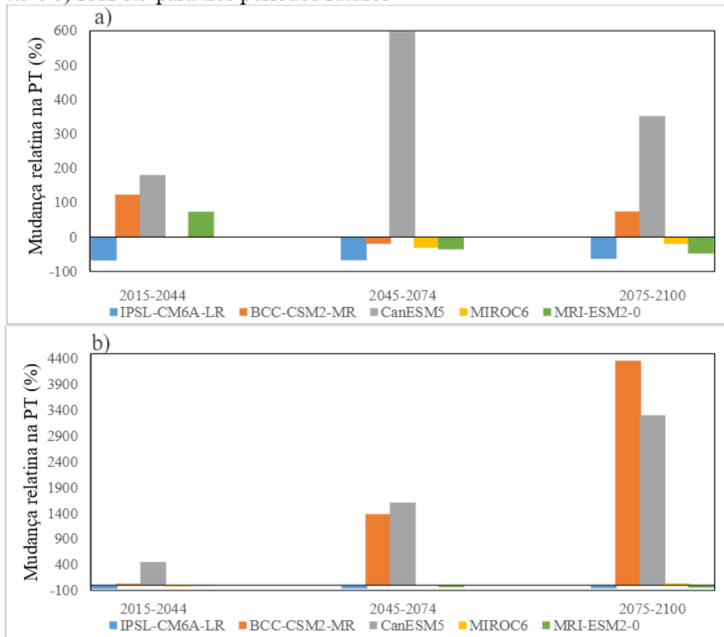
2.4.4 Concentração futura de PT sob cenários de mudanças climáticas

2.4.4.1 Mudança relativa na concentração de PT no reservatório

Os valores das projeções futuras da concentração média de PT dentro do Castanhão foram comparados com a concentração (0,034 mg/L) da *baseline* (2008-2014), obtida a partir do período com informações disponíveis a respeito da concentração de PT dentro do reservatório. A maioria dos MCGs indicaram que a concentração média de PT tende a aumentar. Observou-se, também, divergências nas projeções das concentrações médias PT, tanto de magnitude (valor absoluto da mudança relativa) quanto de sinal (tendência de crescimento ou decrescimento) (Gráfico 6). O RCP8.5 projetou maior quantidade de máximas variações relativas da concentração média de PT do que o RCP4.5. O período 2014-2044 para o RCP4.5 teve dois MCGs projetando mudanças relativas negativas da concentração média de PT, enquanto os outros modelos climáticos projetaram mudanças relativas positivas. O modelo climático IPSL-CM6A-LR projetou uma mudança relativa de -68%, enquanto o decrescimento projetado pelo modelo MIROC6 foi menos relevante, -2%. Os modelos climáticos MRI-ESM2-0, BCC-CSM2-MR e CanESM5 apresentaram mudanças relativas de 74%, 123% e 181%. No período 2045-2074, todos os MCGs, com exceção do modelo climático CanESM5, indicaram mudanças relativas negativas, variando de -67% a -19%. O modelo CanEM5 projetou uma anomalia positiva de 598%, representando um acréscimo de 0,200 mg/L na concentração média de PT da *baseline*. No período 2075-2100, os modelos MIROC6, MRI-ESM2-0 e IPSL-CM6A-LR projetaram mudanças relativas de -19%, -47% e 63%, respectivamente. No RCP8.5, os modelos BCC-CSM2-MR e CanESM5 projetaram mudanças relativas de 29% e 453% no período 2015-2044. Já os modelos MRI-ESM2-0, MIROC6 e IPSL-CM6A-LR projetaram mudanças relativas de -14%, -23% e -69%, respectivamente. No período 2045-2074, foi detectado aumentos significativos na concentração média de PT projetadas a partir dos modelos climáticos BCC-CSM2-MR e CanESM5. O primeiro projetou mudança relativa de 1381 %, que representou acréscimo de 0,463 mg/L em relação à concentração média de PT da *baseline*, enquanto o segundo modelo climático projetou acréscimo de 0,538 mg/L, equivalente à mudança relativa de 1607%. Os outros três MCGs projetaram mudanças relativas negativas para este mesmo período. Os modelos MIROC6, MRI-ESM2-0 e IPSL-CM6A-LR projetaram reduções de -9%, -37% e -64%, respectivamente. No último período, os modelos MRI-ESM2-0 e IPSL-CM6A-LR projetaram mudanças relativas de -45% e -57%, respectivamente. Os outros três MCGs projetaram tendência de aumento da concentração de PT, sendo que os

modelos BCC-CSM2-MR e CanESM5 indicaram forte degradação da qualidade da água. O modelo MIROC6 projetou uma mudança relativa de 36%, representando um acréscimo de 0,012 mg/L em relação à concentração da *baseline*. Os modelos BCC-CSM2-MR e CanESM5 projetaram acréscimos de 1,497 mg/L e 1,107 mg/L em relação a concentração de PT da *baseline*.

Gráfico 6 - Mudança relativa da concentração média de PT para cinco diferentes MCGs sob os a) RCP4.5 e b) RCP8.5 para três períodos futuros

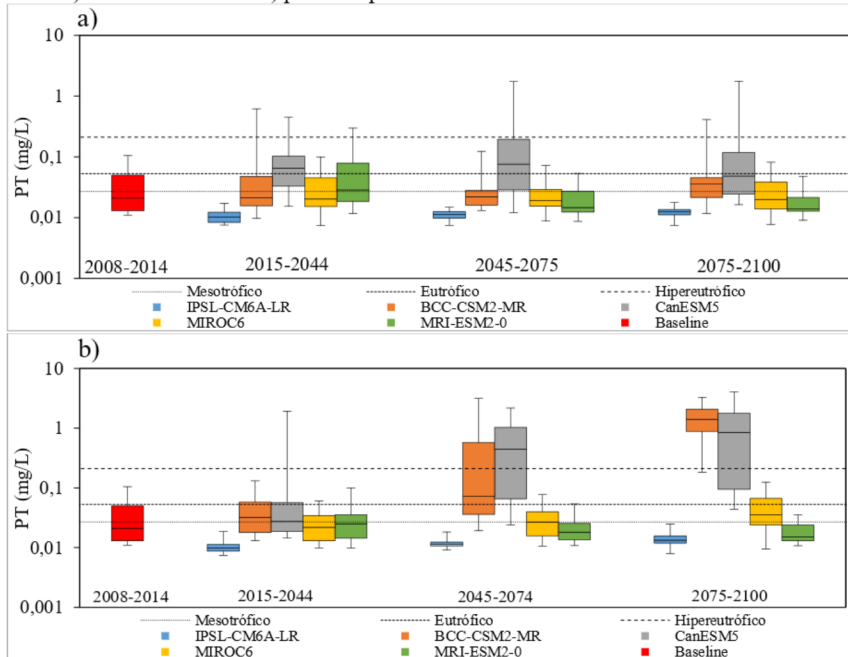


Fonte: elaborado pelo autor

2.4.4.2 Projeção da concentração de PT no reservatório

A partir dos resultados dos MCGs, o modelo de qualidade da água usado indicou a possibilidade de aumento da concentração média anual de PT no reservatório Castanhão em relação à mediana (0,021 mg/L) da *baseline* (2008-2014) para os dois RCPs nos três períodos avaliados (Gráfico 7).

Gráfico 7 - Projeções da concentração média anual de PT a partir dos cinco diferentes MCGs sob os a) RCP4.5 e RCP8.5 b) para três períodos futuros



Fonte: elaborado pelo autor.

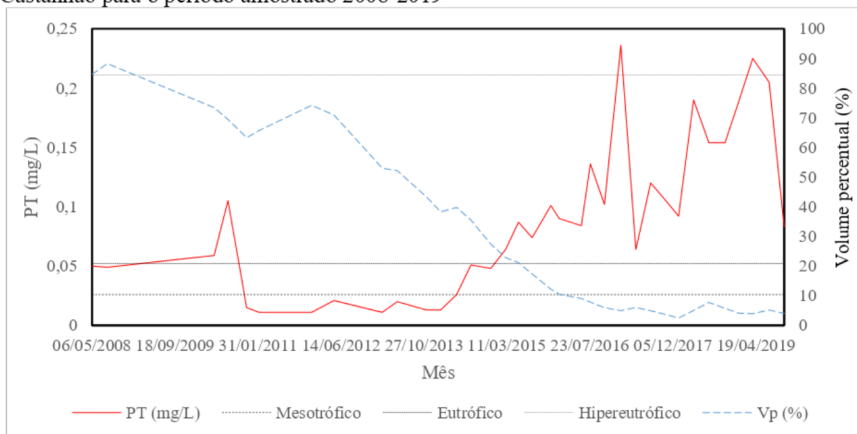
É possível observar que, em ambos os RCPs, pelo menos um MCGs apresentou a mediana da concentração média anual de PT maior do que a concentração da *baseline*, sendo que foram projetadas medianas maiores do que a mediana da *baseline* em 60% das simulações realizadas sob RCP8.5. O modelo IPSL-CM6A-LR projetou as medianas da concentração média anual de PT mais otimistas nos dois RCPs e três períodos (0,010-0,012 mg/L). Sob o RCP4.5, os modelos BCC-CM6A-LR e MIROC6 projetaram uma ligeira redução da mediana da concentração média anual de PT comparada à mediana da *baseline* para 2015-2044. Por outro lado, os modelos CanESM5 e MRI-ESM2-0 projetaram aumento, apresentando ainda 25% dos valores de concentração média anual de PT maiores do que 0,102 mg/L e 0,071 mg/L, respectivamente. No período 2045-2074, somente o modelo CanESM5 projetou crescimento da mediana da concentração média anual de PT (0,076 mg/L). No período 2075-2100, a maioria dos MCGs apresentaram aumento do valor da mediana em relação à *baseline*, no entanto os crescimentos não foram significativos. Sob o RCP8.5, todos os MCGs, com exceção do IPSL-CM6A-LR, exibiram tendência de aumento da mediana da concentração média anual de PT,

variando entre 0,022 mg/L e 0,032 mg/L. No período 2045-2074, os modelos BCC-CM6A-LR e CanESM5 exibiram forte aumento do valor da mediana da concentração média anual de PT comparada à *baseline*, 0,072 mg/L e 0,445 mg/L, respectivamente, sendo que o modelo CanESM5 apresentou 25% dos valores de concentração média anual de PT superiores à concentração de 0,963 mg/L e o modelo BCC-CM6A-LR, 25% superiores à concentração de 0,511 mg/L. No período 2075-2100, os modelos BCC-CM6A-LR e CanESM5 projetaram forte degradação da qualidade da água. Para o primeiro MCG, cerca de 75% e 25% dos valores de concentração média anual de PT foram maiores do que 0,852 mg/L e 2,03 mg/L, respectivamente. Já para o CanESM5, a mediana da concentração média anual de PT foi de 0,851 mg/L, com 25% dos valores de concentração média anual de PT maiores do que 1,66 mg/L.

2.4.4.3 Estado trófico do reservatório sob cenários de mudanças climáticas

O comportamento conjunto do volume percentual e da concentração de PT do reservatório Castanhão no período de 2008 a 2019 é exibido no Gráfico 8.

Gráfico 8 - Relação entre a concentração média de PT e o volume percentual do reservatório Castanhão para o período amostrado 2008-2019



Fonte: elaborado pelo autor

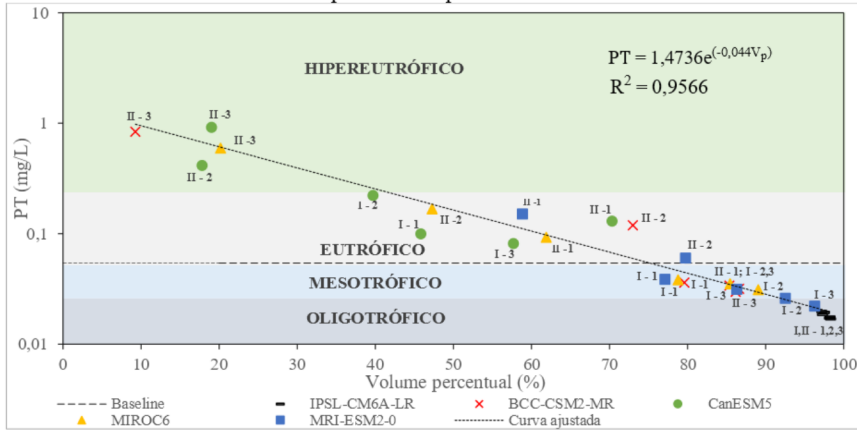
A concentração de PT apresentou considerável variabilidade, no entanto foi possível identificar uma tendência de aumento da concentração de PT dentro do reservatório ao longo dos anos. O aumento da concentração de PT pareceu ser uma resposta à redução do

volume do reservatório, notoriamente a partir volume percentual de cerca de 20%. A análise de regressão linear apontou nessa direção, com valor de correlação relativamente alto ($r = 0,67$). Consistente com isso, no geral os menores volumes geraram as maiores concentrações de PT, intensificando o estado trófico do reservatório e o processo de eutrofização ao longo do tempo. A taxa média anual de aumento da concentração de PT foi de 0,022 mg/L.

Baseado nas concentrações de PT, o reservatório Castanhão foi classificado como hipereutrófico na *baseline* (2008-2014). Nos cenários de mudanças climáticas, o estado trófico variou entre oligotrófico e hipereutrófico (Gráfico 9). O RCP8.5 projetou maior degradação da qualidade da água comparado ao RCP4.5, sendo o último período o mais pessimista para a qualidade da água do reservatório. As análises revelaram que cerca de 40% das concentrações médias de PT nos três períodos avaliados ficaram contidas ou no estado eutrófico ou no estado hipereutrófico, indicando eutrofização do reservatório. O modelo climático CanESM5 projetou valores da concentração média de PT superiores à concentração da *baseline* para os dois RCPs e três períodos futuros. Já o modelo MIROC6 projetou forte degradação da qualidade da água sob o RCP4.5. No entanto, a maior concentração de PT foi projetada pelo modelo BCC-CSM2-MR sob o RCP8.5 para o último período, o qual também projetou intensificação da eutrofização no segundo período deste mesmo cenário de emissão. O MRI-ESM2-0 projetou intensificação da eutrofização nos dois primeiros períodos sob o RCP8.5.

Para as projeções climáticas, a análise de regressão linear mostrou que a concentração média de PT dentro do reservatório Castanhão estava relacionada negativamente com o volume percentual ($R^2 = 0,94$). Este resultado indicou que a redução do volume percentual, devido ao efeito de secas prolongadas, potencializadas pelas mudanças climáticas, intensificou o estado trófico de reservatório, aumentando a possibilidade de eutrofização. Esse quadro sugere que os reservatórios do semiárido brasileiro podem ser ainda mais vulneráveis às mudanças climáticas, uma vez que já experimentam reduções gradativas do volume armazenado e efeitos de secas prolongadas. Especificamente, as maiores concentrações médias de PT ($>0,572$ mg/L) estavam associadas a volumes percentuais abaixo de 20% (**compatível com o padrão observado no Gráfico 8**), sendo que a máxima concentração (1,5 mg/L) estava relacionada ao volume percentual de quase 0%. O efeito inverso também foi observado: as menores concentrações médias de PT estavam relacionadas a volumes percentuais elevados (70%), com o modelo IPSL-CM6A-LR projetando as menores concentrações médias de PT.

