



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA

MARIA HELENA FAUSTINO MARTINS DE CASTRO

**ALOCAÇÃO QUALI-QUANTITATIVA DE ÁGUA EM
RESERVATÓRIOS DE REGIÕES SEMIÁRIDAS**

Natal
2018

MARIA HELENA FAUSTINO MARTINS DE CASTRO

**ALOCAÇÃO QUALI-QUANTITATIVA DE ÁGUA EM
RESERVATÓRIOS DE REGIÕES SEMIÁRIDAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

Orientador: Prof. Dra. Joana Darc Freire de Medeiros

Natal
2018

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Castro, Maria Helena Faustino Martins de.

Alocação quali-quantitativa de água em reservatórios de regiões semiáridas / Maria Helena Faustino Martins de Castro. - 2018.

43 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Pós-Graduação em Engenharia Sanitária. Natal, RN, 2018.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Joana Darc Freire de Medeiros.

1. Recursos hídricos - Dissertação. 2. Outorga - Recursos hídricos - Dissertação. 3. Reservatórios de água - Dissertação. 4. Semiárido - RN - Dissertação. 5. Disponibilidade hídrica - Dissertação. I. Medeiros, Joana Darc Freire de. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 626(043.3)

MARIA HELENA FAUSTINO MARTINS DE CASTRO

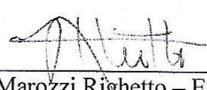
**ALOCAÇÃO QUALI-QUANTITATIVA DE ÁGUA EM
RESERVATÓRIOS DE REGIÕES SEMIÁRIDAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

BANCA EXAMINADORA



Dra. Joana Darc Freire de Medeiros – Orientadora



Dr. Antônio Marozzi Righetto – Examinador UFRN



Dr. Carlos Ruberto Fragoso Júnior – Examinador Externo UFAL

Natal, 31 de Agosto de 2018

AGRADECIMENTOS

À Deus pela força em cada recomeço, pela fé de que tudo daria certo e pelo seu infinito amor. Sem Ele nada disso seria possível.

À minha família, em especial aos meus pais, pelo amor, pela compreensão da minha ausência, pelo incentivo em mais esta etapa da minha vida e por cada sacrifício feito para que eu pudesse chegar até aqui. Obrigada por acreditarem em mim.

À minha orientadora, Professora Dra. Joana Darc Freire de Medeiros, que sempre soube me orientar com sabedoria, muita paciência e compreensão. Obrigada por acreditar na minha capacidade de realizar o trabalho, mesmo com todas as dificuldades no caminho. Por todo o conhecimento que me passou e me incentivou a buscar. A senhora é um exemplo a ser seguido em todos os aspectos. Obrigada por tudo.

Aos meus amigos do mestrado, em especial Carmem e Pedro, por terem me estendido a mão, independente da hora do dia, nos momentos em que eu mais precisei. Serei eternamente grata a vocês. À Leonel, Mislainy e Thiago, por partilharmos dessa jornada juntos desde o início, nos incentivando nos momentos mais difíceis. Às 'luluzinhas', por cada momento que dividimos no decorrer desse período.

Aos demais amigos, em especial a Priscila, Danielle Alves e Rayanne. Obrigada por cada momento compartilhado, por cada risada, por cada mensagem. Vocês foram fundamentais nesta etapa da minha vida. Ao meu amigo Rafael Freitas, que mesmo sem tempo não hesitou em me ajudar na etapa final/crucial da minha pesquisa. Obrigada pelo conhecimento compartilhado, Rafa.

Aos professores do PPgES, por todo o conhecimento compartilhado e pelo frequente incentivo à pesquisa.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos durante o período do mestrado.

Enfim, a todos que colaboraram, direta ou indiretamente, para que este sonho se tornasse realidade. Muito obrigada.

RESUMO

Nos últimos anos a região semiárida brasileira vem passando por um dos piores cenários em termos de disponibilidade hídrica. Além da redução em termos quantitativos, tem-se verificado que grande parte dos reservatórios encontram-se eutrofizados, o que pode comprometer ainda mais as vazões disponíveis para o atendimento das demandas. Isto tem resultado no aumento dos conflitos em torno dos usos da água, exigindo operações cada vez mais eficientes dos reservatórios. Neste sentido, esta pesquisa tem como objetivo propor uma metodologia simplificada de alocação de água em reservatórios de região semiárida, considerando os aspectos quantitativos e qualitativos dos recursos hídricos, de modo que seja possível verificar a máxima disponibilidade hídrica passível de ser outorgada sem comprometer a sustentabilidade dos açudes. A metodologia proposta foi baseada nas técnicas de simulação e otimização, sendo o fósforo total o parâmetro de qualidade considerado. A relação entre o aspecto quantitativo (porcentagem do volume armazenado) e qualitativo (concentração de fósforo total) dos recursos hídricos foi obtida por meio de regressão linear simples. O resultado da análise estatística mostrou que a porcentagem do volume armazenado é um potencial indicador para estimar as concentrações de fósforo total presentes nos reservatórios, o que valida a metodologia proposta. Esta metodologia foi aplicada para quatro cenários distintos e os resultados mostraram que mesmo sem considerar o aspecto qualitativo dos recursos hídricos, no processo de alocação de água, a maioria dos reservatórios da região semiárida não é capaz de atender a demanda requerida. Ao inserir o aspecto qualitativo dos recursos hídricos na metodologia proposta e limitar a concentração máxima de fósforo total presente nas águas dos reservatórios conforme estabelecida pela Resolução do CONAMA 357/2005, foi observado que a disponibilidade hídrica dos reservatórios analisados foi reduzida em 100%, quando considerado o reservatório como corpo de água doce Classe 2 e 60%, quando considerado o reservatório como corpo de água doce Classe 3, evidenciando a má qualidade das águas dos reservatórios analisados e o quanto o aspecto qualitativo pode comprometer o processo de alocação de água.

Palavras-Chave: Disponibilidade hídrica; outorga; reservatórios; semiárido.

ABSTRACT

Over the past years the Brazilian semiarid region has been experiencing one of the worst scenarios in terms of water availability. In addition to the reduction in quantitative terms, it has been verified that most of the reservoirs are eutrophic which can compromise the available flows to meet the demands. This has resulted in increased conflicts over water uses requiring increasingly efficient reservoir operations. Thus, this research aims to propose a simplified methodology for the allocation of water in semi-arid region reservoirs, considering the quantitative and qualitative aspects of water resources, so that it is possible to verify the maximum water availability that can be granted without compromising sustainability of the reservoirs. The proposed methodology was based on simulation and optimization techniques using total phosphorus as the quality parameter. The relationship between the quantitative (percentage of stored volume) and qualitative (total phosphorus concentration) aspects of water resources was obtained through linear regression. The result of the statistical analysis showed that the percentage of the stored volume is a potential indicator to estimate the concentrations of total phosphorus present in the reservoirs which validates the proposed methodology. This methodology was applied to four different scenarios and the results showed that even without considering the qualitative aspect of water resources in the water allocation process most of the reservoirs in the semi-arid region are not able to meet the required demand. Inserting the qualitative aspect of the water resources in the proposed methodology and limiting the maximum concentration of total phosphorus present in the waters of the reservoirs as established by CONAMA Resolution 357/2005, it was observed that the water availability of the analyzed reservoirs was reduced by 100% when considered the reservoir as a freshwater body Class 2 and 60% when considering the reservoir as a freshwater body Class 3, evidencing the poor water quality of the analyzed reservoirs and the qualitative aspect may compromise the water allocation process.

Key words: Water availability; granting; reservoirs; semiarid.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. MATERIAL DE MÉTODOS	10
2.1. ÁREA DE ESTUDO	10
2.2. RELAÇÃO ENTRE QUANTIDADE E QUALIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS.....	15
2.3. SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO	15
2.3.1. Simulação	16
2.3.2. Otimização	17
2.4. CENÁRIOS	18
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
3.1. ANÁLISE DA REGRESSÃO LINEAR.....	22
3.2. CENÁRIO 1.....	24
3.3. CENÁRIO 2.....	29
3.4. CENÁRIO 3.....	31
3.5. CENÁRIO 4.....	35
4. CONCLUSÕES	38
REFERÊNCIAS	39

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, as demandas de água têm aumentado nas últimas décadas, devido ao processo de desenvolvimento econômico, ao aumento populacional e à quantificação, cada vez mais fundamentada, das necessidades ambientais. As disponibilidades hídricas, por sua vez, são limitadas pela distribuição geográfica e temporal da água, por vezes inadequada ao atendimento das demandas, além da exploração sem controle destes recursos e a frequente degradação de sua qualidade (Lopes; Freitas, 2007).

Na tentativa de assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso a este recurso, a Lei Federal 9.433/1997 instituiu o instrumento de Outorga de Direito de Uso dos Recursos Hídricos, instrumento legal de alocação de água entre os diversos usos na bacia hidrográfica (Brasil, 1997), sendo os seus critérios gerais estabelecidos na Resolução nº 16/2001, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (Brasil, 2001).