Gráfico 9 - Projeção da concentração média representativa de PT dos três períodos avaliados a partir de cinco diferentes MCGs. Os períodos 2015-2044, 2045-2074 e 2075-2100 foram representados pelos números cardinais 1, 2 e 3, respectivamente, enquanto os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5 foram representados pelos números romanos I e II



Fonte: elaborado pelo autor

Também foi proposta uma expressão (Eq. 15) relacionando a concentração de PT e o volume percentual, com base no melhor ajuste aos dados, que pudesse auxiliar o tomador de decisão no gerenciamento dos impactos das mudanças climáticas na qualidade da água do reservatório Castanhão a partir do seu volume percentual.

$$PT = 1,5286e^{(-0,05V_p)} \quad (R^2 = 0,94) \quad (15)$$

2.5 Discussão

O presente estudo investigou os impactos das mudanças climáticas sobre a qualidade da água de um grande reservatório do semiárido brasileiro (Castanhão). Além disso, discutiu-se a relação da intensificação de eutrofização dos reservatórios do semiárido tropical como resultado de reduções gradativas do volume armazenado em razão das altas taxas de evaporação e eventos de seca prolongada. Com o objetivo de projetar o estado trófico futuro do reservatório Castanhão, cinco diferentes modelos climáticos foram acoplados ao modelo hidrológico SMAP, cujos outputs alimentaram a equação do balanço hídrico e um modelo de mistura completa para estimar a concentração interna de PT sob os cenários de mudanças climáticas. Os principais achados foram (i) pronunciada variação das projeções da vazão

afluente, com parte dos modelos climáticos projetando reduções, (ii) forte redução do volume estocado para parte dos cenários agregados (RCPs mais períodos futuros), especialmente nos dois últimos períodos do cenário de emissão RCP8.5, (iii) associação direta entre as reduções da vazão afluente e do volume percentual, (iv) significativo aumento da concentração interna de PT, com grande parte das concentrações de PT maiores do que a *baseline*, (v) intensificação do estado trófico para quase metade dos cenários agregados, (vi) forte correlação negativa entre a concentração interna de PT e o volume estocado, (vii) indicando que os reservatórios de regiões semiáridas podem ser mais susceptíveis à eutrofização em cenários de mudanças climáticas do que reservatórios exposto a outros climas, uma vez que já experimentam reduções gradativas do volume estocado e secas periódicas. É importante ressaltar que a abordagem aplicada neste estudo era inédita, até então, para reservatórios do semiárido brasileiro, tornando-a mais necessária para identificar os impactos das mudanças climáticas sobre a qualidade da água dos reservatórios da região e preencher lacunas existentes na literatura.

As estatísticas de calibração e validação do modelo hidrológico SMAP foram adequadas para a métrica de desempenho utilizada, NS, apresentando valor maior para a validação. De acordo com os critérios estabelecidos por Moriasi *et al.* (2007) para avaliação do desempenho de modelos no processo de calibração e validação, um valor de NS entre 0,50 e 0,65 é considerado “satisfatório”, um valor entre 0,65 e 0,75 é caracterizado como “bom”, e um valor entre 0,75 e 1,0 é considerado como “muito bom”. Portanto, os valores de calibração e validação foram enquadrados na categoria muito bom (NS = 0,82 e NS = 0,95, respectivamente). Cabe ressaltar que o modelo hidrológico SMAP tem sido usado satisfatoriamente para modelar o ciclo hidrológico e estimar a vazão afluente de reservatórios de diversas bacias brasileiras (BLOCK *et al.*, 2009; DE PAIVA; MONTENEGRO; CATALDI, 2020; KWON *et al.*, 2012). Cabe ainda destacar que a representação adequada do ciclo hidrológico na bacia hidrográfica é essencial para interligar as projeções dos MCGs ao modelo de qualidade da água, pois a vazão no ponto de controle, vazão afluente do reservatório, é um componente importante para determinar variáveis importantes, tais como volume estocado, a concentração afluente de PT, tempo de residência hidráulica, coeficiente de decaimento e, conseqüentemente, a concentração de PT dentro do reservatório, como descritas nas Eq. (9-13).

Foram observadas fortes divergências nas projeções da vazão afluente para os cinco modelos climáticos sob os cenários de mudanças climáticas. As divergências de sinal e magnitude observadas variaram de -87% a 670% (Gráfico 2). As incertezas observadas para a vazão afluente concordaram com os resultados de projeções realizadas para a bacia do Rio Jaguaribe por outros autores (GONDIM *et al.*, 2012, 2018; KROL; BRONSTERT, 2007).

Fernandes *et al.* (2017) projetaram a vazão afluente variando de -70% a 110% ao longo dos períodos 2040-2069 e 2070-2099 usando 20 modelos climáticos do CMIP5. Mais recentemente, Estácio (2020) projetou mudanças relativas variando de -75% a 400% usando 8 modelos climáticos (os mesmos 5 modelos deste trabalho com adição dos modelos climáticos FGOALS-g3, MPI-ESM1-2-HR e NESM3), para o mesmo reservatório deste estudo para o período 2025-2055 usando o CMIP6. Estudos realizados em outras regiões do NEB também apresentaram divergências nas projeções futuras da vazão afluente. Silveira, Souza Filho e Vasconcelos Júnior (2016), por exemplo, identificaram variações de -70% a 40% nas vazões afluentes do setor hidroelétrico brasileiro para o final do século XXI. As incertezas observadas nas simulações realizadas por esses autores, também verificadas neste trabalho, são inerentes às projeções dos impactos das mudanças climáticas, as quais são oriundas da alta sensibilidade dos sistemas climáticos e da própria natureza imprecisa das projeções climáticas futuras, acrescentando-se ainda as incertezas presentes nos métodos de *downscaling*, escolha dos MCGs e dados climáticos e cenários de emissão de GEEs (CLARK *et al.*, 2016; LINDENSCHMIDT; FLEISCHBEIN; BABOROWSKI, 2007). Em concordância com isso, as incertezas nas projeções dos impactos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica também foram verificadas também em diversos outros estudos para diferentes regiões ao redor do mundo (e.g. ME *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2019), sendo que todos destacaram a importância do uso da técnica *ensemble* para obter projeções futuras mais robustas (ARHEIMER *et al.*, 2005; BUCAK *et al.*, 2018; EISNER; VOSS; KYNAST, 2012; SHRESTHA *et al.*, 2017).

Na *baseline* (2002-2014), o volume percentual foi aproximadamente 60%, mas inspecionando todo o período de registros do nível de água do reservatório Castanhão (ver Gráfico 8), identificou-se uma gradativa redução do volume estocado, consequência do período de seca prolongada (a partir do ano de 2012). Além das retiradas contínuas para o abastecimento, o volume armazenado dos reservatórios do NEB sofre redução gradativa devido a altas taxas de evaporação e à irregularidade das chuvas. As projeções do volume do reservatório indicaram divergências de magnitude e sinal sob os efeitos mudanças climáticas, em resposta às fortes incertezas do clima futuro forçados pelos dois RCPs. No entanto, foram identificados eventos de secas prolongadas em decorrência das mudanças climáticas para parte dos modelos climáticos, resultando em significativo decréscimo do volume estocado no reservatório, chegando a atingir volume percentual de quase zero no cenário mais pessimista (ver Gráfico 4b). A possibilidade de redução do volume estocado foi identificada por outros estudos que avaliaram o impacto das mudanças sobre o nível de água, embora as reduções não tenham sido tão significativas como as encontradas neste trabalho (ver MOLINA-NAVARRO *et al.*, 2014;

THORNE; FENNER, 2011). As divergências nas projeções futuras do volume armazenado também foram verificadas por outros autores. Bucak *et al.* (2018), por exemplo, observaram divergências de magnitude e sinal nos resultados oriundos de cinco diferentes modelos climáticos com projeções variando de -13% a 14%. Já no estudo de Rocha Junior *et al.* (2018), realizado em reservatórios do semiárido brasileiro, foram identificados volumes percentuais próximos a zero no período mais seco do ano. Cabe ressaltar, no entanto, que estes autores não realizaram projeções a partir de MCGs, mas sim uma comparação entre duas bacias, uma úmida e outra seca, para transportar um cenário hipotético de mudanças climáticas, considerando o espaço em substituição ao tempo. No presente trabalho, a redução do volume percentual foi principalmente uma resposta ao decréscimo da vazão afluyente, com o último período sob o RCP8.5 apontando efeitos diretos da redução da vazão afluyente sobre o volume estocado do reservatório. A influência da redução da vazão afluyente sobre o decréscimo do volume armazenado foi observada por Molina-Navarro *et al.* (2014). Este achado corrobora a relação matemática identificada neste trabalho [ver Gráfico 5 e Eq. (14)].

Os resultados das projeções concentrações futuras de PT apontaram tendência de degradação da qualidade da água do Castanhão, embora tenham exibido variabilidade da resposta dos cinco diferentes MCGs. Divergências na magnitude e no sinal na projeção da concentração média de PT e de outros nutrientes representativos da qualidade da água também foram identificados em outros trabalhos (e.g. ARHEIMER *et al.*, 2005; COUTURE *et al.*, 2018; MESSINA *et al.*, 2020; NAZARI-SHARABIAN *et al.*, 2019). As incertezas nas projeções das concentrações nutrientes parecem ter sido propagadas ao longo dos modelos climáticos, hidrológico e da qualidade da água (inspeção visual das Gráficos 4, 5 e 8). O cenário RCP8.5 projetou os maiores crescimentos da concentração média anual de PT, especialmente nos dois últimos períodos (ver Gráfico 7b). Aparentemente houve efeito em cascata da redução da vazão afluyente e volume percentual e aumento da concentração de PT no reservatório.

Nas últimas décadas, vários estudos têm identificado uma forte relação entre o escoamento direto (superficial + lateral) e a carga de nutrientes de lagos e reservatórios (MOLINA-NARARRO *et al.*, 2014; SHARPLEY *et al.*, 1994; ZHENG; HUANG; NORTON, 2004). Esses resultados e o fato de que a vazão afluyente do reservatório Castanhão coincide com o escoamento direto em razão do solo cristalino indicam que a utilização da correlação entre a vazão afluyente e concentração afluyente de PT proposta por Rocha e Lima Neto (2020) pode ser uma alternativa razoável para a avaliação do impacto das mudanças climática sobre a qualidade da água de lagos e reservatórios na ausência dados de carga de nutrientes, e os resultados coerentes das projeções demonstraram a sua aplicabilidade. Mas esta abordagem

simplificada deve ser empregada com cautela por dois motivos. Primeiro, o procedimento para a elaboração da Eq. (13) envolve muitas incertezas, hidrometeorológicas e da dinâmica de nutrientes no reservatório. Em segundo lugar, a correlação desconsidera os efeitos de eventos extremos de precipitação, chuvas intensas, que reconhecidamente podem aumentar o transporte de nutrientes para os corpos hídricos (MESSINA *et al.*, 2020). Ainda no campo das deficiências dos modelos de qualidade da água utilizados, a estrutura o modelo de mistura completa usado não reflete todos os processos relacionado à concentração de PT dentro do reservatório, como a interação com os sedimentos depositados no fundo (LIRA; MEDEIROS; LIMA NETO, 2020; MOURA *et al.*, 2020). Por outro lado, diferentemente de Molina-Navarro *et al.* (2014) que utilizaram o modelo de mistura completa no estado permanente, o modelo de mistura completa empregado neste trabalho foi adaptado para os reservatórios do clima tropical semiárido (TONÉ; LIMA NETO, 2020), considerando ainda o estado transiente e a alta variabilidade do volume estocado, a fim de realizar projeções futuras das concentrações de PT sob cenários de mudanças climáticas de forma mais condizente com a realidade da região. Esta última consideração é uma característica marcante dos corpos hídricos de bacias semiáridas (BRASIL *et al.*, 2016; LIRA; MEDEIROS; LIMA NETO, 2020). A utilização do modelo transiente frente ao modelo permanente tem impacto significativo sobre a projeção da concentração de PT, pois a versão permanente desconsidera a concentração de PT residual de um ano para o outro, por considerá-los independentes (resultado não publicado). Tal fato pode explicar as baixas concentrações de PT encontradas por Molina-Navarro *et al.* (2014) e consequentes estados tróficos mais otimistas (no trabalho destes autores nenhuma projeção indicou eutrofização do reservatório investigado).

O fósforo é considerado o nutriente limitante da eutrofização, sendo um elemento importante para caracterizar a qualidade da água lagos e reservatórios (HUSZAR *et al.*, 2006). Baseado nas concentrações médias de PT, quase metade dos cenários agregados indicaram eutrofização do reservatório Castanhão (ver Gráfico 9). A qualidade inadequada da água tem influência direta no aspecto quantitativo do recurso hídrico, uma vez que água poluída é imprópria para atender usos doméstico, industrial, recreacional e agrícola (ZHANG *et al.*, 2019). As concentrações médias de PT no reservatório exibiram uma forte correlação negativa com o volume percentual (ver Gráfico 9). Este resultado confirma a hipótese de Rocha Junior *et al.* (2018) que a redução do volume estocado como impacto das mudanças climáticas intensifica a condição trófica dos reservatórios do semiárido tropical. Isso ocorre porque redução do volume estocado desses corpos hídricos aumenta a concentração interna de PT, uma vez que não há alteração da massa desse nutriente (BUCAK *et al.*, 2018; JEPPESEN *et al.*, 2015). Por outro lado, o fluxo total que alimenta os corpos hídricos corresponde a um dos meios de transporte

de nutrientes gerados na bacia ou sub-bacia, como esgotos e poluentes oriundos de atividades agrícolas e da pecuária, de modo que os cenários que projetaram decréscimo da vazão afluente também podem contribuir com aumento da concentração de nutrientes dentro do reservatório, visto que a redução do *runoff* diminui a capacidade de diluição dos poluentes transportados (ARAÚJO; LIMA NETO; BECKER, 2019; PAULA FILHO *et al.*, 2019). Esse panorama foi indicado por Me *et al.* (2018), que verificaram que as mudanças climáticas podem intensificar diversas formas de poluição da bacia hidrográfica. Nesse contexto, o efeito negativo de secas prolongadas sobre a qualidade da água parece ser mais preocupante para reservatórios do semiárido tropical, pois estes já experimentam reduções gradativas do volume, forte sazonalidade da vazão afluente e secas periódicas. Estes resultados são particularmente importantes, pois o modelo de mistura completa usado no presente estudo foi expresso, direto ou indiretamente, em função dessas características (Eq. 11), uma vez que o coeficiente de decaimento do PT e o tempo de residência hidráulica são descritos como funções da vazão afluente e do volume estocado. Isso permite que as características da forte sazonalidade da vazão afluente e as reduções gradativas do volume estocado que os reservatórios do semiárido brasileiro experimentam sejam levadas em consideração. Portanto, o modelo de mistura completa, considerando essas particularidades, parece apropriado para investigar os impactos das mudanças climáticas sobre a qualidade da água de reservatórios do semiárido tropical.

Sabendo da influência que a vazão afluente tem sobre o volume percentual de lagos e reservatórios, foi proposta uma expressão que relaciona essas duas variáveis para o Castanhão [Eq. (14), $R^2 = 0,94$]. A expressão conseguiu capturar adequadamente as projeções dos cinco diferentes MCGs para os cenários agregados. Nesse mesmo sentido, também foi proposta uma fórmula que relaciona a concentração de PT no reservatório e o seu volume percentual e, conseqüentemente, seu estado trófico [Eq. (15)], $R^2 = 0,94$]. Essas expressões matemáticas podem servir como ferramentas de gerenciamento sustentável da qualidade da água do Castanhão sob cenários de mudanças climáticas, uma vez que permitem antecipar os impactos das mudanças climáticas sobre a hidrologia e a qualidade da água do reservatório.