Na maioria dos estados brasileiros, o procedimento de alocação de água para fins de outorga baseia-se em vazões de referência e no estabelecimento de limites de utilização dessas vazões. Além de apresentar como vantagem a simplicidade de sua implementação, o uso da vazão de referência aumenta a confiabilidade de atendimento, pois diminui a ocorrência de falhas (Ribeiro, 2000). Esta garantia de atendimento ou de permanência é necessária para que os usuários possam realizar um melhor planejamento de suas atividades e investimentos em seus empreendimentos.

Entretanto, a capacidade de regularização de um reservatório é altamente influenciada pelo grau de variabilidade de suas vazões naturais (Studart; Campos, 2001). Em regiões semiáridas, caracterizadas por apresentarem naturalmente altas temperaturas, baixas amplitudes térmicas, forte insolação, altas taxas de evaporação, baixos índices pluviométricos e regime de chuvas irregular (ANA, 2015), esta variabilidade acaba sendo elevada. Isto se deve a alternância entre ciclos, caracterizados por anos sucessivos de escassez de água com anos sucessivos de alta precipitação, o que tem resultado em incertezas na estimativa das vazões regularizadas dos reservatórios nos anos subsequentes.

Estas incertezas, inerentes ao comportamento aleatório das vazões naturais, consistem em uma das maiores dificuldades com que o processo de alocação de água se defronta (Studart; Campos, 2001), as quais, associadas ao aumento das demandas, têm exigido operações cada vez mais eficientes dos reservatórios. Uma das regras de

operação mais utilizadas inclui a divisão do volume útil do reservatório em diferentes zonas que possuem políticas de descargas específicas (Wurbs 1996; Bravo et al., 2008; Nunes et al., 2016; Cardoso et al., 2016; Santos; Celeste, 2016). Essas regras de operação, chamadas de curvas-guia, são usadas para indicar volumes (ou níveis d'água) alvos ou ideais do reservatório visando à alocação ótima de água. Em geral, a curva-guia tem sido utilizada como uma estratégia na operação de reservatórios, reduzindo a quantidade de água fornecida aos usuários de modo a evitar o colapso dos recursos hídricos (Nunes et al., 2016).

Um estudo coordenado pela Agência Nacional de Águas (ANA) no ano de 2017 analisou, em termos quantitativos, a situação de 204 reservatórios do Semiárido brasileiro com capacidade total de armazenamento de mais de 31 milhões de metros cúbicos de água. As análises indicaram que apenas 85 deles possuem condições de atender a novas demandas e que 119 reservatórios estão no limite de suas capacidades de armazenamento (ANA, 2017).

Contudo, analisar a disponibilidade hídrica sem considerar o aspecto qualitativo dos recursos hídricos, tem levado a cenários ainda otimistas quanto aos volumes disponíveis para alocação de água. A importância da análise qualitativa torna-se ainda mais evidente em regiões semiáridas, que por apresentarem rios intermitentes, secas prolongadas e altas taxas de evaporação tendem a aumentar os níveis de nutrientes e o tempo de residência da água dos mananciais, favorecendo a condição eutrófica, chegando, em casos extremos, a inviabilizar o uso da água para as atividades humanas (Costa *et al* 2006; Costa *et al.*, 2009; Barbosa, 2012; Medeiros *et al.*, 2015).

Rocha Junior *et al.*, (2018) mostraram, em um estudo realizado em dezesseis reservatórios da região semiárida, que a redução do nível de água afeta o estado trófico dos reservatórios, aumentando o risco de eutrofização. Segundo Freitas *et al.* (2011), o aumento da concentração de nutrientes no período de estiagem estaria associado a dois fatores: à redução do volume e da profundidade de água do reservatório, o que acarreta na concentração dos nutrientes e; ao processo de ressuspensão dos sedimentos, geralmente rico em nutrientes, favorecido pelo baixo nível de água em que o reservatório se encontra

Elaborado em 2016, o Plano de Recursos Hídricos da bacia do rio Piancó-Piranhas-Açu, bacia esta totalmente inserida na região semiárida, verificou que a eutrofização dos açudes é uma das maiores ameaças à qualidade das águas na bacia.

Dos 62 pontos de monitoramento analisados, no período de 2007 a 2011, 60 deles apresentaram valores de concentração de fósforo acima do limite estabelecido pela resolução do CONAMA 357/2005 (ANA, 2016).

Estas condições eutróficas, associada à disponibilidade de luz das regiões semiáridas, favorecem a floração de cianobactérias, o que é considerado um grave problema ambiental e de saúde pública, principalmente em reservatórios utilizados para o abastecimento humano, como é o caso dos reservatórios do semiárido do Rio Grande do Norte (Costa *et al.*, 2009).

Em meio a este cenário, a inserção do aspecto qualitativo no processo decisório de alocação de água tem despertado a atenção de muitos pesquisadores nos últimos anos (Chaves *et al.*, 2004; Karamouz *et al.*, 2004; Kerachian; Karamouz, 2007; Karamourz *et al.*, 2008; Machado *et al.*, 2012; Davidsen *et al.*, 2015). No entanto, devido ao grande número de parâmetros selecionados ou até mesmo a não-linearidade dos processos envolvidos, a maioria dessas pesquisas tem apresentado metodologias complexas, o que dificulta a sua implementação pelos órgãos gestores dos recursos hídricos. Este grau de complexidade tende a aumentar à medida que são incorporadas restrições (aspectos de qualidade, quantidade, social, econômico) ao objetivo principal do processo de alocação.

Logo, apesar de ser um problema clássico, a alocação de água continua a ser um desafio a gestores, usuários e pesquisadores, principalmente devido ao aumento de conflitos resultantes da disputa pelo seu uso, provocados pelo aumento progressivo da demanda em um cenário de escassez hídrica relativa cada vez mais evidente.

Diante deste cenário, este trabalho objetiva propor uma metodologia simplificada de alocação de água em reservatórios da região semiárida, considerando os aspectos quantitativos e qualitativos de modo que seja possível verificar a máxima disponibilidade hídrica passível de ser outorgada sem comprometer a sustentabilidade dos açudes.

2. MATERIAL DE MÉTODOS

2.1. ÁREA DE ESTUDO

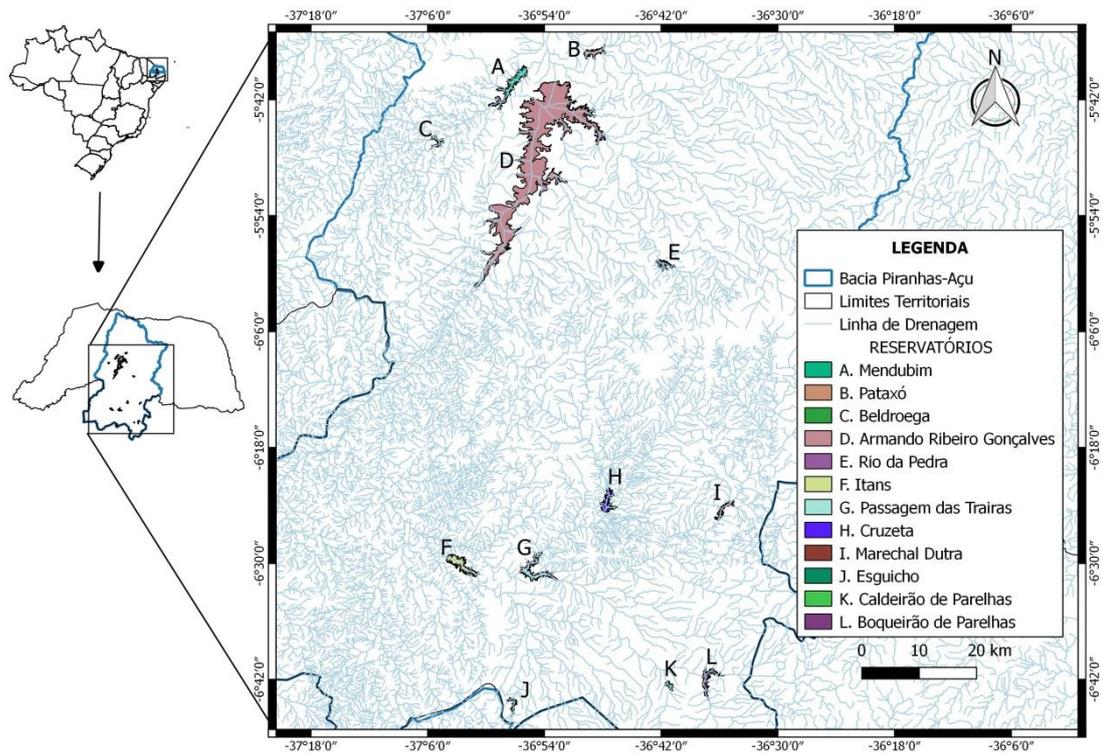
A bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu possui área total de 43.683 km². Seu território divide-se entre os Estados da Paraíba (60%) e do Rio Grande do Norte (40%) e é caracterizada pelo clima do tipo semiárido, com precipitação anual variando de 500 a 700 mm, evaporação média Piché de 2.338 mm/ano e a evapotranspiração, segundo os métodos de Hargreaves e Penman-Monteith, da ordem, respectivamente, de 1.620 mm/ano e 1.786 mm/ano (ANA, 2016). No Rio Grande do Norte, esta bacia ocupa uma área de 17.498,5 km², 32,8 % do território estadual, abrange 47 municípios e é uma das bacias receptoras da transposição das águas do Rio São Francisco.

Totalmente inserida em território de clima semiárido, a bacia apresenta chuvas concentradas em poucos meses do ano e um padrão de forte variabilidade interanual, caracterizado pela alternância entre anos de pluviosidade acima da média, regular e anos consecutivos de valores abaixo da média, que resultam numa rede hidrográfica com rios intermitentes, baixa disponibilidade hídrica e ocorrência de secas prolongadas (ANA, 2016). Em meio a este cenário natural, associado à elevada demanda da região, a construção de reservatórios de regularização torna-se imprescindível, desempenhando relevante papel na gestão de recursos hídricos pela sua capacidade de estocar e liberar água no decorrer do tempo, permitindo o atendimento a diversos usos (ANA, 2016).

De acordo com o Plano Estadual de Recursos Hídricos, em 1998 já existiam mais de 1000 reservatórios de acumulação superficial cadastrados na bacia, o que era equivalente a 79,6 % do total de volume acumulado no Estado (SERHID, 1998). Embora não existam fontes mais atualizadas de cadastro dos açudes, sabe-se que o número de reservatórios tem aumentado. Estes reservatórios são de fundamental importância para a região, sendo responsáveis pela oferta hídrica para múltiplos usos, especialmente para o abastecimento humano e animal e a irrigação (ANA, 2016).

Dentre os reservatórios da bacia do rio Piranhas-Açu localizados no estado do Rio Grande do Norte, foram selecionados, pela disponibilidade de dados, doze para o presente estudo: Armando Ribeiro Gonçalves, Boqueirão de Parelhas, Itans, Mendubim, Passagem das Traíras, Marechal Dutra, Esguicho, Cruzeta, Pataxó, Rio da Pedra, Caldeirão de Parelhas e Beldroega (Figura 1).

Figura 1: Localização da área de estudo



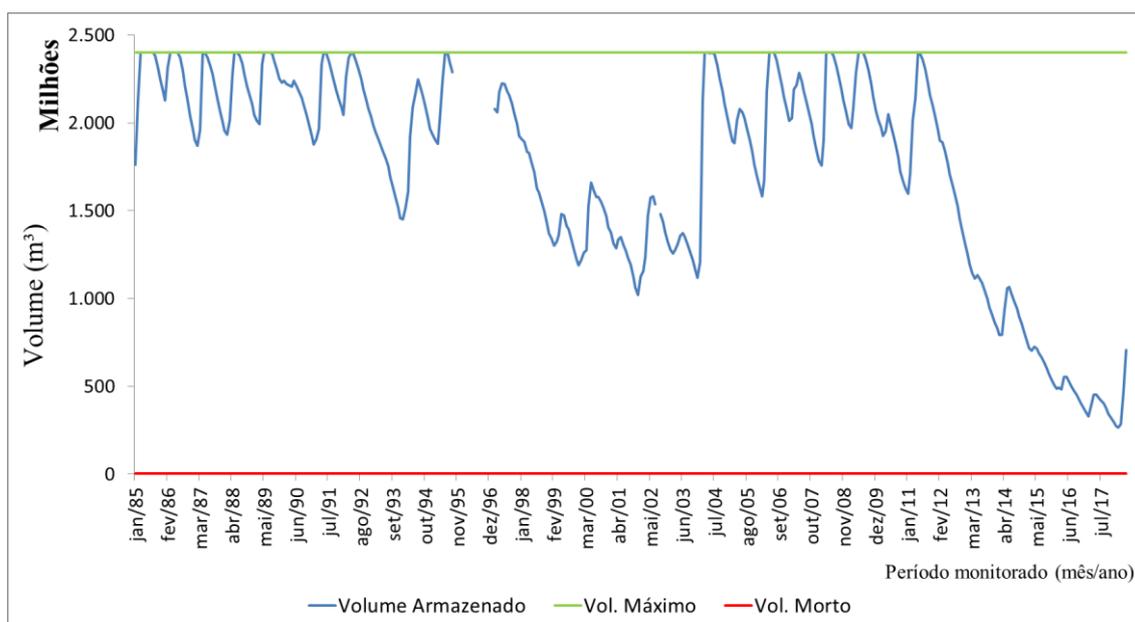
Estes reservatórios são responsáveis pelo abastecimento de mais de 40 municípios potiguares dentro e fora da bacia, somando uma demanda para atendimento dos múltiplos usos de aproximadamente $22 \text{ m}^3/\text{s}$. Deste valor, apenas $1,44 \text{ m}^3/\text{s}$, o que corresponde a menos de 7% do total requerido, são destinados para os usos prioritários, enquanto que 53% da demanda total é alocada para a irrigação (ANA, 2016) (Tabela 1).

Tabela 1: Informações dos reservatórios estudados

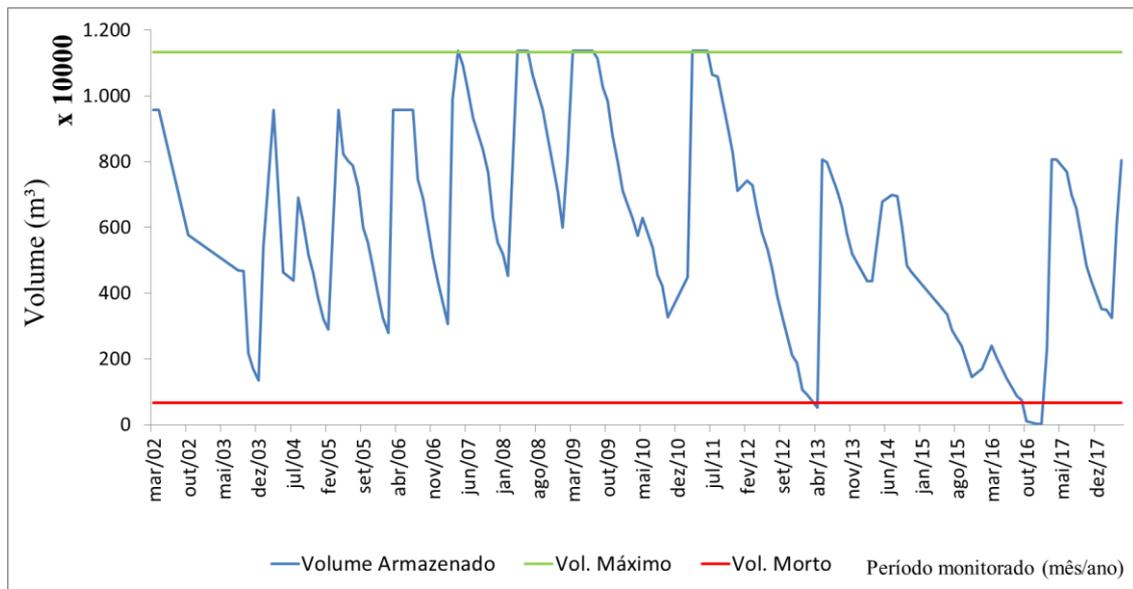
Reservatórios	Capacidade Máxima (hm ³)	Área da Bacia Hidrográfica (km ²)	Demandas (m ³ /s)					Total
			Ab. Humano	Pecuária	Irrigação	Industrial	Aquicultura	
Armando Ribeiro Gonçalves	2.400,00	36.770,00	0,860	0,060	7,259	0,119	8,420	16,718
Boqueirão de Parelhas	84,79	1.519,00	0,093	0,029	0,697	0,083	0,000	0,902
Itans	81,75	1.268,00	0,006	0,027	0,675	0,087	0,000	0,795
Mendubim	76,35	1.062,50	0,000	0,000	0,091	0,000	0,000	0,091
Passagem das Traíras	49,70	7.600,00	0,038	0,022	0,676	0,013	0,003	0,752
Marechal Dutra	44,42	2.400,00	0,125	0,013	0,649	0,012	0,000	0,799
Esguicho	27,94	448,00	0,010	0,005	0,062	0,000	0,000	0,077
Cruzeta	23,55	1.400,00	0,028	0,026	0,874	0,010	0,000	0,938
Pataxó	15,02	1.081,00	0,028	0,012	0,016	0,004	0,000	0,060
Rio da Pedra	13,60	122,00	0,024	0,014	0,080	0,000	0,029	0,147
Caldeirão de Parelhas	9,32	195,10	0,005	0,004	0,085	0,005	0,000	0,099
Beldroega	8,06	510,00	0,001	0,007	0,080	0,000	0,000	0,088

Fonte: ANA, 2016.