A maioria dos estudos disponíveis na literatura de impacto das mudanças climáticas sobre a qualidade da água de lagos e reservatórios se concentra em corpos hídricos de clima temperado e tropical (ARHEIMER *et al.*, 2005; BUCAK *et al.*, 2018; CHANG *et al.*, 2015; COUTURE *et al.*, 2018; ME *et al.*, 2018; MESSINA *et al.*, 2020; MOLINA-NAVARRO *et al.*, 2014; NAZARI-SHARABIAN *et al.*, 2019; THORNE; FENNER, 2011; TROLLE *et al.*, 2011; ZHANG *et al.*, 2019), o que ratifica a contribuição do presente trabalho, realizado sobre um grande reservatório do semiárido tropical. Nesses estudos, apenas três projetaram eutrofização

dos corpos hídricos, embora todos os trabalhos tenham apontado a possibilidade de intensificação do estado trófico. Messina *et al.* (2020), investigando o Lago Auburn, EUA, projetaram o valor mais pessimista na camada do hipolimnio (0,055 mg/L), mas no epilimnio o valor máximo foi de apenas 0,026 mg/L. Nazari-Sharabian *et al.* (2019), investigando um reservatório no Iran, projetaram os valores de 0,106 mg/L e 0,109 mg/L nos dois cenários mais pessimistas. No estudo de Zhang *et al.* (2019) foram projetados os aumentos mais drásticos dentre os estudos disponíveis na literatura, valores chegaram a 0,223 mg/L no cenário mais pessimista, indicando o estado hipereutrófico do reservatório. Através de uma comparação entre os valores mais pessimistas de concentrações de PT desses trabalhos com os valores mais pessimistas do presente estudo (Ver Gráfico 9), tem-se uma forte evidência de que os reservatórios do semiárido tropical podem ser mais susceptíveis à eutrofização em decorrência dos impactos das mudanças climáticas do que outras regiões ao redor do mundo.

Este trabalho encontrou relações que sugerem que as altas concentrações de PT no Castanhão estavam relacionadas às interferências das mudanças climáticas sobre duas variáveis: vazão afluente e volume armazenado do reservatório (Ver Gráficos 5 e 9). O decréscimo dessas duas variáveis demonstrou potencial impacto negativo sobre a concentração interna de PT e, conseqüentemente, sobre o seu estado trófico, demonstrado por valores expressivos das concentrações desse poluente. Resultados registrados por outros autores a respeito da concentração interna de PT de reservatórios espalhados pelo mundo validam os valores expressivos das concentrações encontradas nesta pesquisa para os cenários agregados mais pessimistas (ver Gráfico 9). Jensen *et al.* (2006), ao investigarem a dinâmica do fósforo de 16 lagos eutrificados na Dinamarca, registraram concentrações médias de PT nos lagos na faixa 0,094-0,963 mg/L. Rocha Junior *et al.* (2018) reportaram valores de concentrações médias de PT maiores que 1,0 mg/L em mais da metade dos reservatórios avaliados (5 dos 8 reservatórios estudados) durante o período mais seco do ano em uma das sub-bacias analisadas, a qual estava inserida em uma região com clima semiárido do estado do Rio Grande do Norte, Brasil.

Outro ponto que merece atenção é o favorecimento da proliferação e expansão de florações de cianobactérias em decorrência da eutrofização e das mudanças climáticas (PAERL; HUISMAN, 2009; O'NEIL *et al.*, 2012). Portanto, pode-se dizer que os cenários agregados que projetaram eutrofização do reservatório Castanhão sugerem um favorecimento da floração de cianobactérias (SHALBY; ELSHEMY; ZEIDAN, 2020), podendo impactar no equilíbrio do ecossistema aquático, nos custos com tratamento de água e na saúde humana (CARVALHO *et al.*, 2013). Por isso, é necessário enfatizar a necessidade de controlar a entrada de fósforo no reservatório, considerada a grande medida capaz neutralizar a eutrofização dos corpos hídricos

(SCHINDLER *et al.*, 2016). Tal sugestão torna-se ainda mais necessária devido à baixa cobertura e tratamento do esgoto da sub-bacia estudada (33%). Nesse sentido, diversos estudos têm apontado a necessidade de reduções das cargas externas de nutrientes para impedir altas concentrações de poluentes nos lagos e reservatórios e consequente floração de cianobactérias como uma das medidas de combate aos efeitos da intensificação do aquecimento global (BUCAK *et al.*, 2018; KOSTEN *et al.*, 2012; NAZARI-SHARABIAN *et al.*, 2019; NIELSEN *et al.*, 2014; TROLLE *et al.*, 2011). No entanto, além das medidas de controle do uso do solo, são necessárias restrições mais rígidas nas retiradas de água e que a operação do reservatório considere aspectos qualitativos como um dos objetivos a serem atingidos (AZADI; ASHOFTEH; SOLOMATINE, 2019; EHSANI *et al.*, 2017; FELDBAUER *et al.*, 2020; NAZARI-SHARABIAN *et al.*, 2019; SHORKI; HADDAD; MARIÑO, 2014).

Beaver *et al.* (2013) afirmaram que a direção dos impactos das mudanças climáticas depende de um dado local, bem como das características da bacia e do reservatório, mas as fortes incertezas observadas nas projeções usando a combinação integrada configuram-se como mais um elemento que precisa ser considerado no processo de tomada de decisão. Esse quadro indica a necessidade considerar as incertezas ao longo da modelagem integrada, ou pelo menos nos seus outputs finais. Podem ser destacado duas alternativas comumente usadas para incorporação das incertezas na modelagem: método probabilístico e lógica *fuzzy* (AHMADI; NASSERI; SOLOMATINE, 2019). No entanto, o presente estudo cumpriu seu objetivo de avaliar o impacto das mudanças climáticas sobre a qualidade da água de um reservatório do semiárido brasileiro. Além disso, forneceu informações secundárias importantes, com contribuição pertinente para a literatura, uma vez que estudos dessa natureza até então eram inexistentes para a região do NEB, incluindo, evidentemente, a Bacia do Rio Jaguaribe.

2.6 Conclusões

Os efeitos das mudanças climáticas sobre estado trófico do reservatório Castanhão foram investigados utilizando uma combinação de modelos climáticos, hidrológico e de qualidade da água. O estudo destacou o efeito das secas prolongadas sobre a degradação da qualidade da água dos reservatórios do semiárido brasileiro. Foram identificadas fortes incertezas nas projeções futuras das principais variáveis avaliadas, sugerindo a propagação de incertezas ao longo das etapas da abordagem integrada, resultando em divergências de magnitude e de sinal nas projeções climática, hidrológica e da qualidade da água. No entanto, parte das projeções indicou resultados preocupantes relacionados à qualidade da água do

reservatório. As mudanças climáticas também demonstraram capacidade de afetar duas variáveis importantes do reservatório: vazão afluyente e volume percentual. A redução do volume armazenado estava relacionada principalmente à redução da vazão afluyente. Essa redução teve impacto na propriedade de diluição da vazão afluyente, promovendo maior concentração afluyente de PT no corpo hidrico. Já o decrescimento do volume implicou em aumento da concentração interna do PT do reservatório. Nesse sentido, o reservatório respondeu às reduções da vazão afluyente e volume estocado com aumento da concentração interna de PT. Como impacto direto, projetou-se intensificação do estado trófico para metade dos cenários agregados, comparado à *baseline*. Além disso, foi detectado a eutrofização do reservatório (estado eutrófico e hipereutrófico) em 40% dos cenários agregados. A degradação da qualidade da água se mostrou mais preocupante no último período avaliado (2075-2100) para o RCP8.5. Verificou-se, também, que eventos de seca podem ser potencializados sob os cenários de mudanças climáticas, principalmente no final do século para sob o RCP8.5, aumentando fortemente a concentração interna de PT. Este resultado sugeriu que os corpos hidricos do semiárido tropical podem ser mais vulneráveis ao fenômeno de eutrofização em cenários de mudanças climáticas do que corpos hidricos de outras regiões ao redor do mundo, pois já sofrem com reduções gradativas do volume estocado e secas periódicas. Por fim, constatou-se que a abordagem integrada de modelos climáticos, hidrológico e de qualidade da água pode fornecer informações relevantes e auxiliar os tomadores de decisão no desenvolvimento de medidas mitigadoras para combater os impactos negativos das mudanças climáticas sobre os reservatórios do semiárido brasileiro.

3 ANÁLISE DE RISCO DE EUTROFIZAÇÃO DE UM GRANDE RESERVATÓRIO DO NORDESTE DO BRASIL (NEB) SOB CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS²

3.1 Resumo

As projeções climáticas futuras têm evidenciado que as alterações do clima podem afetar o sistema atmosférico e o ciclo hidrológico, resultando no aumento da amplitude e frequência de secas e cheias e ampliando as incertezas e riscos no gerenciamento dos recursos hídricos. Este estudo avaliou o risco de eutrofização do reservatório Orós, localizado no Estado do Ceará, Brasil, tomando como variável representativa da qualidade da água a concentração de PT, sob os RCP4.5 e RCP8.5 e três períodos futuros. O estudo também avaliou o efeito da sazonalidade e diferentes condições de concentração afluentes de PT e retiradas da água sobre a concentração interna de PT. Empregou-se uma abordagem combinada de modelos climáticos, hidrológico e de qualidade da água para projetar as concentrações futuras de PT no reservatório, organizando posteriormente os outputs como Funções Densidade Acumulada (FDAs) para o cálculo do risco de eutrofização. As projeções indicaram fortes incertezas nos cenários futuros das concentrações de PT, indicando a necessidade da abordagem de análise de risco. As FDAs indicaram chances de eutrofização nos três períodos futuros avaliados, com o final do século XXI experimentando o maior risco de eutrofização. Os resultados também apontaram influência da sazonalidade na qualidade da água do reservatório, com as maiores concentrações de PT sendo registradas durante o período seco. Simulações de reduções da carga de PT e retirada de água do reservatório demonstraram ser imprescindíveis para minimizar o impacto das mudanças climáticas. Conclui-se que o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos da sub-bacia do Alto Jaguaribe requer a avaliação dos impactos das mudanças climáticas tanto na quantidade quanto na qualidade da água, incorporando informações do risco de eutrofização dos reservatórios e o efeito sazonalidade sobre a concentração de interna de PT.

Palavras-chave: Análise de risco. Sazonalidade. Reservatórios.

² RAULINO, J. B. S.; SILVEIRA, C. S.; LIMA NETO, I. E. Eutrophication risk assessment of a large in the Brazilian semiarid region under climate change scenarios. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 2020. (Submetido)

3.2 Introdução

As incertezas são inerentes à modelagem de sistemas reais. As incertezas geralmente são categorizadas como naturais ou epistêmicas (BEVEN, 2016; TUNG, 2018). As do primeiro tipo estão relacionados à variabilidade do sistema climático e do ciclo hidrológico, enquanto as do segundo tipo podem ser categorizadas como métricas, paramétricas ou estruturais (GUPTA; GOVINDARAJU, 2019; KUNDZEWICZ *et al.*, 2018). Um dos grandes desafios relacionados aos estudos das mudanças climáticas tanto sobre os aspectos quantitativos quanto qualitativos dos recursos hídricos são as incertezas presentes na abordagem combinada. O espalhamento dos outputs finais projetados, por exemplo, estabelece-se como um grande desafio para o gerenciamento sustentável da qualidade da água dos corpos hídricos em cenários de mudanças climáticas (SHALBY; ELSHEMY; ZEIDAN, 2020).

Existe um consenso entre os pesquisadores que os dados de mudanças climáticas, a escolha dos modelos climáticos, os cenários de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEEs) e o método de *downscaling* são comumente as incertezas mais importantes, quando os dados climáticos projetados e modelos hidrológico e de qualidade da água são acoplados para avaliação do impacto das mudanças climáticas sobre a qualidade da água de corpos hídricos (CLARK *et al.*, 2016; LINDENSCHMIDT; FLEISCHBEIN; BABOROWSKI, 2007). Ressalta-se que a consideração da variação dos outputs usando a abordagem multimodelo torna as incertezas estruturais e paramétricas relativamente menos importantes (CHANG *et al.*, 2015; ESTÁCIO, 2020; HORTON *et al.*, 2006; KAY *et al.*, 2009; WILBY; HARRIS, 2006).

Muitos autores têm apontado que a técnica *ensemble* deve ser empregado para fornecer uma abordagem mais robusta dos impactos das mudanças climáticas na qualidade da água dos corpos hídricos devido às diversas incertezas nas projeções climáticas futuras (e. g. BUCAK *et al.*, 2018; MOLINA-NAVARRO *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2019). No entanto, as incertezas nos outputs de variáveis representativas da qualidade da água podem criar grandes faixas de atuação que tornam a elaboração de estratégias de combate aos impactos negativos das mudanças climáticas mais complexas e de difícil aplicação (ME *et al.*, 2018). Nessas situações, trabalhar com os riscos gerados pelas incertezas globais, ou seja, dos outputs finais da variável representativa da qualidade da água, pode ser útil para fornecer informações mais adequadas para o tomador de decisão (SABOIA *et al.*, 2020). Nesse sentido, uma das alternativas é utilizar o conceito de Função Densidade Acumulada (FDA) para indicar o risco do sistema hídrico considerando os outputs dos conjuntos de modelos climáticos utilizados. Alguns estudos que investigaram os impactos das mudanças climáticas sobre a qualidade da

água de lagos e reservatórios empregaram com sucesso essa metodologia, gerando informações mais adequadas para o gerenciamento de risco de degradação do corpo hídrico (e. g. SHALBY; ELSHEMY; ZEIDAN, 2020; THORNE; FENNER, 2011). Essa abordagem é ainda mais relevante e necessária para regiões onde as projeções climáticas futuras experimentam fortes divergências nos outputs climáticos (e. g. precipitação) e hidrológicos (e. g. vazão afluente) tanto de magnitude (valor absoluto da mudança futura esperada) quanto de sinal (crescimento/decrescimento da variável estudada), o que torna o gerenciamento dos recursos hídricos ainda mais complexo, como o caso de bacia do Alto Jaguaribe (ESTÁCIO, 2020).

Comparado a outros estudos no contexto de mudanças climáticas, este trabalho apresenta três contribuições importantes para a região Nordeste do Brasil (NEB) e para bacias semiáridas. Primeiro, é realizada uma investigação dos impactos da sazonalidade sobre o nível da concentração de PT em um grande reservatório tropical (Orós). Em segundo lugar, é usado o conceito de probabilidade de excedência na abordagem integrada de modelos climático, hidrológico e da qualidade da água para fornecer informações do risco de eutrofização do reservatório. Terceiro, é verificado o efeito das reduções da carga de nutrientes e retirada de água sobre a qualidade da água do reservatório. Especificamente, os objetivos desta pesquisa são: (1) projetar concentrações futuras de PT por meio de uma abordagem integrada utilizando cinco diferentes modelos climáticos, um modelo hidrológico e um modelo de qualidade da água para o Reservatório Orós, localizado no Estado do Ceará, Brasil, sob os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5 para os períodos 2015-2044, 2045-2074 e 2075-2100; (2) quantificar o risco de eutrofização do reservatório considerando os outputs do modelo de qualidade da água utilizando FDAs; (3) analisar o impacto da sazonalidade sobre a concentração de PT dentro do reservatório; e (4) avaliar os efeitos de reduções da concentração afluente de PT e retirada de água do reservatório sobre o seu estado trófico. Na visão do autor, trata-se de um estudo inédito para o NEB.