Apesar da elevada capacidade de armazenamento dos reservatórios analisados, totalizando 2.834,5 hm³ aproximadamente (Tabela 1), a disponibilidade hídrica da região apresenta alta variabilidade no tempo, o que pode resultar no aumento do número de falhas no atendimento. Esta variabilidade do volume armazenado nos reservatórios é verificada tanto em reservatórios com alta capacidade de armazenamento, como é o caso da Armando Ribeiro Gonçalves (Figura 2), quanto em reservatórios de pequeno porte, como é o caso de Beldroega (Figura 3).

Figura 2: Comportamento volumétrico da Armando Ribeiro Gonçalves

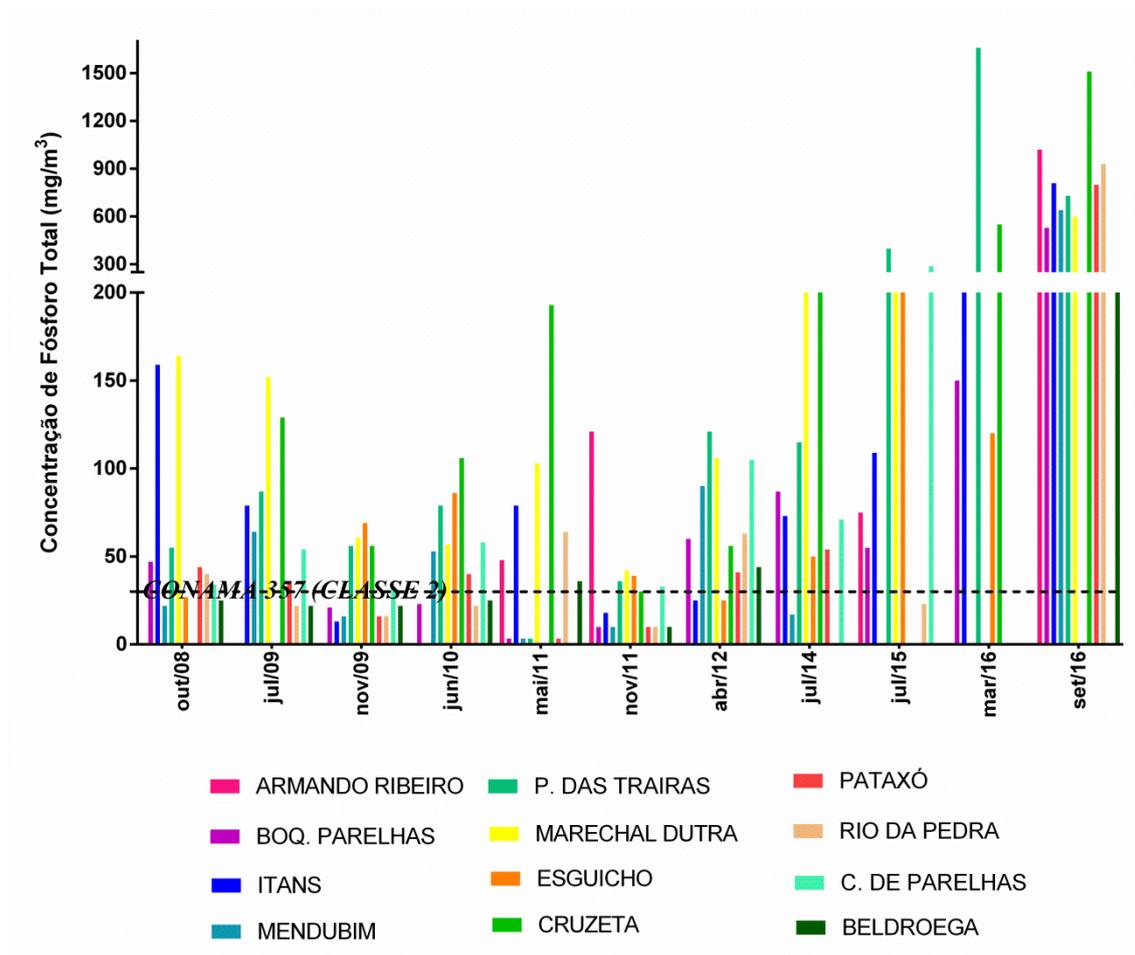
Fonte: IGARN, 2017

Figura 3: Comportamento volumétrico de Beldroega

Fonte: IGARN, 2017

Em termos de qualidade da água, os reservatórios selecionados vêm sendo monitorados por meio do Programa Água Azul desde 2008, com exceção do Armando Ribeiro que passou a ser monitorado somente a partir de 2011. Os dados mostram que todos os reservatórios, em pelo menos um dos períodos analisados, apresentam concentração de fósforo acima de 30 mg/m^3 , limite estabelecido pela Resolução do CONAMA 357/2005 para corpos de água doce Classe 2, sendo os maiores valores verificados no ano de 2016 (Figura 4).

Figura 4: Concentração de fósforo verificada nos reservatórios analisados durante os anos de 2008 a 2016



Fonte: Programa Água Azul, 2018

2.2. RELAÇÃO ENTRE QUANTIDADE E QUALIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS

A fim de simplificar o processo de alocação de água sem desconsiderar o aspecto qualitativo dos recursos hídricos e, considerando que, de acordo com a ANA (2016) a eutrofização é o principal problema dos reservatórios da bacia em estudo, optou-se por trabalhar, em termos qualitativos, com a concentração de fósforo nas águas dos reservatórios. Isto se deve ao fato de algumas algas serem capazes de fixar o N₂ atmosférico mesmo após redução das cargas de N, fazendo com que o controle de fósforo seja a estratégia mais eficaz de mitigação do problema da eutrofização (Sharpley et al., 1994; Padisák, 1997; Schindler et al., 2008; Carpenter, 2008).

A associação do aspecto quantitativo ao qualitativo dos recursos hídricos foi obtida por meio de uma regressão linear simples, gerada no *software* “R” entre as concentrações de fósforo total, oriundas dos Relatórios do Programa Água Azul e referente aos anos de 2008 a 2016 (Programa Água Azul, 2018), e o percentual do volume de água armazenada nos reservatórios no mesmo período, advindos do monitoramento realizado pelo Instituto de Gestão das águas do Rio Grande do Norte – IGARN (IGARN, 2017). Ressalta-se que devido ao grande número de *outliers*, os dados de concentração de fósforo foram logaritmizados (ln) o que permitiu um melhor comportamento (aleatoriedade) dos resíduos da regressão linear.

Objetivando encontrar uma tendência geral no comportamento dos reservatórios da região semiárida, a análise estatística foi realizada considerando o conjunto de açudes estudados, o que implicou em uma função linear única representativa para os doze reservatórios analisados da bacia do rio Piranhas-Açu, sendo esta função capaz de estimar a concentração de fósforo total (C_{TP}) a partir das diferentes porcentagens de volume de água (%VOL) armazenado nos reservatórios:

$$C_{TP} = f(\%VOL) \quad (1)$$

2.3. SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO

A busca da disponibilidade hídrica máxima passível de ser alocada que minimize os conflitos pelos usos de água nos reservatórios estudados foi realizada utilizando um modelo de programação linear, por ser este um método com grau aceitável de complexidade, tornando-o assim viável a sua implementação pelos órgãos gestores. A

linguagem utilizada no modelo foi FORTRAN 95 e sua implementação foi realizada no *software* Plato®.

Visando alcançar o objetivo proposto, foram utilizadas na metodologia as técnicas de simulação e otimização. O modelo foi aplicado individualmente para os doze reservatórios analisados e seus dados de entrada referem-se à série histórica de 1962 a 2009, o que corresponde a 48 anos de dados.

2.3.1. Simulação

Para efetuar as simulações dos reservatórios estudados, em termos quantitativos, foi realizado o balanço hídrico mensal, dado por:

$$S(t+1) = S(t) + Q(t) - D(t) - E(t) - V(t) \quad (2)$$

Sendo $S(t+1)$ o volume do reservatório no final do mês t ; $S(t)$ o volume do reservatório no mês anterior; $Q(t)$ o volume afluyente ao reservatório no mês t ; $D(t)$ o volume efluente total do reservatório para atender as demandas, incluindo os usuários a jusante do reservatório no mês t ; $E(t)$ o volume evaporado no mês t , já descontado da chuva direta sobre o reservatório e $V(t)$ o volume vertido no mês t .

Os valores armazenados $S(t+1)$ foram limitados inferiormente pelo volume morto ($S_{Mín}$), indicando que abaixo deste volume teríamos falha no atendimento das demandas; e superiormente pelo volume máximo ($S_{Máx}$), indicando que acima deste valor ocorre vertimento da água. Isto introduziu as seguintes inequações:

$$S(t+1) \leq S_{Máx} \quad (3)$$

$$S(t+1) \geq S_{Mín} \quad (4)$$

Para cada mês simulado, o valor do volume armazenado em cada reservatório no tempo $t+1$ foi convertido para percentual do volume (% Vol), sendo possível, através da aplicação da Equação 1, estimar a concentração de fósforo presente nas águas dos açudes analisados.

Os valores da concentração de fósforo total, por sua vez, foram limitados pelos valores estabelecidos na Resolução do CONAMA n° 357/2005 para corpos de água doce Classe 2 e 3, indicando que concentrações acima desses limites acarretaria em falha no atendimento das demandas. Isto introduziu as seguintes inequações:

$$C_{TP} \leq 30 \text{ mg/m}^3; \text{ para corpos Classe 2} \quad (5)$$

$$C_{TP} \leq 50 \text{ mg/m}^3; \text{ para corpos Classe 3} \quad (6)$$

2.3.2. Otimização

A fim de verificar a máxima demanda passível de ser atendida, com diferentes garantias, considerando a sustentabilidade hídrica dos reservatórios em termos quantitativos e qualitativos, foram consideradas duas funções objetivo no modelo.

A primeira função objetivo considerada (Equação 7) procurou minimizar a diferença entre a demanda existente e a vazão passível de ser outorgada, considerando apenas o aspecto quantitativo:

$$FO = \min \left\{ \sum_{t=1}^N [D(t) - R(t)] \right\} \quad (7)$$

Sendo t o período de tempo analisado, N o horizonte da operação, $D(t)$ o volume de água requerido para atendimento de todas as demandas no tempo t e $R(t)$ o volume de água disponível para ser alocado no tempo t .

A partir da otimização da demanda máxima passível de ser alocada em cada reservatório considerando apenas o aspecto quantitativo (Equação 7), os valores foram novamente otimizados considerando a variável qualitativa. A inserção deste parâmetro permitiu verificar o quanto o aspecto qualitativo das águas pode influenciar no processo de alocação. Para tanto, foi considerada a segunda função objetivo no modelo (Equação 8):

$$FO = \min \sum_{t=1}^N [TP_{Ver}(t) - TP_{Máx}(t)] \quad (8)$$

Sendo t o período de tempo analisado, N o horizonte da operação, $TP_{Ver}(t)$ a concentração de fósforo verificada em cada reservatório no tempo t e $TP_{Máx}(t)$ a concentração máxima de fósforo admissível de modo a atender a Resolução do CONAMA n° 357/2005 para corpos de água doce Classe 2 e 3.

2.4. CENÁRIOS

A metodologia proposta foi aplicada para quatro cenários distintos, sendo eles:

- Cenário 1: Foi considerado apenas o aspecto quantitativo dos reservatórios analisados, sendo a simulação e otimização realizada para diferentes garantias de atendimento (90%, 95% e 100%) (Figura 5);
- Cenário 2: Foi considerado o aspecto quantitativo e qualitativo da situação real dos reservatórios analisados, sendo a simulação e otimização realizada para uma garantia de atendimento de 90% (Figura 6);
- Cenário 3: Foi considerado o aspecto quantitativo e qualitativo no processo de alocação de água, sendo admitido que para o volume máximo do reservatório a concentração de fósforo seria igual a 10 mg/m^3 , sendo estes valores de concentração alterados a medida que o volume de água armazenada nos reservatórios é reduzido. A simulação e otimização foi realizada para uma garantia de atendimento de 90% (Figura 6) e;
- Cenário 4: Foi considerado o aspecto quantitativo e qualitativo no processo de alocação de água, sendo admitido que para o volume máximo do reservatório a concentração de fósforo seria igual a 5 mg/m^3 , sendo estes valores de concentração alterados a medida que o volume de água armazenada nos reservatórios é reduzido. A simulação e otimização foi realizada para uma garantia de atendimento de 90% (Figura 6).

Ressalta-se que para cada cenário criado, com exceção do primeiro que não considerou o aspecto qualitativo, a função que relaciona a concentração de fósforo com a porcentagem do volume de água armazenado no reservatório (Equação 1) foi ajustada.

Figura 5: Estrutura da metodologia proposta considerando apenas o aspecto quantitativo para diferentes garantias

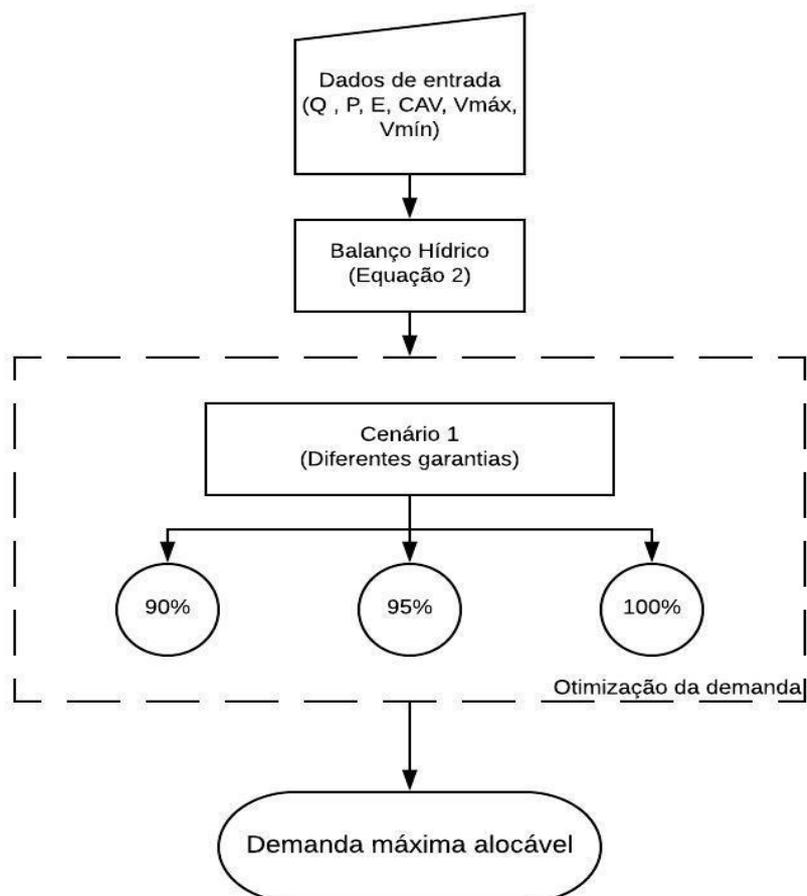
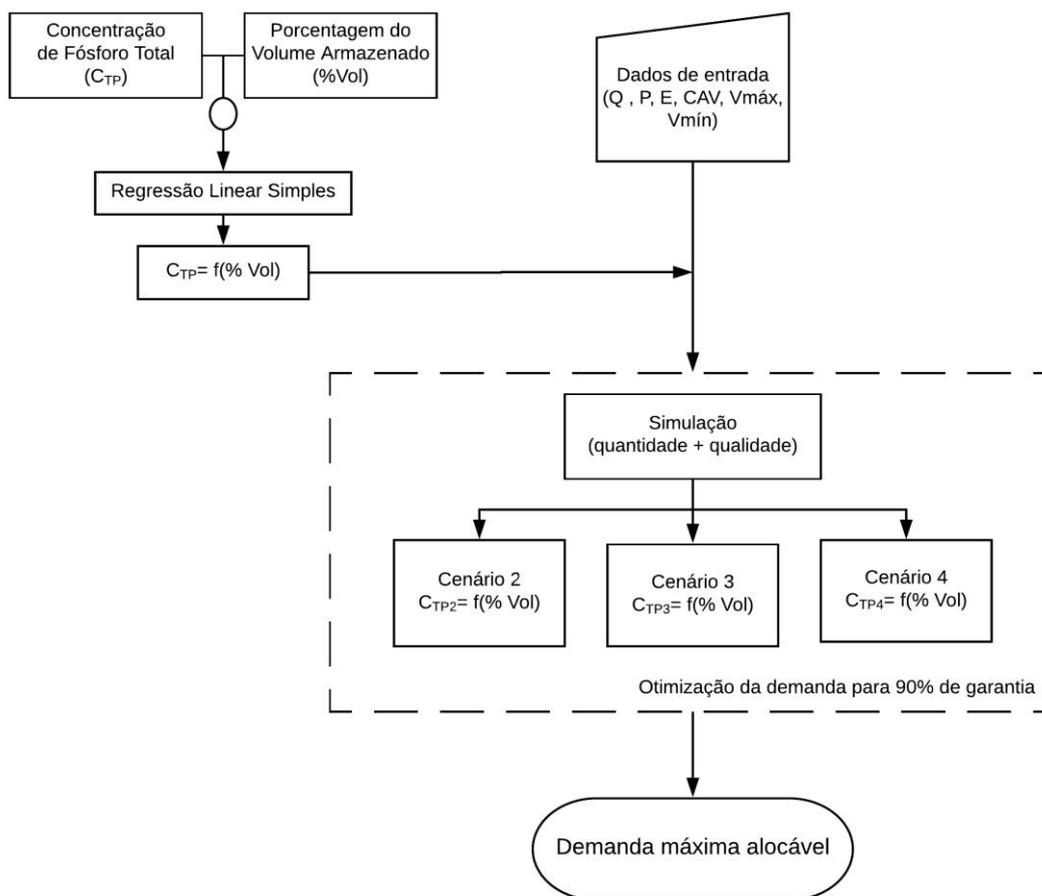


Figura 6: Estrutura da metodologia proposta considerando o aspecto quantitativo e qualitativo



Dados utilizados

Para a aplicação da metodologia proposta foram utilizados dados de vazões naturais afluentes, precipitação, evaporação, volume máximo e mínimo e curva cota-área-volume de cada reservatório.