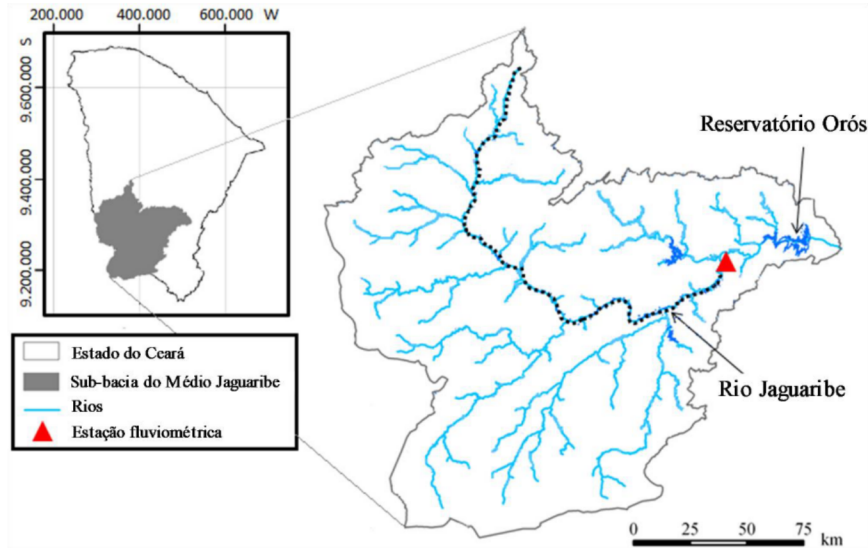
3.3 Materiais e métodos

3.3.1 Área de estudo

A sub-bacia do Alto Jaguaribe abrange uma área de 24.639 km² sobre o domínio hidrogeológico cristalino, constituída principalmente por solo neossolo litólico e argissolo vermelho e amarelo (COGERH, 2011). O reservatório Orós é o maior dessa sub-bacia e o segundo maior do estado (1.940 hm³) (MALVEIRA; DE ARAÚJO; GUNTNER, 2012) (Figura

3). O monitoramento da vazão afluente do reservatório é feito através da Estação Fluviométrica de Iguatu, com o Rio Jaguaribe sendo o responsável pelo principal aporte hídrico. O uso do solo da área de drenagem do reservatório é fortemente influenciado pela ação antrópica, com predomínio da agropecuária e de atividades agrícolas, as quais impactam negativamente a qualidade da água dos reservatórios da sub-bacia. Além disso, a cobertura de saneamento básico é relativamente baixa, 46% (COGERH, 2011).

Figura 3 - Localização da sub-bacia do Alto Jaguaribe e do reservatório Orós, Estado do Ceará, Brasil.



Fonte: elaborado pelo autor

3.3.2 Modelagem hidrológica

A modelagem hidrológica neste Capítulo seguiu o mesmo procedimento da Seção 2.3 do Capítulo 1, sendo os períodos 2005-2007 e 2008-2010 utilizados para a calibração e validação, respectivamente. Os dados de vazão afluente, precipitação e evapotranspiração potencial para a sub-bacia do Alto Jaguaribe foram obtidas das mesmas instituições (ANA, FUNCEME, INMET).

3.3.3 Cenários de mudanças climáticas

Este Capítulo usou os mesmos MCGs do Capítulo 2 (BCC-CSM2-MR, CanESM5, IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MRI-ESM2-0) sob os RCP4.5 e RCP8.5 para gerar os dados futuros de temperatura e precipitação. A correção do viés dos dados climáticos usou dados observacionais provenientes da FUNCEME (<https://www.funceme.br>) para o período 1974-1999 e do INMET. O modelo SMAP, calibrado e validado, gerou as vazões afluentes do Orós para três períodos futuros: 2015-2044, 2045-2074 e 2075-2100.

3.3.4 Modelo de mistura completa

A Eq. (15) foi utilizada para prever a concentração sazonal (período chuvoso, fevereiro-maio, e período seco, junho-janeiro) e interanual de PT no reservatório Orós. A estimativa da concentração afluente de PT no reservatório usou uma correlação proposta por Rocha e Lima Neto (2020) para esse reservatório, devido à indisponibilidade de dados de carga afluente de PT.

$$c_a = 4,462Q_a^{-0,964} \quad (15)$$

O valor do R^2 para a correlação foi de 0,92, sendo que a análise de variância apresentou $P < 0,0001$ para um nível de significância de 95%. A vazão mínima foi estabelecida como 0,1 m³/s que corresponde a concentração afluente máxima de PT de 39,23 mg/L.

3.3.5 Análise de risco de eutrofização

Com o objetivo de fornecer informações mais adequadas ou pelos menos mais convenientes para os tomadores de decisão, levando em consideração incertezas inerentes aos resultados das projeções dos impactos das mudanças climáticas sobre a qualidade da água de reservatórios, as concentrações médias anuais de PT, projetadas a partir do acoplamento de modelos climáticos, hidrológico e de qualidade da água, foram organizadas em FDAs para estimar a probabilidade de excedência de valores de referência. A metodologia adotada foi similar a utilizada por Chang *et al.* (2015). As expressões a seguir representam os três valores de referência utilizados neste trabalho.

$$\text{Risco para o nível mesotrófico} = 1 - \text{FDA} (0,027 \text{ mg/L}) \quad (16)$$

$$\text{Risco para o nível eutrófico} = 1 - \text{FDA} (0,053 \text{ mg/L}) \quad (17)$$

$$\text{Risco para o nível hipereutrófico} = 1 - \text{FDA} (0,211 \text{ mg/L}) \quad (18)$$

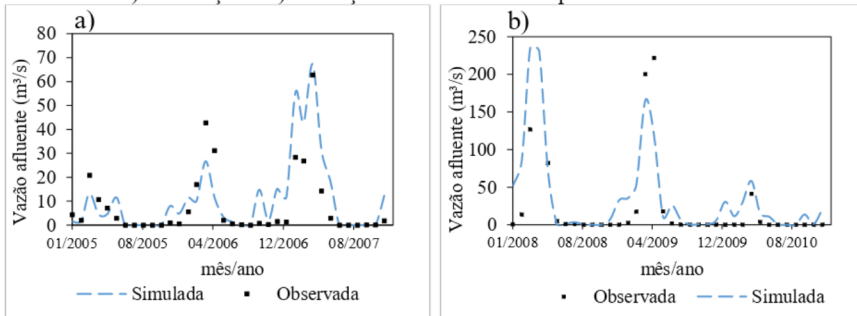
Os valores de referência acima representam diferentes níveis da concentração interna de PT que, se atingidos ou excedidos, indicam um problema com a qualidade da água do reservatório (SHALBY; ELSHEMY; ZEIDAN, 2020). Particularmente, as duas últimas expressões representam diferentes níveis de eutrofização do reservatório.

3.4 Resultados e discussão

3.4.1 Desempenho do modelo hidrológico SMAP

O Gráfico 10 exibe os resultados da calibração e validação do modelo hidrológico SMAP para o reservatório Orós. A calibração resultou no valor de NS = 0,72, enquanto que para a validação foi NS = 0,74. De acordo com Moriasi *et al.* (2007), valores de NS entre 0,65 e 0,75 são considerados como “bom”. Então, os resultados obtidos no presente estudo são considerados adequados.

Gráfico 10 – a) Calibração e b) validação do modelo SMAP para o Orós



Fonte: elaborado pelo autor

3.4.2 Impacto na disponibilidade hídrica

3.4.2.1 Alterações na vazão afluente do reservatório

A Tabela 2 exhibe as mudanças na vazão afluyente gerada pelo SMAP usando cinco diferentes modelos climáticos sob os RCP4.5 e RCP8.5 para três periodos futuros.

Tabela 2 - Mudanças relativas para vazão afluyente gerada pelo SMAP usando cinco diferentes MCGs com dois RCPs e três periodos futuros

MCGs	2015-2044		2045-2074		2075-2100	
	% Mudança		% Mudança		% Mudança	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
IPSL-CM6A-LR	633,3	39,3	602,0	677,5	599,1	757,7
BCC-CSM2-MR	37,3	23,7	33,0	-10,5	17,9	-61,3
CanESM5	-6,9	10,4	-3,1	-49,0	-10,1	-55,7
MIROC6	41,9	43,5	56,8	-22,8	78,6	-50,8
MRI-ESM2-0	28,5	10,4	146,5	149,7	173,7	214,2

Fonte: elaborado pelo autor

As projeções da vazão afluyente média exibiram fortes divergências tanto em magnitude quanto de sinal (Tabela 2), com mudanças relativas variando de - 61% a 758% em relação à vazão afluyente (29,84 m³/s) da *baseline* (1973-2000). O modelo IPSL-CM6A-LR apontou a maior mudança relativa (positiva) dentro todos os modelos climáticos, para os dois cenários de emissão e para os três periodos futuros. Os outros quatro modelos climáticos exibiram forte variabilidade na mudança relativa, de acordo com o cenário de emissão e periodo de futuro. No entanto, o modelo CanESM5 demonstrou um padrão de redução da vazão afluyente do reservatório, embora a maior mudança relativa negativa tenha sido projetada pelo modelo BCC-CSM2-MR, a qual ocorreu no final do século XXI sob o RCP8.5.

Diversos outros trabalhos que avaliaram o impacto das mudanças climáticas sobre a vazão afluyente de reservatórios da região NEB, bem como sobre a sub-bacia do Alto Rio Jaguaribe, também encontraram fortes divergências nas projeções, corroborando com os resultados encontrados neste estudo (e. g. ESTÁCIO, 2020; SILVA et al., 2020).

A Tabela 2 também mostra que o cenário de emissão RCP8.5 tem um efeito maior na redução da vazão afluyente comparado ao RCP4.5, com os dois últimos periodos exibindo mudanças relativas negativas para a maioria dos modelos climáticos, as quais variaram de - 11% a - 49% no periodo 2045-2074 e de -51% a -61% no periodo 2075-2100. A mesma tendência foi observada no trabalho de Fernandes *et al.* (2017), que investigaram outros dois grandes reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe (Castanhão e Banabuiú).

3.4.2.2 Alterações no volume percentual do reservatório

A Tabela 3 exibe as mudanças no volume percentual gerado pelo balanço hídrico do reservatório Orós usando cinco diferentes modelos climáticos sob os RCP4.5 e RCP8.5 para os períodos 2015-2044, 2045-2074 e 2075-2100.

Tabela 3 - Mudanças relativas para volume percentual gerado pelo balanço hídrico do reservatório Orós usando cinco diferentes MCGs com dois RCPs e três períodos futuros

MCGs	2015-2044		2045-2074		2075-2100	
	% Mudança		% Mudança		% Mudança	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
IPSL-CM6A-LR	76,0	75,7	75,8	74,0	74,1	74,5
BCC-CSM2-MR	54,2	42,5	55,0	30,6	52,7	-83,4
CanESM5	-18,0	25,8	-29,0	-68,1	3,3	-65,9
MIROC6	41,0	10,8	59,4	-15,4	52,9	-63,9
MRI-ESM2-0	38,0	5,3	65,6	42,7	72,3	54,4

Fonte: elaborado pelo autor

Para a *baseline* (1986-2000), o volume percentual médio foi 56%. Para os cenários de mudanças climáticas, o volume percentual projetado experimentou grande flutuação. As divergências nas projeções indicaram a propagação das incertezas ao longo dos MCGs, SMAP e balanço hídrico do reservatório. De fato, é possível observar, de maneira geral, concordância entre as tendências projetadas da vazão afluyente e do volume percentual (ver Tabelas 2 e 3). No RCP4.5, o modelo CanESM5 foi o único a projetar tendência de redução do volume estocado, exceto para o período 2075-2100. Já o modelo IPSL-CM6A-LR projetou a maior tendência de aumento do volume, com mudança relativa média de 75%. Por outro lado, o RCP8.5 exibiu forte declínio do volume percentual nos dois últimos períodos, com a maioria dos MCGs apontando redução do volume estocado no final do século XXI. O modelo BCC-CSM2-MR projetou volume percentual menor do que 20%, o qual tende a impactar negativamente a qualidade da água do Orós, em razão do aumento da concentração interna de PT (COSTA; ATTAYDE; BECKER, 2016). Porém, não há estudos disponíveis dessa natureza para a sub-bacia do Alto Jaguaribe, bem como para todo o estado do Ceará, os quais concentram-se em impactos quantitativos (e.g. ESTÁCIO, 2020; GONDIM *et al.*, 2018). No entanto, alguns estudos ao redor do mundo oferecem a possibilidade de comparações gerais. Molina-Navarro *et al.* (2014), por exemplo, também observaram divergências nas projeções do nível de água futuro. O mesmo foi identificado no estudo realizado por Bucak *et al.* (2018).

3.4.3 Efeitos sobre a qualidade da água do reservatório

3.4.3.1 Alterações na concentração interna de PT

Na *baseline* (2012-2014), a concentração de PT dentro do reservatório Orós foi de 0,054 mg/L. Para as projeções futuras, as mudanças relativas exibiram significativa variabilidade, com os RCPs divergindo na tendência predominante (Tabela 3). Para o RCP4.5, observou-se majoritariamente tendência de redução da concentração média de PT em relação à concentração de PT da *baseline*. Nesse cenário de emissão, o modelo CanESM5 foi único que projetou aumento da concentração de PT, com maior mudança relativa sendo observada no período 2045-2074 (309%). Em contraste, sob o RCP8.5 observou-se considerável aumento da concentração de PT no reservatório, com a maioria dos MCGs apontando tendência de aumento nos três períodos, com forte degradação da qualidade da água no final do século XXI, o qual apontou mudança relativa variando de 995% a 1588%.

A análise de regressão linear revelou uma forte correlação negativa entre a concentração de PT dentro do reservatório e o seu volume percentual (2012-2019: 0,87; 2015-2100: 0,98). Rocha Júnior *et al.*, (2018) encontraram resultado equivalente ao investigarem reservatórios de duas sub-bacias semiáridas no estado do Rio Grande do Norte, Brasil. Esses autores ainda destacaram que essa relação de causa e efeito é mais pronunciada no NEB devido às secas periódicas e às altas taxas de evaporação. É importante ressaltar que o decréscimo da vazão afluente também pode contribuir com a degradação da qualidade da água, uma vez que reduz a capacidade de diluição dos poluentes que são transportados da bacia para o reservatório (ARAÚJO; LIMA NETO; BECKER, 2019; MOLINA-NAVARRO *et al.*, 2014).

Tabela 4 - Mudanças relativas para a concentração média de PT gerada pelo modelo de mistura completa usando cinco diferentes MCGs com dois RCPs e três períodos futuros

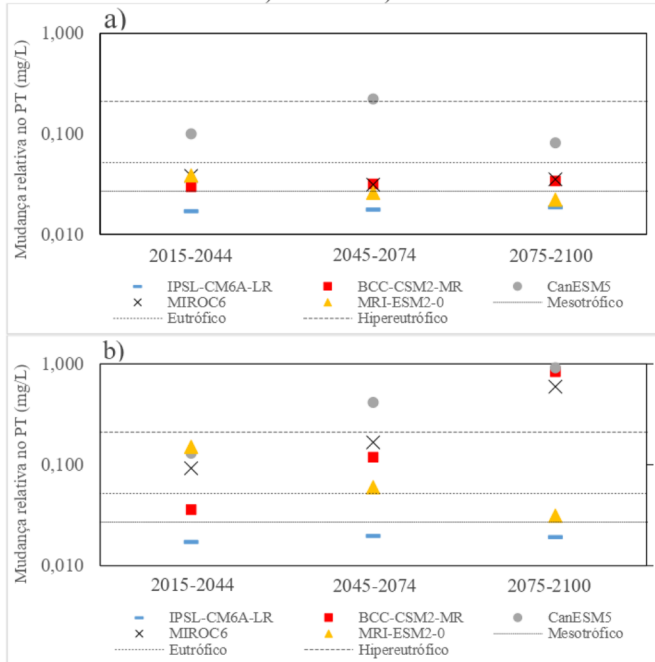
MCGs	2015-2044		2045-2074		2075-2100	
	% Mudança		% Mudança		% Mudança	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
IPSL-CM6A-LR	-68,8	-68,2	-67,5	-63,6	-65,7	-64,5
BCC-CSM2-MR	-45,3	-33,5	-41,5	119,8	-37,4	144,7
CanESM5	83,9	139,8	309,3	665,1	50,1	1588,3
MIROC6	-29,6	71,1	-42,6	208,5	-34,9	995,2
MRI-ESM2-0	-28,9	178,6	-52,1	10,7	-59,3	-42,2

Fonte: elaborado pelo autor

2.4.3.2 Projeções da concentração de PT no reservatório

O Gráfico 11 exibe as projeções das concentrações representativas de PT dentro do reservatório Orós para três períodos futuros sob os RCP4.5 e RCP8.5, a partir da adaptação do modelo empírico de Vollenweider (1968) [Eq. (11)].