Os dados de vazões naturais afluentes aos reservatórios inseridos no modelo foram retirados do Plano de Recursos Hídricos da Bacia do rio Piancó Piranhas-Açu, elaborado pela Agência Nacional de Águas no ano de 2016, e são referentes aos anos de 1962 a 2009. Estas vazões foram resultantes da aplicação do modelo de chuva-vazão Soil Moisture Accounting Procedure – SMAP-M ajustados à estação fluviométrica de Piancó (37340000), com exceção do açude Esguicho, que foi calibrado para a estação fluviométrica de São Fernando (37570000) (ANA, 2016). Ressalta-se que, para a geração da série histórica de vazões afluentes mensais de cada açude, o Plano considerou toda a área da bacia hidrográfica do reservatório analisado, desconsiderando a existência de reservatórios a montante.

Os dados dos postos pluviométricos utilizados nas simulações, por sua vez, foram oriundos do banco de dados da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN), sendo o preenchimento de falhas realizado com base na ponderação entre as médias anuais dos postos vizinhos ao posto de interesse, adotando-se dois, três ou quatro postos mais próximos, com dados observados de precipitação mensal (EMPARN, 2018).

No que diz respeito aos dados de evapotranspiração, dado ao reduzido número de estações climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) presentes no Estado, com exceção de Cruzeta as informações a respeito deste parâmetro foram oriundas do banco de dados da FAOCLIM, Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura, que realiza a estimativa da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith (FAO, 2017).

Os dados referentes à curva Cota-Área-Volume (CAV), volume máximo e mínimo de cada reservatório analisado foram retirados da ficha técnica dos açudes disponibilizada pela Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte (SEMARH/RN, 2018).

Destaca-se que foram selecionados, para a simulação e otimização dos reservatórios, os postos pluviométricos e de evapotranspiração com a localização mais próxima do açude analisado (Tabela 2).

Tabela 2: Informações dos dados de entrada

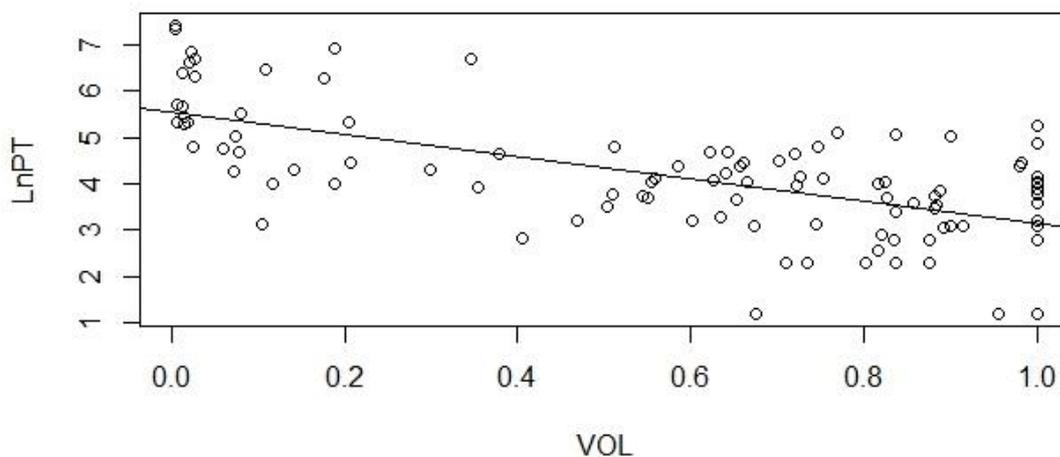
Reservatórios	Localização			CAV
	Açude	ETP (FAOCLIM)	Posto Pluviométrico	
Armando Ribeiro Gonçalves	Açu	São Rafael	São Rafael	Antiga
Itans	Caicó	Caicó	Caicó	Antiga
Mendubim	Açu	Açu	Açude Mendubim	Antiga
Cruzeta	Cruzeta	INMET Cruzeta	Açude Cruzeta	Antiga
Passagem das Traíras	São José do Seridó	Jardim do Seridó	Jardim do Seridó	Nova
Marechal Dutra	Acari	Acari	Açude Gargalheira	Nova
Esguicho	Ouro Branco	Ouro Branco	Ouro Branco	Nova
Pataxó	Ipanguaçu	Açu	Açude Pataxó	Nova
Rio da Pedra	Santana do Matos	Santana do Matos	Barão de Serra Branca	Nova
Caldeirão de Parelhas	Parelhas	Parelhas	Parelhas	Nova
Beldroega	Paraú	Paraú	Paraú	Nova
Boqueirão de Parelhas	Parelhas	Parelhas	Parelhas	Nova

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. ANÁLISE DA REGRESSÃO LINEAR

A análise da regressão linear mostrou que o volume de água armazenado no reservatório é um potencial indicador da concentração de fósforo, haja vista que 42 % da variação total da concentração deste nutriente presente nos reservatórios analisados são explicados pela variação do volume de água armazenado (Figura 7; $R^2=0,42$; $p<0,001$). Estas variáveis estão correlacionadas negativamente (Equação 9), o que corrobora com resultados de estudos anteriores (Costa *et al.*, 2016; Rocha Junior *et al.*, 2018), indicando que existe uma tendência geral, nos reservatórios da região semiárida, de aumento da concentração de fósforo nas águas dos açudes com a redução do seu volume.

Figura 7: Regressão linear entre o ln da concentração de fósforo total (LnTP) e o percentual do volume de água armazenada nos reservatórios (VOL) (2008 a 2016)



$$\ln C_{TP} = 5,5385 - 2,3945 * (\%Vol) \quad (9)$$

A equação linear ajustada resultante da associação entre a quantidade e qualidade dos recursos hídricos (Equação 9), nos permitiu evidenciar que até para a situação mais favorável em termos de qualidade, quando os reservatórios encontram-se com sua capacidade de armazenamento máxima ($\%Vol = 1$), a concentração de fósforo

já é de aproximadamente 25 mg/m^3 , valor este próximo do limite estabelecido pela Resolução do CONAMA n° 357/2005 para corpos de água Classe 2. Este resultado mostra que os reservatórios analisados já se encontram praticamente comprometidos em termos de concentração deste nutriente.

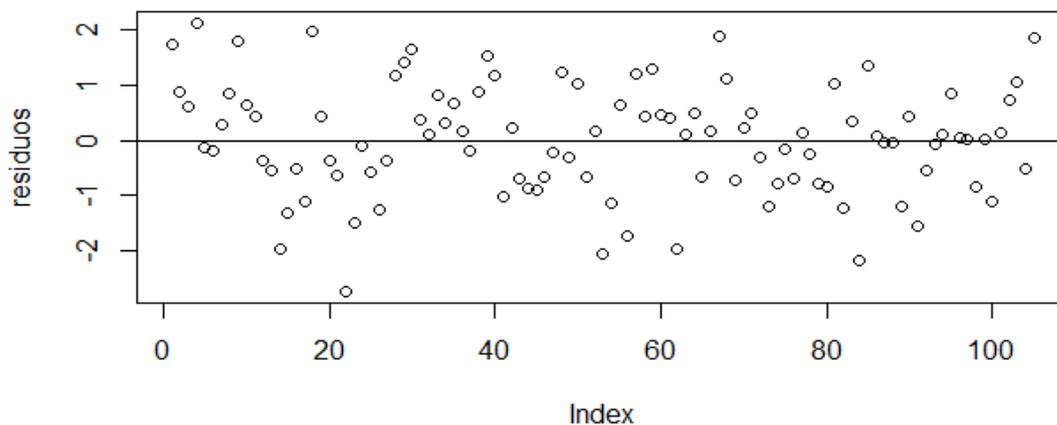
Assim, para avaliar os cenários hipotéticos, a Equação (9) foi ajustada, sendo admitido para os cenários 3 (Equação 10) e 4 (Equação 11) que as concentrações de fósforo seriam iguais a 10 mg/m^3 e 5 mg/m^3 , respectivamente, quando os reservatórios estivessem com sua capacidade de armazenamento máxima ($\%Vol = 1$), sendo estes valores de concentração alterados na medida em que o percentual do volume de água armazenado é reduzido.

$$\ln C_{TP} = 4,6971 - 2,3945 * (\%Vol) \quad (10)$$

$$\ln C_{TP} = 4,0039 - 2,3945 * (\%Vol) \quad (11)$$

Quanto à simplificação feita na metodologia para relacionar o aspecto quantitativo ao qualitativo dos recursos hídricos, o gráfico de resíduos resultante da regressão linear nos permitiu comprovar que ela é adequada para o conjunto de dados, visto que os resíduos não apresentaram nenhuma tendência (Figura 8).