Gráfico 11 - Concentração média representativa de PT no Orós para três períodos futuros usando cinco diferentes MCGs sob os a) RCP4.5 e b) RCP8.5



Fonte: elaborado pelo autor

Para o RCP4.5, apenas 20% das projeções indicaram eutrofização do reservatório, todas concentradas em um único modelo climático (CanESM5). Por outro lado, o RCP8.5 apresentou cerca de 67% das projeções futuras indicando eutrofização do reservatório, com o último período experimentando forte degradação da qualidade da água para a maioria dos modelos climáticos. Esses resultados divergem dos achados de Zhang *et al.* (2019), que projetaram maior declínio da qualidade da água sob o RCP4.5, indicando que o sentido dos impactos das mudanças climáticas também depende da região estudada (COOPS *et al.*, 2003).

A Tabela 5 exibe o número de anos os quais o Orós atingiu os estados eutrófico e hipereutrófico. O modelo CanESM5 apresentou metade dos anos do primeiro e último período e grande parte do segundo o estado eutrófico ou hipereutrófico sob o RCP4.5. Para o RCP8.5

peelo menos um MCG exibiu metade do tempo o estado eutrófico ou hipereutrófico nos três períodos, com forte declínio da qualidade da água no final do século XXI. Os modelos BCC-CSM2-MR, CanESM5 e MIROC6 projetaram, quase sempre, eutrofização para o período 2075-2100, provavelmente como consequência das reduções da vazão afluente e do volume (ver Tabelas 2 e 3) (BRASIL *et al.*, 2016). Bucak *et al.* (2018) também verificou maior possibilidade de períodos de degradação da qualidade da água sob os efeitos de mudanças climáticas. Estes autores utilizam a concentração de clorofila como variável de estado e destacaram o risco de floração de cianobactérias nos cenários mais pessimistas.

Tabela 5 - Número de anos nos quais o reservatório Orós atingiu o estado eutrófico e hipereutrófico usando cinco diferentes MCGs com dois cenários de emissão e três períodos futuros

MCGs	RCPs	2015-2044		2045-2074		2075-2100	
		Eutrófico	Hipereutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico
IPSL-CM6A-LR		0	0	0	0	0	0
BCC-CSM2-MR		2	0	3	0	3	0
CanESM5	4.5	9	6	12	9	10	3
MIROC6		7	0	1	0	6	0
MRI-ESM2-0		8	0	0	0	0	0
IPSL-CM6A-LR		0	0	1	0	0	0
BCC-CSM2-MR		4	0	4	2	3	22
CanESM5	8.5	5	2	15	13	7	15
MIROC6		11	2	15	4	8	14
MRI-ESM2-0		11	4	4	1	1	0

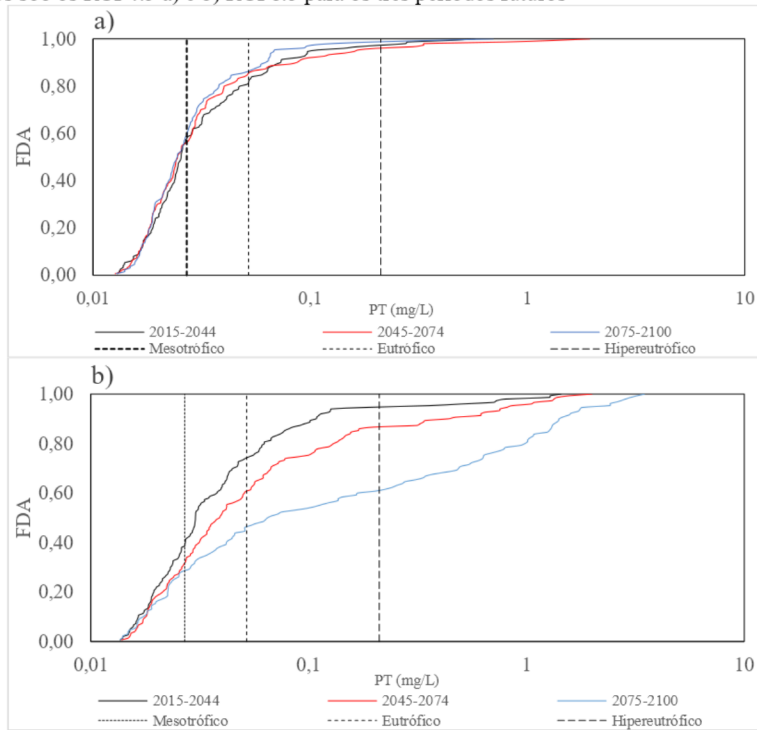
Fonte: elaborado pelo autor

As concentrações futuras de PT geradas pela técnica multi-MCG oferecem uma visão geral dos impactos das mudanças climáticas sobre a qualidade da água do Óros (ver Gráfico 11), porém as informações geradas podem ser inadequadas para a tomada de decisão devido ao forte espalhamento (KUNDZEWICZ *et al.*, 2018). Outros estudos ao redor do mundo também se depararam com essa situação (e.g. COUTURE *et al.*, 2018; MESSINA *et al.*, 2020). Embora Bucak *et al.* (2018), por exemplo, tenham enfatizado a importância da abordagem *ensemble* para fornecer uma visão mais robusta das simulações, a grande faixa de variação das variáveis de estado da qualidade da água pode resultar na estagnação do tomador de decisão (GLAVAN; CEGLAR; PINTAR, 2015). Essas incertezas, portanto, dificultam o gerenciamento da qualidade da água dos corpos hídricos e, conseqüentemente, da eutrofização, principalmente quando existem divergências de sinal nas projeções futuras da variável de estado da qualidade água. O próximo subtópico oferece uma possível abordagem para resolver esse problema.

2.4.3.3 Risco de eutrofização sob cenários de mudanças climáticas

O Gráfico 12 exibe as FDAs que indicam os diferentes níveis de degradação da qualidade da água do reservatório Orós para os três períodos futuros sob os RCP4.5 e RCP8.5.

Gráfico 12 - Risco probabilístico do nível trófico considerando os outputs de cinco diferentes MCGs sob os RCP4.5 a) e b) RCP8.5 para os três períodos futuros



Fonte: elaborado pelo autor

Os resultados demonstraram que a intensificação da condição trófica do reservatório tem maior chance de ocorrência sob o cenário de emissão de RCP8.5 do que sob o RCP4.5, entretanto os três períodos exibiram risco não nulo de eutrofização sob os dois cenários de emissão nos três períodos avaliados. Os riscos mínimos de alcance de eutrofização do reservatório foram 10% e a 20% sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente.

Uma inspeção visual demonstrou nítida diferença da curva de risco para o último período do RCP8.5 comparada às curvas dos demais períodos, indicando que o reservatório

Orós pode ser fortemente susceptível à eutrofização no final do século XXI. Embora tenha poucos dados disponíveis de concentração de PT no reservatório Orós durante a *baseline* (2012-2014) (9 amostras coletadas no período, o que limita análises mais detalhadas), o fato de não ter sido observado o estado hipereutrófico na *baseline* é uma informação relevante, pois todos os cenários agregados (RCPs mais períodos futuros) indicaram probabilidade de excedência maior que zero para o nível hipereutrófico, com o maior risco sendo projetado para o último período sob o cenário RCP8.5 (38,5%). Portanto, as mudanças climáticas podem intensificar fortemente a condição trófica do reservatório e, conseqüentemente, favorecer a floração de algas tóxicas no corpo hídrico (MESSINA *et al.*, 2020; NAZARI-SHARABIAN *et al.*, 2019).

Embora essa abordagem de quantificação de risco da qualidade da água do seja simples e não realize a análise de risco ao longo da modelagem combinada, a análise de risco aplicada aos outputs finais pode auxiliar mais adequadamente os tomadores de decisão (KUNDZEWICZ *et al.*, 2018). Nesse sentido, essa abordagem por meio da FDA tem sido empregada com sucesso por outros autores para a quantificação dos impactos das mudanças climáticas sobre a qualidade de água nos lagos e reservatórios considerando os espalhamentos dos outputs finais da modelagem integrada (e. g. THORNE; FENNER, 2011). Por exemplo, Chang *et al.* (2015) ao aplicar o conceito de FDA nos outputs do modelo CE-QUAL-W2, verificaram o maior risco de eutrofização sob cenários de mudanças climáticas, com o final do século XXI mais susceptível ao fenômeno. Este resultado é semelhante ao verificado neste trabalho. Já Shalby, Elshemy e Zeidan (2020) encontram riscos de degradação da qualidade da água de 17% e 20% sob os RCP4.5 e RCP8.5 para 2084-2085, usando como variável de estado a concentração de Oxigênio Dissolvido (OD).

3.4.4 Impactos na sazonalidade da concentração de PT

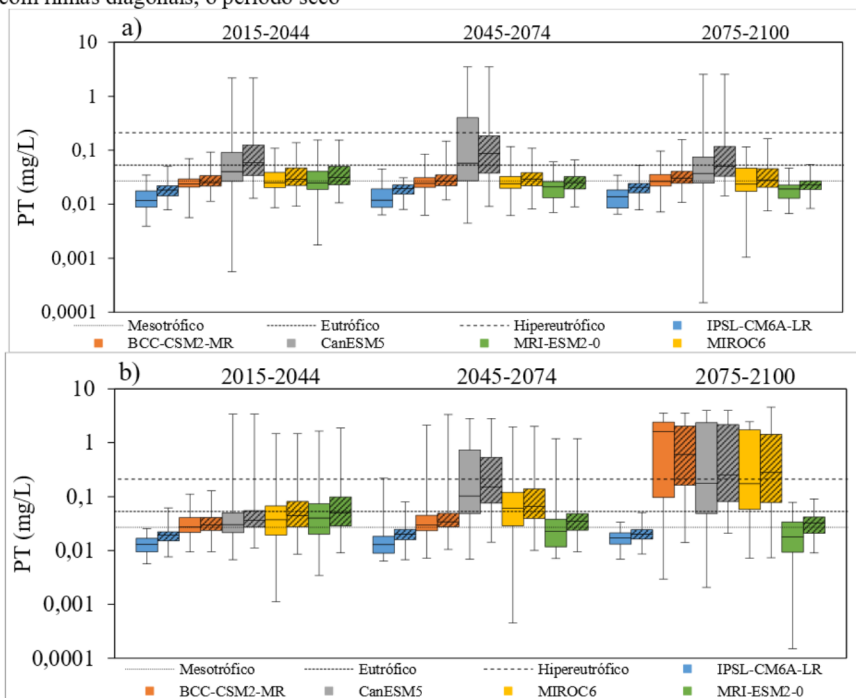
3.4.4.1 Projeções sazonais da concentração de PT

O Gráfico 13 exhibe a sazonalidade da concentração de PT no reservatório Orós. A COGERH não realiza o monitoramento da concentração de PT no reservatório Orós durante todo o ano, então foi utilizado a mediana (0,057 mg/L) durante a *baseline* como valor de referência para a comparação entre os períodos seco e chuvoso.

Os resultados mostraram que todos os cenários agregados no período seco (junho a janeiro) apresentaram intensificação da condição trófica em relação ao período úmido (fevereiro a maio) (Gráfico 13). Mesmo os MCGs mais otimistas (e.g. IPSL-CM6A-LR)

projetaram maiores medianas das concentrações de PT durante o período seco. Sob o RCP8.5 foram exibidas maiores medianas da concentração média de PT do que as medianas das concentrações de PT para todos os modelos climáticos nos dois períodos do ano avaliados. Sob o RCP4.5, o modelo CanESM5 projetou mais de 50% dos valores de concentração média de PT acima de 0,052 mg/L nos três períodos para o período seco, indicando forte declínio da qualidade da água do reservatório. Os outros quatro MCGs apresentaram valores otimistas de concentração média de PT, no entanto o modelo climático MIROC6 no primeiro e último período e o MRI-ESM2-0 no último apresentaram cerca 25% dos valores de concentração média de PT maiores do que 0,052 mg/L. Sob o cenário RCP8.5, observou-se forte declínio da qualidade da água no período seco, com o último período apontando para a maioria dos modelos mais de 50% dos valores acima de 0,211 mg/L.

Gráfico 13 – Projeção da concentração de PT dentro do reservatório Orós para: a) RCP4.5 e b) RCP8.5. Os retângulos sem linhas diagonais representam o período chuvoso, e os retângulos com linhas diagonais, o período seco



Fonte: elaborado pelo autor

2.4.4.2 Riscos sazonais de eutrofização

As FDAs das concentrações médias de PT nos períodos chuvoso e seco ratificaram que a qualidade da água do reservatório Orós é mais vulnerável no período seco do ano (Tabela 6). A maior vulnerabilidade no período seco é uma das propriedades destacadas na síntese sobre corpos hídricos do semiárido do Brasil realizada por Barbosa *et al.* (2012), a qual foi confirmada, por exemplo, no estudo de Araújo, Lima Neto e Becker (2019). Em cenários de mudanças climáticas, Chang *et al.* (2015) e, mais recentemente, Zhang *et al.* (2019) também verificaram a maior probabilidade de eutrofização dos reservatórios estudados no período menos chuvoso do ano. Além disso, a sazonalidade da vazão afluente e a intermitência dos rios, o que faz com que o aporte hídrico dos reservatórios no período chuvoso do ano ocorra junto com poluentes e no período seco o transporte seja basicamente de poluentes da bacia, são características importantes das bacias semiáridas e podem potencializar ainda mais a degradação dos corpos hídricos (ARAÚJO; LIMA NETO; BECKER, 2019). Esses resultados indicam o importante papel que as fontes pontuais da sub-bacia têm sobre a qualidade da água do Orós (cobertura de esgoto é 46%). Porém, aponta para uma direção adequada para reduzir o risco de eutrofização: ampliar a coleta e tratamento de esgoto (Couture *et al.*, 2014). Outro ponto importante relativo ao NEB é que as variações sazonais no volume estocado dos reservatórios geralmente são seguidos pelo aumento das concentrações de nutrientes, especialmente durante os períodos de secas prolongadas (BRASIL *et al.*, 2016; ROCHA JUNIOR *et al.*, 2018).

Tabela 6 – Risco sazonal de eutrofização do Orós em cenários de mudanças climáticas

PT (mg/L)	Período	2015-2044		2045-2074		2075-2100	
		Risco (%)		Risco (%)		Risco (%)	
		RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
≥ 0,027	Fev-maio	40,5	47,0	35,5	53,8	34,8	58,8
	Jun-jan	52,1	50,8	48,9	70,2	49,6	74,2
≥ 0,052	Fev-maio	15,8	23,5	13,0	33,8	12,7	47,3
	Jun-jan	22,0	27,3	17,2	39,1	15,8	55,6
≥ 0,211	Fev-maio	3,0	5,0	6,0	12,3	2,5	33,3
	Jun-jan	3,0	5,0	6,0	13,1	2,6	36,6

Fonte: elaborado pelo autor.

3.4.5 Simulação de reduções da carga afluente de PT e retiradas de água do reservatório

Foram realizadas simulações de reduções na concentração afluyente de PT e vazão de retirada no Orós, variando de 10% a 30%, a fim de avaliar o efeito dessas variáveis no estado trófico do reservatório (Tabela 7). De maneira geral, as reduções apenas na concentração afluyente de PT se mostraram insuficientes para promover redução na concentração de PT. Por outro lado, reduções tanto na concentração afluyente de PT quanto na vazão de retirada demonstraram ser capazes de reduzir o grau de trofia do reservatório, embora não tenha sido válido para todos os MCGs. Sob RCP4.5, a redução na concentração afluyente de PT individualmente não foi capaz de mitigar a eutrofização do reservatório para o modelo CanESM5, no entanto as reduções mais acentuadas (-30%) nas duas variáveis investigadas conseguiram reduzir a degradação da qualidade da água nos três períodos, atingindo o nível mesotrófico para todos eles. Sob o cenário RCP8.5, apenas reduções simultâneas na concentração afluyente de PT e retiradas foram capazes de atingir o estado mesotrófico em 2015-2044. No período 2045-2074, as reduções para ambas variáveis reduziram as concentrações de PT para níveis aceitáveis para os modelos BCC-CSM2-MR e MRI-ESM2-0, porém o mesmo não ocorreu para os modelos CanESM5 e MIROC6, que permaneceram indicando eutrofização. Para 2075-2100, mesmo com as reduções, a maioria dos MCGs projetou forte degradação da qualidade da água, demonstrando que o Orós será mais vulnerável no final do século XXI.

Estudos anteriores demonstraram que simulação de estratégias de mitigação dos impactos das mudanças climáticas sobre a qualidade da água de reservatórios é essencial para auxiliar a elaboração de medidas de combate à eutrofização e, conseqüentemente, dificultando as florações de algas nocivas (e.g. COUTURE *et al.*, 2014; FELDBAUER *et al.*, 2020). Outros estudos investigaram o efeito das mudanças na carga afluyente de PT e nas retiradas de água para combater os efeitos negativos das mudanças climáticas sobre a qualidade da água nos reservatórios (e.g. NAZARI-SHARABIAN *et al.*, 2019). Bucak *et al.* (2018) encontraram resultados similares ao presente estudo ao investigarem o lago Beysehir, Turquia, inclusive com a ineficiência das estratégias para mitigar a eutrofização em alguns casos. Zhang *et al.* (2019) também observaram resultados no mesmo sentido, indicando que, mesmo com reduções da concentração afluyente de PT e restrições maiores na retirada da água, o reservatório investigado ainda experimentou eutrofização. Por outro lado, Molina-Navarro *et al.* (2014) verificaram o potencial da gestão do uso do solo para reduzir a concentração interna de PT, com todos os cenários estudados indicando estados oligotrófico ou mesotrófico. No entanto, a própria configuração da *baseline* em relação ao uso do solo e cargas de nutrientes, inexistência de forte tendência de redução do volume estocado e sazonalidade da vazão afluyente, pode ter contribuído para projeções mais otimistas da concentração de PT no reservatório avaliado.

Tabela 7 - Simulações de reduções da concentração afluyente de PT e da retirada de água do reservatório Orós. As reduções variaram de 10% a 30%

MCGs	%Ca	%Qr	RCPs	2015-2044		2045-2074		2075-2100	
				PT (mg/L)	% Mudança	PT (mg/L)	% Mudança	PT (mg/L)	% Mudança
IPSL-CM6A-LR	↓10-30	-		(0,015)-(0,012)	(-71,9)-(-78,1)	(0,016)-(0,012)	(-70,7)-(-77,2)	(0,017)-(0,013)	(-69,2)-(-76,0)
	↓10-30	↓10-30		(0,015)-(0,012)	(-71,9)-(-78,1)	(0,016)-(0,012)	(-70,7)-(-77,2)	(0,017)-(0,013)	(-69,2)-(-76,0)
BCC-CSM2-MR	↓10-30	-		(0,027)-(0,021)	(-50,7)-(-61,5)	(0,029)-(0,022)	(-47,3)-(-59,0)	(0,031)-(0,024)	(-43,6)-(-56,1)
	↓10-30	↓10-30		(0,026)-(0,020)	(-51,2)-(-63,3)	(0,028)-(0,021)	(-48,3)-(-61,6)	(0,030)-(0,023)	(-44,6)-(-58,5)
CanESM5	↓10-30	-	4.5	(0,128)-(0,100)	(136,3)-(-83,9)	(0,285)-(0,222)	(426,3)-(-309,3)	(0,105)-(0,081)	(93,0)-(-50,1)
	↓10-30	↓10-30		(0,085)-(0,042)	(56,9)-(-23,1)	(0,199)-(0,048)	(267,2)-(-11,7)	(0,063)-(0,039)	(18,0)-(-28,5)
MIROC6	↓10-30	-		(0,034)-(0,027)	(-36,6)-(-50,6)	(0,028)-(0,022)	(-48,3)-(-59,8)	(0,032)-(0,025)	(-41,4)-(-54,4)
	↓10-30	↓10-30		(0,033)-(0,025)	(-38,8)-(-53,8)	(0,028)-(0,022)	(-48,5)-(-60,1)	(0,031)-(0,024)	(-41,9)-(-55,3)
MRI-ESM2-0	↓10-30	-		(0,035)-(0,027)	(-36,0)-(-50,1)	(0,023)-(0,018)	(-56,9)-(-66,5)	(0,020)-(0,015)	(-63,4)-(-71,5)
	↓10-30	↓10-30		(0,034)-(0,025)	(-37,9)-(-53,4)	(0,023)-(0,018)	(-56,9)-(-66,4)	(0,020)-(0,016)	(-63,4)-(-71,2)
IPSL-CM6A-LR	↓10-30	-		(0,016)-(0,012)	(-71,4)-(-77,6)	(0,018)-(0,014)	(-67,3)-(-74,5)	(0,017)-(0,013)	(-68,0)-(-75,1)
	↓10-30	↓10-30		(0,016)-(0,012)	(-71,4)-(-77,6)	(0,018)-(0,014)	(-67,3)-(-74,5)	(0,017)-(0,013)	(-68,0)-(-75,1)
BCC-CSM2-MR	↓10-30	-		(0,032)-(0,025)	(-40,1)-(-53,3)	(0,107)-(0,083)	(97,9)-(-53,9)	(0,755)-(0,587)	(1292,9)-(983,4)
	↓10-30	↓10-30		(0,031)-(0,024)	(-42,3)-(-56,4)	(0,090)-(0,040)	(65,2)-(-25,4)	(0,677)-(0,343)	(1148,7)-(533,4)
CanESM5	↓10-30	-	8.5	(0,117)-(0,091)	(115,9)-(68,2)	(0,373)-(0,290)	(588,6)-(435,6)	(0,824)-(0,641)	(1419,4)-(1081,8)
	↓10-30	↓10-30		(0,098)-(0,037)	(79,9)-(-32,2)	(0,279)-(0,113)	(415,2)-(107,7)	(0,719)-(0,421)	(1225,9)-(677,2)
MIROC6	↓10-30	-		(0,084)-(0,065)	(54,0)-(19,9)	(0,151)-(0,117)	(177,6)-(115,9)	(0,534)-(0,416)	(885,7)-(666,6)
	↓10-30	↓10-30		(0,051)-(0,042)	(-6,0)-(-22,3)	(0,104)-(0,086)	(91,4)-(-59,4)	(0,492)-(0,391)	(808,1)-(621,6)
MRI-ESM2-0	↓10-30	-		(0,136)-(0,106)	(150,8)-(-95,2)	(0,054)-(0,042)	(-0,4)-(-22,5)	(0,028)-(0,022)	(-48,0)-(-59,5)
	↓10-30	↓10-30		(0,081)-(0,039)	(50,0)-(-54,4)	(0,049)-(0,025)	(-9,1)-(-54,4)	(0,028)-(0,021)	(-48,4)-(-60,4)

Fonte: elaborado pelo autor

Outro ponto importante identificado nesse contexto foram as incertezas na concentração interna de PT em resposta às simulações das reduções futuras da concentração afluyente de PT e retiradas de água do reservatório, as quais afetam diretamente na tomada de decisão para reduzir o risco de degradação da água desses corpos hídricos. Esse panorama também foi observado em um estudo realizado por Me *et al.* (2018). Com objetivo de sanar essa problemática, também foi aplicada o conceito de FDA nos outputs após simulações de reduções de cargas externas de nutrientes e restrições na retirada de água do reservatório. Nesse sentido, foi possível identificar redução do risco de eutrofização do reservatório em razão das reduções propostas (Tabela 9). Sob o RCP4.5, os três períodos apresentaram o risco nulo do reservatório experimentar o estado hipereutrófico, enquanto a redução do risco do estado eutrófico foi de 16,7%, 10,7% e 12,4% no primeiro, segundo e terceiro período, respectivamente. Para o RCP8.5, o primeiro e segundo período apontaram probabilidade de excedência nula para o estado hipereutrófico, mas o último período persistiu indicando risco relativamente alto de atingir esse estado trófico (19,2%). Com relação ao estado eutrófico, o primeiro e o segundo período indicaram, respectivamente, riscos de 15,3% e 20%, porém o último período exibiu risco elevado (45,5%). Estes resultados relevaram que, mesmo com as reduções propostas, as mudanças climáticas podem causar a eutrofização do reservatório Orós, principalmente no final do século XXI. Esses resultados são compatíveis com os encontrados de Couture *et al.* (2014), que indicaram que as medidas de redução da carga externa de tem importante impacto sobre a redução da concentração interna de PT, mas foram incapazes de sanar completamente a possibilidade de crescimento da concentração desse poluente em razão das mudanças climáticas.

Tabela 8 - Efeitos das reduções da concentração afluyente de PT e retiradas no risco de eutrofização do reservatório Orós para dois cenários de emissão e três períodos futuros

%Ca	%Qr	PT (mg/L)	2015-2044		2045-2074		2075-2100	
			Risco (%)		Risco (%)		Risco (%)	
			RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
-	-	≥ 0,052	22,7	25,3	16,7	38,7	16,2	53,8
-	-	≥ 0,211	4,0	4,7	6,0	13,3	2,3	39,2
↓10-30	-	≥ 0,052	(18,0)-(10,0)	(23,3)-(16,0)	(15,3)-(13,3)	(34,7)-(26,7)	(13,8)-(6,9)	(51,5)-(47,7)
↓10-30	-	≥ 0,211	(3,3)-(2,7)	(4,7)-(4,7)	(4,7)-(4,0)	(12,7)-(12,7)	(1,5)-(0,8)	(37,7)-(23,8)
↓10-30	↓10-30	≥ 0,052	(16,0)-(6,0)	(22,0)-(10,0)	(14,7)-(6,0)	(32,7)-(18,7)	(12,3)-(3,8)	(50,8)-(45,5)
↓10-30	↓10-30	≥ 0,211	(1,3)-(0,0)	(10,0)-(0,0)	(2,7)-(0,0)	(8,7)-(1,3)	(0,8)-(0,0)	(33,8)-(19,2)

Fonte: elaborado pelo autor

3.5 Conclusões

Este estudo avaliou os impactos das mudanças climáticas sobre o risco de eutrofização de um grande reservatório do semiárido brasileiro, Brasil, sob os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5 para três períodos futuros. Também foram avaliados os efeitos da sazonalidade e realizado simulações de entrada de PT e retirada de água do reservatório sobre o estado trófico do reservatório. Para realizar a projeção futura da concentração de PT, foi empregada uma abordagem integrada de modelos climáticos, hidrológico e de qualidade da água. Já para a análise de risco de eutrofização foi utilizado o método da probabilidade excedência. As seguintes conclusões foram sintetizadas a partir dos resultados:

1. As projeções da vazão afluyente, volume percentual e concentração de PT exibiram fortes divergências, tanto de magnitude quanto de sinal;
2. Os efeitos adversos nas projeções das variáveis investigadas foram mais significativos no final do século XXI;
3. As incertezas observadas na concentração média de PT dentro do reservatório indicaram a necessidade de gerar respostas mais convenientes para auxiliar adequadamente os tomadores de decisão no combate à eutrofização;
4. A avaliação de risco revelou chance de eutrofização para os três períodos e os dois RCPs, com maior probabilidade de declínio da qualidade da água no final do século XXI sob o RCP8.5;
5. A análise da sazonalidade mostrou que o período seco é mais vulnerável à eutrofização do que o período chuvoso. Isto foi atribuído aos efeitos combinados da maior entrada de nutrientes durante baixos fluxos, menores perdas por sedimentação devido ao maior tempo de residência e maior concentração interna de PT em função da redução do volume;
6. As simulações revelaram que a redução apenas na concentração afluyente de PT foi insuficiente para reduzir as altas concentrações de PT no reservatório projetadas por alguns MCGs. Por outro lado, reduções simultâneas na concentração afluyente de PT e retiradas de água foram capazes de reduzir o estado trófico na maioria dos cenários pessimistas;
7. Como uma resposta da alta variabilidade da vazão afluyente e volume estocado, o impacto das mudanças climáticas sobre a qualidade da água do reservatório Orós foi mais significativo no presente estudo do que reportado na literatura para outras regiões do mundo;
8. Finalmente, nós concluímos que a avaliação do risco de eutrofização é importante para oferecer informações relevantes para o gerenciamento dos recursos hídricos, especialmente em regiões com escassez de recursos hídricos tais como o semiárido brasileiro.

4 CONCLUSÕES GERAIS

O presente estudo investigou os impactos das mudanças climáticas sobre a qualidade da água de dois grandes reservatórios do semiárido brasileiro, Castanhão e Orós. Esses reservatórios estão localizados no estado do Ceará, região inteiramente contida no Polígono de Secas e marcada por forte variabilidade espacial e temporal de precipitação, além de secas frequentes e cheias esporádicas. Para as projeções das variáveis climáticas, hidrológicas e de qualidade da água de interesse, foi empregada uma abordagem combinada de modelos climáticos, hidrológico e de qualidade da água. Este estudo ainda analisou, também, as relações entre a vazão afluente, o volume estocado e a concentração interna de PT. Também foi realizada a quantificação do risco de eutrofização considerando todos os outputs dos modelos climáticos através de uma abordagem simplificada, FDA (também chamada de probabilidade de excedência), bem como os efeitos da sazonalidade da vazão afluente sobre a concentração interna desse poluente.

Para o reservatório Castanhão, representando o primeiro estudo de caso, foram identificadas fortes incertezas nas projeções futuras das principais variáveis avaliadas, com propagação das incertezas ao longo das etapas da abordagem integrada, resultando em divergências tanto de magnitude e quanto de sinal nas projeções relativas ao clima, à hidrologia e à qualidade da água. As mudanças climáticas também demonstraram capacidade de afetar duas variáveis importantes do reservatório: vazão afluente e volume percentual. A redução do volume armazenado estava relacionada principalmente à redução da vazão afluente, demonstrada através de uma alta correlação entre essas duas variáveis [Eq. (14)]. Esta redução teve impacto na capacidade de diluição da vazão afluente do reservatório, promovendo maior concentração afluente de nutrientes no corpo hídrico e, conseqüentemente, aumentando a concentração de PT. Já o decréscimo do volume estocado implicou no aumento da concentração interna do PT, também demonstrado através de um significativo relacionamento estatístico [Eq. (15)] e literatura. Nesse sentido, concluiu-se que os reservatórios do semiárido brasileiro tenderão responder às reduções da vazão afluente e volume estocado causadas pelas mudanças climáticas com aumento da concentração interna de PT. Tal achado requer atenção especial dos gestores locais, pois essa região já experimenta forte sazonalidade da vazão afluente e redução gradativa do volume estocado decorrente das altas taxas de evaporação, eventos de secas periódicas e retiradas de água. Nesse sentido, verificou-se que eventos de seca podem ser potencializados sob os cenários de mudanças climáticas, principalmente no final do século sob o RCP8.5, implicando em forte degradação da qualidade da água. O impacto dessas

características sobre a qualidade da água ainda é pode ser intensificada pela baixa taxa de coleta e tratamento de esgoto.

No segundo estudo de caso, reservatório Orós, a abordagem simplificada usada para a avaliação de risco revelou chances de eutrofização para os três períodos e os dois cenários de emissão, com maior probabilidade de declínio da qualidade da água no final do século XXI sob o RCP8.5, provavelmente como consequência das reduções significativas projetadas para a vazão afluyente e volume percentual. A análise da sazonalidade revelou que o período seco (junho a janeiro) é mais susceptível à eutrofização do que o período chuvoso (fevereiro a maio). A vulnerabilidade maior da eutrofização no período não chuvoso foi confirmada pelas maiores probabilidades de excedência dos níveis eutrófico e hipereutrófico, comparado às respectivas probabilidades de excedências do período chuvoso. Isto foi atribuído aos efeitos combinados da maior entrada de PT durante baixos fluxos, menores perdas por sedimentação devido ao maior tempo de residência hidráulica e o aumento da concentração interna de PT devido à redução do volume. As simulações realizadas revelaram que a redução somente na concentração afluyente de PT foi insuficiente para reduzir as altas concentrações de PT projetadas por alguns MCGs. Por outro lado, reduções simultâneas tanto na concentração afluyente de PT quanto nas retiradas de água do reservatório se mostram capazes de reduzir o seu estado trófico na maioria dos cenários mais pessimistas, embora nos dois últimos períodos sob RCP8.5 as reduções não foram capazes de mitigar o risco de eutrofização do reservatório, somente minimizá-lo. Então, as estratégias de reduções da carga de nutrientes e restrições na retirada de água demonstraram ser imprescindíveis para mitigar/minimizar os impactos negativos das mudanças climáticas sobre a qualidade da água do Orós, corroborando com outros estudos dessa natureza.