Figura 8: Resíduos resultantes da regressão linear



3.2. CENÁRIO 1

Neste cenário foi verificada, para diferentes garantias de atendimento, a disponibilidade hídrica dos doze reservatórios considerando apenas o aspecto quantitativo dos recursos hídricos (Tabela 3). Os resultados evidenciaram que apenas 60% dos açudes analisados são capazes de alocar água com 100% de garantia, o que já elimina esta garantia de atendimento como alternativa a ser considerada no processo de alocação de água.

Com a redução da garantia para 95%, todos os reservatórios apresentaram possibilidade de alocação de água, com exceção de Rio da Pedra que continuou com vazão regularizada igual a zero.

Ao considerar no processo de alocação de água uma garantia de atendimento de 90%, como é feito atualmente no Estado do Rio Grande do Norte, os resultados mostraram que houve um aumento de aproximadamente $6,5 \text{ m}^3/\text{s}$ na disponibilidade hídrica total dos reservatórios, quando comparado com os resultados da garantia de atendimento anterior (95%), sendo a Armando Ribeiro Gonçalves responsável por aproximadamente $5,5 \text{ m}^3/\text{s}$ deste valor. Os demais reservatórios também apresentaram acréscimos nos valores das vazões disponíveis para outorga, com exceção de Rio da Pedra, que continuou com vazão alocável igual a zero para esta garantia de atendimento.

Tabela 3: Disponibilidade hídrica dos reservatórios para diferentes garantias de atendimento considerando apenas o aspecto quantitativo

Reservatórios	Vazão máxima outorgável (m^3/s)			Demanda Requerida estimada pelo Plano da Bacia (m^3/s)
	100% de Garantia	95% de Garantia	90% de Garantia	
Armando Ribeiro	17,091	22,536	27,720	16,718
Boqueirão de Parelhas	0,126	0,270	0,351	0,902
Itans	0,396	0,540	0,630	0,795
Mendubim	0,162	0,297	0,378	0,091
Passagem das Traíras	0,333	0,657	0,945	0,752
Marechal Dutra	0,000	0,023	0,180	0,799
Esguicho	0,162	0,315	0,405	0,077
Cruzeta	0,000	0,033	0,126	0,938
Pataxó	0,000	0,054	0,135	0,060
Rio da Pedra	0,000	0,000	0,000	0,147
Caldeirão de Parelhas	0,001	0,014	0,024	0,099
Beldroega	0,000	0,027	0,045	0,088
Total	18,271	24,766	30,939	21,466

O conhecimento da disponibilidade hídrica dos reservatórios para diferentes garantias de atendimento associado aos valores das demandas requeridas estimadas pelo Plano da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu (Tabela 3), tornou possível verificar o quanto da demanda requerida para cada reservatório seria atendida. Reitero que esta análise não foi feita para a garantia de 100%, haja vista a baixa ou até mesmo ausência de disponibilidade hídrica dos reservatórios analisados para esta garantia de atendimento, o que torna inviável a sua utilização como alternativa no processo de outorga.

A análise dos dados mostrou que para uma garantia de atendimento de 95%, os reservatórios Armando Ribeiro Gonçalves, Mendubim e Esguicho foram capazes de atender as demandas requeridas em sua totalidade; Boqueirão de Parelhas, Itans, Passagem das Traíras, Pataxó, Caldeirão de Parelhas e Beldroega apresentaram vazões disponíveis capazes de garantir, com folga, o atendimento dos usos prioritários; enquanto que Marechal Dutra e Cruzeta mostraram-se incapazes de atender sequer a demanda destinada para os usos prioritários. Rio da Pedra permaneceu com vazão alocável igual a zero.

Quando considerada a garantia de atendimento de 90%, por sua vez, constatou-se que os reservatórios Armando Ribeiro Gonçalves, Mendubim, Passagem das Traíras, Esguicho e Pataxó apresentaram valores outorgáveis superiores aos requeridos atualmente. Estes valores variaram de 1,25 (Passagem das Traíras) a 5,25 (Esguicho) vezes a mais que a demanda requerida. Os demais reservatórios, com exceção de Rio da Pedra que não se mostrou capaz de regularizar vazão, embora não tenham apresentado valores de demandas suficientes para o atendimento total dos múltiplos usos requeridos, apresentaram valores outorgáveis suficientes para atendimento dos usos prioritários e parcialmente os demais usos.

Diante dos resultados obtidos para as diferentes garantias de atendimento analisadas (100%, 95% e 90%) e considerando a importância não apenas social mas também econômica dos recursos hídricos para a região semiárida, optou-se por trabalhar, nos demais cenários, com uma garantia de 90%. Embora esta garantia apresente, teoricamente, um risco de 10% de falha, ela foi a única das analisadas que garantiu disponibilidade hídrica em todos os reservatórios, com exceção de Rio da Pedra, para o atendimento dos múltiplos usos.

Ainda assim, observou-se que mesmo sem considerar o aspecto qualitativo dos recursos hídricos no processo de alocação de água e considerando o atendimento dos múltiplos usos com 90% de garantia, a maioria dos reservatórios analisados, aproximadamente 60%, não é capaz de atender a demanda total requerida, sendo os maiores déficits no atendimento verificado nos açudes Cruzeta (0,82 m³/s) e Marechal Dutra (0,62 m³/s), os quais apresentam demandas sete e quatro vezes superiores ao máximo passível de alocação, respectivamente.

Segundo Barbosa *et al.*, (2012), várias são as características naturais da região semiárida que podem está contribuindo para o cenário recorrente de déficit hídrico dos reservatórios e, por consequência, para o déficit no atendimento das demandas, dentre elas: alta variação espacial e temporal na precipitação; baixa amplitude térmica com temperaturas acima de 25°C ao longo do ano; alta evapotranspiração potencial, levando a um déficit no balanço hídrico durante pelo menos nove meses do ano; solos rasos e mal estruturados; bacias de drenagem caracterizadas por córregos e rios intermitentes e; cobertura vegetal decidual, denominada "Caatinga".

Analisando o comportamento volumétrico dos reservatórios durante o período simulado, constatou-se que praticamente todas as falhas no atendimento ocorreram nos períodos das maiores secas da região nordeste: nos anos de 1980, em grande parte da década de 90 e no ano de 2001. Isto foi observado tanto para reservatórios de grande porte (Figura 9), quanto para reservatórios de médio (Figura 10) e pequeno porte (Figura 11), evidenciando a fragilidade deste sistema de armazenamento de água frente às condições naturais da região.

Figura 9: Comportamento volumétrico de Itans para uma garantia de atendimento de 90%

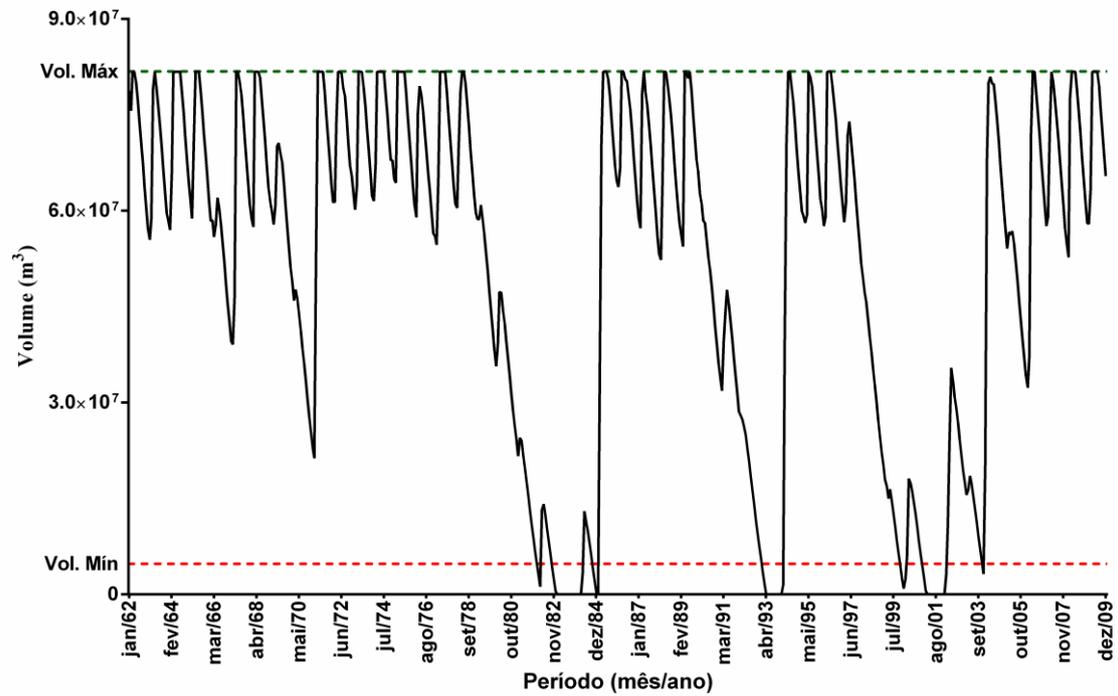


Figura 10: Comportamento volumétrico de Cruzeta para uma garantia de atendimento de 90%