De maneira geral, o conjunto de resultados sugeriram que os reservatórios do semiárido brasileiro podem ser mais vulneráveis à eutrofização em cenários de mudanças climáticas comparado a corpos hídricos de outras regiões ao redor do mundo.

Por fim, constatou-se que a abordagem integrada de modelos climáticos, hidrológico e de qualidade da água pode fornecer informações relevantes e auxiliar os tomadores de decisão no desenvolvimento de medidas mitigadoras para combater os impactos negativos das mudanças climáticas sobre a qualidade da água dos reservatórios do semiárido brasileiro, incorporando informações do risco de eutrofização e do efeito da sazonalidade sobre a concentração de interna de PT nos reservatórios.

É recomendado para estudos futuros a incorporação de um modelo em escala de bacia (e.g. SWAT, Modelo de Coeficiente de Transporte) que considera também os impactos das mudanças de uso do solo sobre a qualidade da água, ou seja, que quantifique a carga de

nutrientes entrando no reservatório. Além disso, recomenda-se a aplicação de uma metodologia que quantifique as incertezas de cada etapa da modelagem, além da propagação ao longo dos do processo de modelagem.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Reservatórios do semiárido brasileiro:** hidrologia, balanço hídrico e operação. Brasília, DF: ANA, 2017. Disponível em: https://www.ana.gov.br/noticias/estudo-reservatorios/reservatorios-do-semiarido-brasileiro_hidrologia-balanco-hidrico-e-operacao-1.pdf. Acesso em: 3 jun. 2020.
- ARAÚJO, G. M.; LIMA NETO, I. E.; BECKER, H. Phosphorus dynamics in a highly polluted urban drainage channel-shallow reservoir system in the Brazilian semiarid. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 91, n. 3, p. 1-8, ago. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0001-3765201920180441>.
- ARHEIMER, B.; ANDRÉASSON, J.; FOGELBERG, S.; JOHNSON, H.; PERS, C. B.; PERSSON, K. Climate change impact on water quality: model results from Southern Sweden. **AMBIO: Journal of the Human Environment**, v.34, n.7, p.559-566, dez. 2005. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-34.7.559>.
- AHMADI, A., NASSERI, M., SOLOMATINE, D. P. Parametric uncertainty assessment of hydrological models: coupling UNNEC-P and a fuzzy general regression neural network, **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, n. 9, p. 1080-1094, maio. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1610565>.
- AZADI, F.; ASHOFTEH, P. S.; LOÁICIGA, H. A. Reservoir water-quality projections und climate-change conditions. **Water Resources Management**, v. 33, p. 401-421, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2109-z>.
- BARBOSA, J. E. L.; MEDEIROS, E. S. F.; BRASIL, J.; CORDEIRO, R. S.; CRISPIM, M. C. B.; SILVA, G. H. G. Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology and management. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v.24, n.1, p.103-118, jan./mar. 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S2179-975X2012005000030>
- BEAVER, John R. et al. Extreme weather events influence the phytoplankton community structure in a large lowland subtropical lake (Lake Okeechobee, Florida, EUA). **Hydrobiologia**, v. 709, p. 213-226, jun. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10750-013-1451-7>.

BEVEN, K. Facets of uncertainty: epistemic uncertainty, non-stationarity, likelihood, hypothesis testing, and communication. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, n. 9, p.1652-165, jun. 2016. Disponivel em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1031761>.

BIEROZA, M. Z.; HEATHWAITE, A. L.; BECHMANN, M.; KYLLMAR, K.; JORDAN, P. The concentration-discharge slope as a tool for water quality management. **Science of the Total Environment**, v. 630, p. 738-749, jul. 2018. Disponivel em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.256>

BLOCK, P. J.; SOUZA FILHO, F. A.; SUN, L.; KWON, H. H. A streamflow forecasting framework using multiple climate and hydrological models. **Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)**, v. 45, n. 4, p. 828-843, ago. 2009. Disponivel em: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2009.00327.x>.

BRASIL, J.; ATTAYDE, J. L.; VASCONCELOS, F. R.; DANTAS, D. D. F.; HUSZAR, V. L. M. Drought-induced water-level reduction favors cyanobacteria blooms in tropical shallow lakes. **Hydrobiologia**, v. 770, n. 1, p.145-164, nov. 2015. Disponivel em: <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2578-5>.

BUCAK, T.; SARAOGU, E.; LEVI, E. E.; TAVSANUGLU, U. N.; ÇAKIROGLU, A. I.; JEPPESEN, E.; BEKLIOGLU, M. The influence of water level on macrophyte growth and trophic interactions in eutrophic Mediterranean shallow lakes: a mesocosm experiment with and without fish. **Freshwater Biology**, v.57, n.8, p.1631-1642, ago. 2012. Disponivel em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2012.02825.x>

BUCAK, T.; TROLLE, D.; TAVSANUGLU, U. N.; ÇAKIROGLU, A. I.; OZEN, A.; JEPPESEN, E.; BEKLIOGLU, M. Modelling the effects of climatic and land use changes on phytoplankton and water quality of the largest Turkish freshwater lake: Lake Beyşehir. **Science of the Total Environment**, v.621, n.90, p.802-816, abr. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136549>.

BUDA, A. R.; KLEINMAN, P.; SRINIVASAN, M. S.; BRYANT, R. B. Effects of hydrology and field management on phosphorus transport in surface runoff. **Journal of Environmental Quality**, v. 38, n. 6, p. 2273-2284, out. 2009. Disponivel em: <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0501>.

CAMPOS, J. N. B.; SOUZA FILHO, F. A.; LIMA, H. V. V. Risk and uncertainties in reservoir yield in highly variable intermittent rivers: case of the Castanhão Reservoir in semi-arid Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 59, n. 6, p. 1184-1195, jun. 2014. Disponivel em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.836277>.

CAMPOS, J. N. B. Paradigms and public policies on drought in Northeast Brazil: a historical perspective. **Environmental Management**, v. 55, p. 1052-1063, jan. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00267-015-0444-x>.

CAMPOS, J. N. B.; LIMA NETO, I. E.; STUDART, T. M. C.; NASCIMENTO, L. S. V. Trade-off between reservoir yield and evaporation losses as a function of lake morphology in semi-arid Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 88, n. 2, p. 1113-1125, abr./jun. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201620150124>

CARVALHO, Laurence et al. Sustaining recreational quality of European lakes: minimizing the health risks from algal blooms through phosphorus control. **Journal of Applied Ecology**, v. 50, n.2, p. 315-323, abr. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12059>.

CASTAGNINO, W. A. **Investigación de modelos simplificados de eutroficación en lagos tropicales**. Organización Panamericana de La Salud (OPS) - Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Versión revisada, p. 1-30, 1982.

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; DIAS, M. A. F. S.; SILVA, M. G. A. J. **Tempo e clima no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

CHANG, C. H.; CAI, L. Y.; LIN, CHUNG, C. L.; LINDEN, L.; BURCH, M. Assessment of the impacts of climate change on the water quality of a small deep reservoir in a humid-subtropical climatic region. **Water**, v.7, n. 4, p.1687-1711, abr. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w7041687>.

CHAPRA. S. C. **Surface water-quality modeling**. 2. ed. Illinois: Waveland Press, Inc. 2008.

CHAVES, F. I. B.; LIMA, P. F.; LEITÃO, R. C.; PAULINO, W. D.; SANTAELLA, S. T. Influence of rainfall on the trophic status of a Brazilian semiarid reservoir. **Acta Scientiarum**, v. 35, n. 4, p. 505-511, jul. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actascibiols.v35i4.18261>.

CLARK, Martyn P. et al. Characterizing uncertainty of the hydrologic impacts of climate change. **Current Climate Change Reports**, v. 2, p. 55-64, abr. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0034-x>.

COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS DO CEARÁ (COGERH). **Inventário ambiental**: açude Castanhão. Fortaleza: COGERH, 2011. Disponível em: <https://portal.cogerh.com.br/wp-content/uploads/pdf/inventarios/2011/Inventario%20Ambiental%20do%20Acude%20Castanhao%202011.pdf>. Acesso em: 1 set. 2020.

COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS DO CEARÁ (COGERH).

Qualidade das águas dos açudes monitorados pela COGERH – Campanha de

fevereiro/2020 – Relatório final. Fortaleza: COGERH, 2020. Disponível em:

http://f3.funceme.br:9000/hidro-ce/uploads/documentos/relatorio_iet_fev2020.pdf. Acesso em: 1 set. 2020.

COOPS, H.; BEKLIÖGLU, M.; CRISMAN, T. L. The role of water-level fluctuations in shallow lake ecosystems – workshop conclusions. **Hydrobiologia**, v.506-509, n.1, p.23-37, nov. 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/B:HYDR.0000008595.14393.77>.

COSTA, M. R. A.; ATTAYDE, J. L.; BECKER, V. Effects of water level reduction on the dynamics of phytoplankton functional groups in tropical semi-arid shallow lakes.

Hydrobiologia, v.778, n.1, p.75-89, dez. 2016. Disponível em:

<https://doi.org/10.1007/s10750-015-2593-6>

COUTURE, R. M.; TOMINAGA, K.; STARRFELT, J.; MOE, J.; KASTE, O.; WRIGHT, R.

F. Modelling phosphorus loading and algal blooms in a Nordic agricultural catchment-lake system under changing land-use and climate. **Environmental Science: Processes & Impacts**, v. 16, p. 1588-1599, mar. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C3EM00630A>

COUTURE, R. M.; MOE, S. J.; LIN, Y.; KASTE, O.; HAANDE, S.; SOLHEIM, A. L.

Simulating water quality and ecological status of Lake Vansjø, Norway, and land-use and climate change by linking process-oriented models with a Bayesian network. **Science of the Total Environment**, v.621, n.81, p.713-724, abr. 2018. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.303>.

da SILVA, V. P. R. On climate variability in Northeast of Brazil. **Journal of Arid**

Environments, v. 58, n.4, p. 575-596, set. 2004. Disponível:

<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2003.12.002>.

DE PAIVA, L. F. G.; MONTENEGRO, S. M.; CATALDI, M. Prediction of monthly flows for Três Marias reservoir (São Francisco river basin) using the CFS climate forecast model.

Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 25, n. 16, p. 1-18, abr. 2009. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.252020190067>.

du PLESSIS, A.; HARMSE, T.; AHMED, F. Predicting water quality associated with land cover change in the Grootdraai Dam catchment, South Africa. **Water International**, v. 40,

n.4, p. 647-663, fev. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02508060.2015.1067752>.

EHSANI, N.; VOROSMARTY, C. L.; FEKETE, B. M.; STAKHIV, E. Z. Reservoir operations under climate change: storage capacity options to mitigate risk. **Journal of Hydrology**, v.

555, p. 435-446, dez. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.008>.

EISNER, S.; VOSS, F.; KYNAST, E. Statistical bias correction of global climate projections – consequences for large scale modeling of flood flows. **Advances in Geosciences**, v. 31, p. 75-82, dez. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/adgeo-31-75-2012>.

ESTÁCIO, A. B. S. **Climate change and model parameter uncertainties propagated to ungauged reservoir catchments in Ceará: a study for water availability assessment**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, UFC. Fortaleza, Ceará, 2020.

FAIZ, Muhammad Abrar et al. Performance evaluation of hydrological models using ensemble of General Circulation Models in the northeastern China. **Journal of Hydrology**, v. 565, n.3, p. 599-613, out. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.057>.

FELDBAUER, J.; KNEIS, D.; HEGEWALD, T.; BERENDONK, T. U.; PETZOLDT. Managing climate change in drinking water reservoirs: potentials and limitations of dynamic withdrawal strategies. **Environmental Sciences Europe**, v. 32, p. 32-48, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00324-7>.

FERNANDES, R. O.; SILVEIRA, C. S.; STUDART, T. M. C.; SOUZA FILHO, F. A. Reservoir yield intercomparison of large dams in Jaguaribe Basin-CE in climate change scenarios. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, n.11, p. 1-12, abr. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011716033>.

GIRI, S.; LATHROP, R. G.; OBROPTA, C. C. Climate change vulnerability assessment and adaptation strategies through best management practices. **Journal of Hydrology**, v. 580, p. 124311, jan. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124311>.

GLAVAN, M.; CEGLAR, A.; PINTAR, M. Assessing the impacts of climate change on water quality and quality modelling in small Slovenian Mediterranean catchment – lesson for policy and decision makers. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 14, p.3124-3144, jul. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/hyp.10429>.

GONDIM, R. S.; CASTRO, M. A. H.; MAIA, A. H. N.; EVANGELISTA, S. R. M.; FUCK, S. C. F. Climate change impacts on irrigation water needs in the Jaguaribe River Basin. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 48, n. 2, p. 355-365, jan. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00620.x>.

GONDIM, R. S.; SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. A.; VASCONCELOS JÚNIOR, F. C.; CID, D. A. C. Climate change impacts on water demand and availability using CMIP5 models in the Jaguaribe basin, semi-arid Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 550, p. 1-14, jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7723-9>.

- GUPTA, A.; GOVINDARAJU, R. S. Propagation of structural uncertainty in watershed hydrologic models. **Journal of Hydrology**, v. 575, n. 1, p.66-81, ago. 2019. Disponivel em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.026>
- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 1, n.2, p. 96-99, nov. 1985. Disponivel em: <http://dx.doi.org/10.13031/2013.26773>
- HORTON, P.; SCHAEFLI, B.; MEZGHANI, A.; HINGRAY, B.; MUSY, A. Assessment of climate-change impacts on alpine discharge regimes with climate model uncertainty. **Hydrological Processes**, v. 20, n. 10, p. 2091-2109, jun. 2006. Disponivel em: <https://doi.org/10.1002/hyp.6197>
- HUSZAR, V. L. M.; CARACO, N. F.; ROLAND, F.; COLE, J. Nutrient-chlorophyll relationships in tropical-subtropical lakes: do temperate models fit?. **Biogeochemistry**, v. 79, p. 239-250, abr. 2006. Disponivel em: <https://doi.org/10.1007/s10533-006-9007-9>.
- IPCC, 2014: **Climate Change 2014**: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- JENSEN, J. P.; PEDERSEN, A. R.; JEPPESEN, E.; SONDERGAARD, M. An empirical model describing the seasonal dynamics of phosphorus in 16 shallow eutrophic lakes after external loading reduction. **Limnology and Oceanography**, v. 51, n. 1 (parte 1), p. 791-800, jan. 2006. Disponivel em: https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0791
- JEPPESEN, Erik et al. Climate change impacts on lakes: an integrated ecological perspective based on a multi-faceted approach, with special focus on shallow lakes. **Journal of Limnology**, v.73, n.1, p.88-111, out. 2014. Disponivel em: <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2014.844>
- JEPPESEN, Erik *et al.* Ecological impacts of global warming and water abstraction on lakes and reservoirs due to changes in water level and related changes in salinity, **Hydrobiologia**, v. 750, p. 201-227, jan. 2015. Disponivel em: <https://doi.org/10.1007/s10750-014-2169-x>.
- KLIPPEL, G.; MACÊDO, R. L.; BRANCO, C. W. C. Comparison of different trophic state indices applied to tropical reservoirs. **Lakes & Reservoirs**, v.25, n.2, p.214-229, jun. 2020. Disponivel em: <https://doi.org/10.1111/lre.12320>.

KAY, A. L.; DAVIES, H. N.; BELL, V. A.; JONES, R. G. Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England. **Climatic Change**, v.92, n.1, p.41-63, set. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9471-4>

KOMATSU, E.; FUKUSHIMA, T.; HARASAWA, H. A modeling approach to forecast the effect of long-term climate change on lake water quality. **Ecological Modelling**, v. 209, n. 4, p. 351-366, dez. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.07.021>.

KROL, M. S.; BRONSTERT, A. Regional integrated modelling of climate change impacts on natural resources and resource usage in semi-arid Northeast Brazil. **Environmental Modelling & Software**, v.22, n. 2, p. 259-268, fev. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.07.022>.

KOSTEN, Serian et al. Warmer climate boost cyanobacterial dominance in shallow lakes. **Global Change Biology**, v. 18, n.1, p. 118-126, jan. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02488.x>.

KUNDZEWICZ, Z. W.; KRYSANOVA, V.; BENESTAD, R. E.; HOV, O.; PINIEWSKI, M.; OTTO, I. M. Uncertainty in climate change impacts on water resources. **Environmental Science and Policy**, v. 79, p.1-8, jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.10.008>.

KWON, H. H.; SOUZA FILHO, F. A.; BLOCK, P.; SUN, L.; LALL, U.; REIS JÚNIOR, D. S. Uncertainty assessment of hydrologic and climate forecast models in Northeastern Brazil. **Hydrological Processes**, v. 26, n. 25, p. 3875-3885, dez. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/hyp.8433>.

LINDENSCHMIDT, K. E.; FLEISCHBEIN, K.; BABOROWSKI, M. Structural uncertainty in a river water quality modelling system. **Ecological Modelling**, n.204, v. 3-4, p. 289-300, jun. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.01.004>.

LIMA, B. P.; MAMEDE, G. L.; LIMA NETO, I. E. Monitoramento e modelagem da qualidade de água em uma bacia hidrográfica semiárida. **Engenharia Sanitária e Ambiental (online)**, v. 23, p. 125-135, jan./fev. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-41522018167115>.

LIMA NETO, I. E. Impact of artificial destratification on water availability of reservoirs in the Brazilian semiarid. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 91, n. 3, p. 1-12, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0001-3765201920171022>

LIRA, C. C. S.; MEDEIROS, P. H. A.; LIMA NETO, I. E. Modelling the impact of sediment management on the trophic state of a tropical reservoir with high water storage variations.

Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 92, n. 1, p. 1-18, 2020. Disponível em:
<https://doi.org/10.1590/0001-3765202020181169>.

LISBOA, M. S.; SCHNEIDER, R. L.; SULLIVAN, P. J.; WALTER, M. T. Drought and post-drought rain effect on stream phosphorus and other nutrient losses in the Northeastern USA. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 28, p. 100672, abr. 2020. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100672>

LOPES, J. C.; BRAGA, J. B. F.; CONEJO, J. L. **SMAP – a simplified hydrological model**. In: Applied Modeling in Catchment Hydrology, V. P. Singh (Editor). Water Resources Publications, Littleton, Colorado, p. 1218-1222, 1982.

MALVEIRA, V. T. C.; DE ARAÚJO, J. C.; GUNTNER, A. Hydrological impact of a high-density reservoir network in semiarid northeastern Brazil. **Journal of Hydrological Engineering**, v. 12, n. 1, p. 109-117, jan. 2012. Disponível em:
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000404](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000404)

ME, W.; HAMILTON, D. P.; MCBRIDE, C. G.; ABELL, J. M.; HICKS, B. J. Modelling hydrology and water quality in a mixed land use catchment and eutrophic lake: effects of nutrient load reductions and climate change. **Environmental Modelling & Software**, v. 109, p. 114-133, nov. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.08.001>.

MESQUITA, J. B. F.; LIMA NETO, I. E.; RAABE, A.; DE ARAÚJO, J. C. The influence of hydroclimatic conditions and water quality on evaporation rates of a tropical lake. **Journal of Hydrology**, v. 590, p. 125456, nov. 2020. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125456>

MESSINA, N. J.; COUTURE, R.M.; NORTON, S. A.; BIRKEL, S. D.; AMIRBAHMAN, A. Modeling response of water quality parameters to land-use and climate change in a temperate, mesotrophic lake. **Science of the Total Environment**, v.713, 136549, abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136549>.

MOLINA-NAVARRO, E.; TROLLE, D.; MARTÍNEZ-PÉREZ, S.; SASTRE-MERLÍN, A.; JEPPESEN, E. Hydrological and water quality impact assessment of a Mediterranean limno-reservoir under climate change and land use management scenarios. **Journal of Hydrology**, v.509, p. 354-366, fev. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.053>.

MOOIJ, Wolf M. et al. The impact of climate change on lakes in the Netherlands: a review. **Aquatic Ecology**, v. 39, n.4, p. 381-400, out. 2005. Disponível em:
<https://doi.org/10.1007/s10452-005-9008-0>.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-890, maio. 2007. Disponivel em: <https://doi.org/10.13031/2013.23153>.

MOURA, D. S.; LIMA NETO, I. E.; SOUSA, A. C.; ALMEIDA, A. S. O.; PESTANA, C. J.; ROCHA, M. A.M.; CAPELO-NETO, J. Modeling phosphorus exchange between bottom sediment and water in tropical semiarid reservoirs. **CHEMOSPHERE**, v. 246, p. 125686, maio. 2020. Disponivel em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125686>.

NAZARI-SHARABIAN, M.; AHMAD, S.; KARAKOUZIAN, M. Climate change and eutrophication: a short review. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, v.8, n.6, p.3668-3672, dez. 2018. Disponivel em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.2532694>.

NAZARI-SHARABIAN, M.; TAHERIYOUN, M.; AHMAD, S.; KARAKOUZIAN, M. Water quality modeling of Mahabad Dam watershed-reservoir system under climate change conditions, using SWAT and system dynamics. **Water**, v.11, n. 2, p.1-16, fev. 2019. Disponivel em: <https://doi.org/10.3390/w11020394>.

NIELSEN, A.; TROLLE, D.; ME, W.; LUO, L.; HAN, B. P.; LIU, Z.; OLESEN, J.; JEPPESEN, E. Assessing ways to combat eutrophication in a Chinese drinking water reservoir using SWAT. **Marine and Freshwater Research**, v. 64, n. 5, p. 475-492, maio. 2013. Disponivel em: <https://doi.org/10.1071/MF12106>

O'NEIL, J. M.; DAVIS, T. W.; BURFORD, M. A.; GOBLER, C. J. The rise of harmful cyanobacteria blooms: the potential roles of eutrophication and climate change. **Harmful Algae**, v.14, p.313-334, fev. 2012. Disponivel em: <https://doi.org/10.1016/j.hal.2011.10.027>.

PACHECO, C. H. A.; LIMA NETO, I. E. Effect of artificial circulation on the removal kinetics of cyanobacteria in a hypereutrophic shallow lake. **Journal of Environmental Engineering**, v.143, n.12, p.06017010, dez. 2017. Disponivel em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001289](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001289).

PAERL, H. W.; HUISMAN, J. Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. **Environmental Microbiology Reports**, v.1, n.1, p. 27-37, fev. 2009. Disponivel em: <https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2008.00004.x>.

PARK, Y.; CHO, K. H.; KANG, J. H.; LEE, S. W.; KIM, J. H. Developing a flow control strategy to reduce nutrient load in a reclaimed multi-reservoir system using a 2D hydrodynamic and water quality model. **Science of The Total Environment**, v. 466-467, p. 871-880, jan. 2014. Disponivel em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.041>.

PAULA FILHO, F. J.; SAMPAIO, A. D. S.; MENEZES, J. M. C.; COSTA, C. T. F. SANTIAGO, M. O. Land uses, Nitrogen and Phosphorus estimated fluxes in a Brazilian semi-arid watershed. **Journal of Arid Environments**, v. 163, p. 41-49, abr. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.01.001>

PERAZZOLI, M.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V. Assessing the impact of climate change scenarios on water resources in southern Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 58, n. 1, p. 77-87, nov. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.742195>.

PILOTTI, M., SIMONCELLI, S., VALERIO, G. A simple approach to the evaluation of the actual water renewal time of natural stratified lakes. **Water Resources Research**, v. 50, n. 4, p. 2830-2849, abr. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2013wr014471>

PIRAS, M.; MASCARO, G.; DEIDDA, R.; VIVONI, E. R. Quantification of hydrologic impacts of climate change in a Mediterranean basin in Sardinia, Italy, through high-resolution simulations. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.18, n. 12, p. 5201-5217, dez. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-18-5201-2014>

ROCHA JUNIOR, C. A. N.; COSTA, M. R. A.; MENEZES, R. F.; ATTAYDE, J. L.; BECKER, V. Water volume reduction increases eutrophication risk in tropical semi-arid reservoirs. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v.30, n. 106, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s2179-975x2117>.

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 de Ingeniería y Ciencias Ambientales**, v. 13, n. 3, p. 715-730, dez. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2020.13.2.67679>

ROCHA, S. M. G.; MESQUITA, J. B. F.; LIMA NETO, I. E. Análise e modelagem das relações entre nutrientes e fitoplâncton em reservatórios do Ceará. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 54, p. 134-147, dez. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820190536>.

SABOIA, M. A. M.; SOUZA FILHO, F. A.; HELFER, F.; ROLIM, L. Z. R. Robust strategy for assessing the costs of urban drainage system designs under climate change scenarios. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 146, n. 11, p. 05020022, nov. 2020. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001281](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001281)

SALA, H. J.; MARTINO, P. A. A simplified trophic state model for warm water tropical lakes. **Water Research**, v. 25, n. 3, p. 341-350, mar. 1991. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(91\)90015-I](https://doi.org/10.1016/0043-1354(91)90015-I).

SANTHI, C.; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; DUGAS, W. A.; SRINIVASAN, R.; HAUCK, L. M. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. **Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)**, v. 37, n. 5, p.1169-1188, out. 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03630.x>

SANTOS, J. C. N.; ANDRADE, E. M.; ARAÚJO NETO, J. R.; MEIRELES, A. C. M.; PALÁCIO, H. A. Q. Land use and trophic state dynamics in a tropical semi-arid reservoir. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 1, p. 35-44, jan./mar. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000100005>.

SCHINDELER, D. W.; CARPENTER, S. R.; CHAPRA, S. C.; HECKY, R. E.; ORIHÉL, D. M. Reducing phosphorus to Curb Lake eutrophication is a success. **Environmental Science & Technology**, v. 50, n. 17, p. 8923-8929, ago. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02204>.

SHALBY, A.; ELSHEMY, M.; ZEIDAN, B. A. Assessment of climate change impacts on water quality parameters of Lake Burullus, Egypt. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 32157-32178, set. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06105-x>

SHARPLEY, A. N.; CHAPRA, S. C.; WEDEPOHL, R.; SIMS, J. T.; DANIEL, T. C.; REDDY, K. R. Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: issues and options. **Journal of Environmental Quality**, v. 23, n. 3, p. 427-451, maio. 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/jeq1994.00472425002300030006x>.

SHOKRI, A.; HADDAD, O. B.; MARIÑO, M. A. Multi-objective quantity-quality reservoir operation in Sudden Pollution. **Water Resources Management**, v. 28, n.2, p. 567-586, jan. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0504-z>.

SHRESTHA, M. K.; RECKNAGEL, F.; FRIZENSCHAF, J.; MEYER, W. Future climate and land uses effects on flow and nutrient loads of a Mediterranean catchment in South Australia. **Science of The Environment**, v. 590-591, p. 186-193. jul. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.197>.

SILVA, M. V. M.; SILVEIRA, C. S.; SILVA, G. K.; PEDROSA, W. H. V.; MARCOS JÚNIOR, A. D.; SOUZA FILHO, F. A. Projections of climate change in streamflow and affluent natural energy in the Brazilian hydroelectric sector of CORDEX models. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, n.34, p.1-15, jul. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020200020>

SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. A.; VASCONCELOS JUNIOR, F.C. Streamflow projections for the Brazilian hydropower sector from RCP scenarios. **Journal of Water and**

Climate Change, v. 8, n. 1, p. 114-126, out. 2016. Disponível em:
<https://doi.org/10.2166/wcc.2016.052>.

SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. A.; VASCONCELOS JÚNIOR, F. C.; MARTINS, E. S. R. Projections of the Affluent Natural Energy (ANE) for the Brazilian electricity sector based on RCP4.5 and RCP8.5 scenarios of IPCC-AR5. **Hydrology and Earth System Sciences**, p.1-18, abr. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-2016-135>

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). Secretaria Nacional de Saneamento (SNS). **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos**. Brasília: SNS/MDR, 2019.

TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An overview of CMIP5 and the experiment design. **American Meteorological Society**, v. 93, n.4, p. 485-498, abr. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.

THORNE, O.; FENNER, R.A. The impacts of climate change on reservoir water quality and water treatment plant operations: a UK case study. **Water and Environment Journal**, v.25, n. 1, p.74-87, out. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2009.00194.x>.

TIEZZI, Rafael et al. Trends of streamflow under climate change for 26 Brazilian basins. **Water Policy**, v. 21, n.1, p. 206-220, dez. 2018. Disponível em:
<https://doi.org/10.2166/wp.2018.207>.

TOLEDO, J.; TALARICO, M.; CHINEZ, S. J.; AGUDO, E. G. A aplicação de modelos simplificados para a avaliação de processo de eutrofização em lagos e reservatórios tropicais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 12., 1983, Camboriú, **Anais [...]**. Santa Catarina: ABES, 1983, p. 1-34.

TONE, A. J. A.; LIMA NETO, I. E. Modelagem simplificada do fósforo total em lagos e reservatórios brasileiros. **Revista DAE**, v. 67, n. 221, p. 142-156, jan./mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.36659/dae.2020.012>.

TROLLE, D.; HAMILTON, D. P.; PILDITCH, C. A.; DUGGAN, I. C.; JEPPESEN, E. Predicting the effects of climate change on trophic status of three morphologically varying lakes: implications for lake restoration and management. **Environmental Modelling & Software**, v. 26, n. 4, p. 354-370, abr. 2011. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.08.009>.

TUNG, Y. K. Effect of uncertainties on probabilistic-based design capacity of hydrosystems. **Journal of Hydrology**. v. 557, n. 66, p.851-867, fev. 2018. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.059>

VAN LIEW, M. W.; ARNOLD, J. G.; GARBRECHT, J. D. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: choosing between two models. **Transactions of the ASAE**, v.46, n.6, p.1539-1551, out. 2003. Disponivel em: <https://doi.org/10.13031/2013.15643>

VOLLENWEIDER, R. A. **Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication**. Paris: OECD, 1968.

VUUREN, Detlef van et al. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, v. 109, n. 1, p. 5-31, ago. 2011. Disponivel em: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.

WIEGAND, M. C.; NASCIMENTO, A. T. P.; COSTA, A. C.; LIMA NETO, I. E. Trophic state changes of semi-arid reservoirs as a function of the hydro-climatic variability. **Journal of Arid Environments**, v.184, p.104321, 2021. Disponivel em: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104321>

XIA, Rui *et al.* The potential impacts of climate change factors on freshwater eutrophication: implications for research and countermeasures of water management in China. **Sustainability**, v. 8, n. 3, 229, mar. 2016. Disponivel em: <https://doi.org/10.3390/su8030229>

ZHANG, C.; HUANG, Y.; JAVED, A.; ARHONDITSIS, G. B. An ensemble modeling framework to study the effects of climate change on the trophic state of shallow reservoirs. **Science of the Total Environment**, v. 697, p.134078, dez. 2019. Disponivel em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134078>.

ZHENG, F. L.; HUANG, C. H.; NORTON, L. D. Effects of near-surface hydraulic gradients on nitrate and phosphorus losses in surface runoff. **Journal of Environmental Quality**, v. 33, n. 6, p. 2174-2182, nov. 2004. Disponivel em: <https://doi.org/10.2134/jeq2004.2174>.