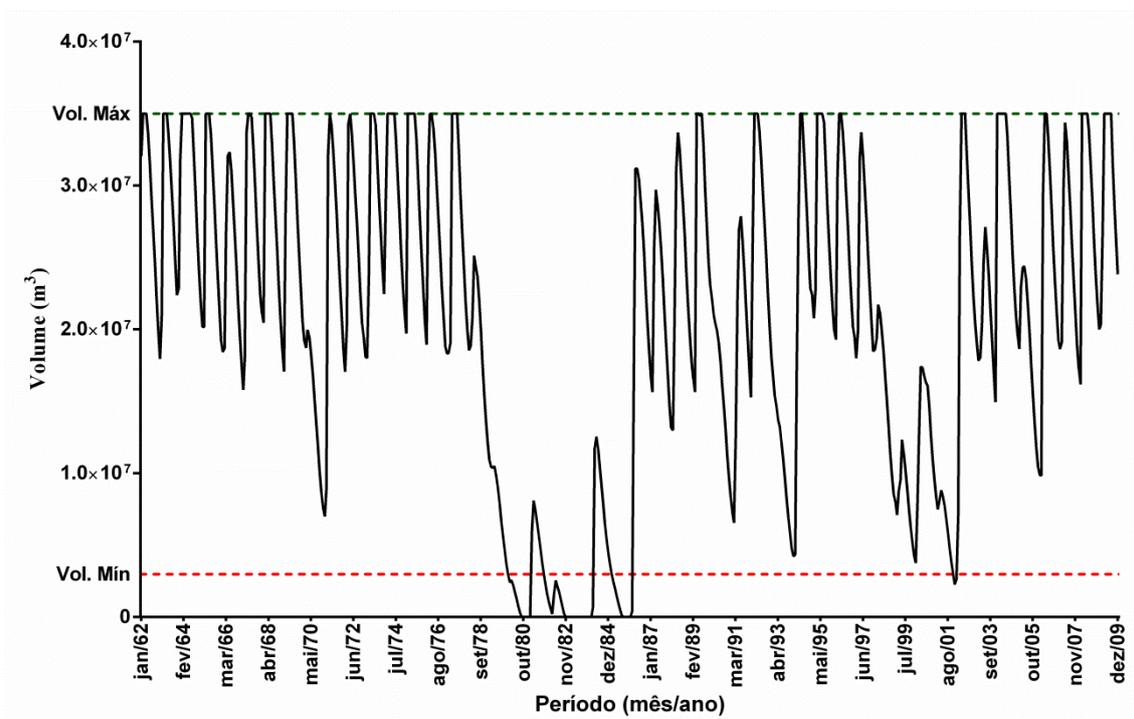
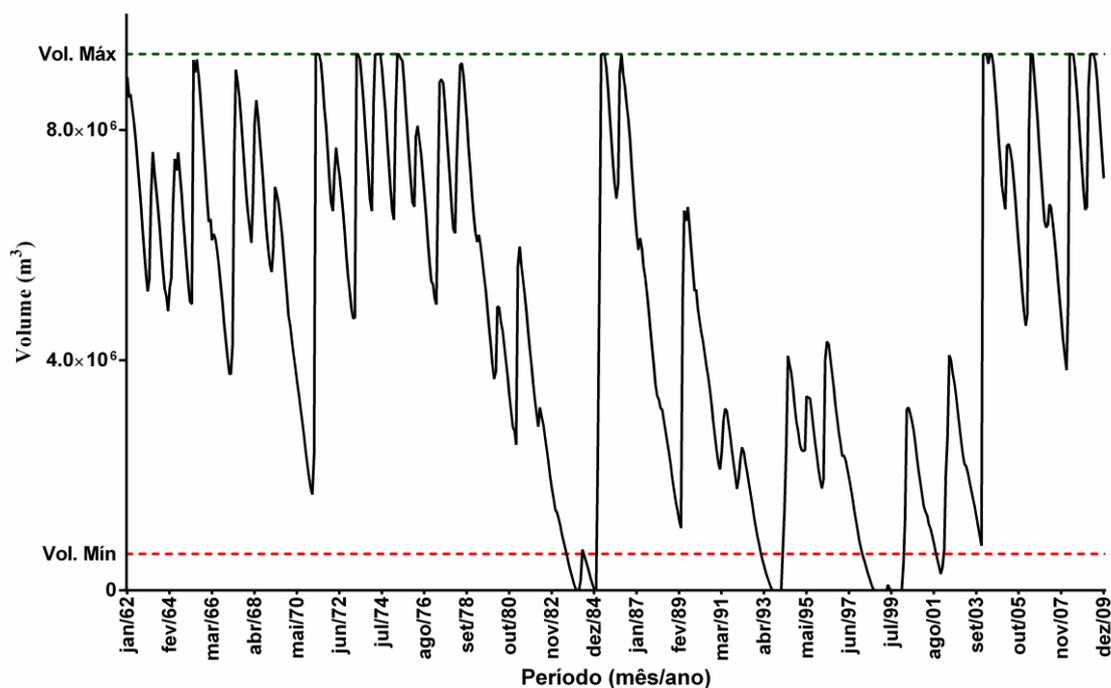


Figura 11: Comportamento volumétrico de Caldeirão de Parelhas para uma garantia de atendimento de 90%



Esta realidade natural do semiárido e os resultados do balanço hídrico obtidos neste Cenário indicam a necessidade de atuar na gestão da demanda, aprimorando-a. Segundo a estimativa das demandas realizada pelo Plano da Bacia do Rio Piancó-Piranhas-Açu (ANA, 2016), foi constatado que mais de 50% da demanda total requerida dos reservatórios estudados são destinadas à irrigação, e que mesmo diante dos recorrentes cenários de escassez hídrica e de secas prolongadas da região, ainda se observa na bacia a ampla utilização de métodos de irrigação caracterizados pela baixa eficiência no uso da água, como a irrigação por gravidade (inundação e sulcos) (ANA, 2016).

Este cenário torna urgente a necessidade na mudança dos padrões de consumo de água condizentes com a realidade da região, haja vista que a contínua diminuição do volume de água dos reservatórios, neste caso provocado também pelo desequilíbrio entre a oferta e a demanda, podem, inclusive, potencializar a eutrofização e a degradação da qualidade da água (Jeppesen *et al.*, 2015; Brasil *et al.*, 2016), comprometendo ainda mais a disponibilidade hídrica para o atendimento dos usos.

Embora a redução da garantia de atendimento também seja uma alternativa possível, esta medida implicaria no aumento do número de falhas, o que poderia comprometer algumas atividades que dependem da periodicidade da disponibilidade hídrica, principalmente os usos prioritários.

3.3. CENÁRIO 2

Para este cenário o parâmetro de qualidade foi considerado, sendo a associação entre quantidade e qualidade realizada através da Equação 9.

Os resultados mostraram que, ao limitar a concentração de fósforo total presente nos reservatórios em 30mg/m^3 , conforme recomendado pela Resolução do CONAMA 357/2005 para corpos de água doce Classe 2, onze dos doze reservatórios apresentaram disponibilidade hídrica igual a zero para uma garantia de atendimento de 90%, ou seja, a vazão passível de ser alocada foi reduzida em praticamente 100% quando comparado ao Cenário 1. A exceção ocorreu na Armando Ribeiro que apresentou disponibilidade para alocação de $0,126\text{ m}^3/\text{s}$, o que corresponde a menos de 1% da demanda atual requerida para este reservatório (Tabela 4).

Diante disso e considerando a necessidade da alocação de água na região, foi admitido que os corpos hídricos pudessem ser enquadrados como corpos de água doce Classe 3, implicando no aumento do limite máximo permissível da concentração de fósforo total nos reservatório, passando a ser de 50 mg/m^3 . Esta condição, entretanto, estaria associada à necessidade do tratamento convencional ou avançado das águas para viabilizar o seu uso para o consumo humano, conforme recomendado pela Resolução do CONAMA 357/2005.

Para esta nova condição, os resultados da simulação e otimização das demandas mostraram que oito dos doze reservatórios analisados apresentaram disponibilidade hídrica para alocação igual a zero. As exceções ocorreram para Esguicho, que apresentou disponibilidade hídrica superior ao requerido atualmente; Armando Ribeiro, que apresentou vazão disponível capaz de atender 71% da demanda requerida; Itans que apresentou vazão disponível suficiente para o atendimento dos usos prioritários (abastecimento humano e dessedentação animal) e; Passagem das Traíras que embora tenha apresentado disponibilidade hídrica para alocação, o valor disponível corresponde a 6% da demanda total requerida, o que não é suficiente sequer para o atendimento dos usos prioritários.

Os resultados da simulação e otimização mostraram ainda que embora a alteração da classificação dos reservatórios de Classe 2 para Classe 3 tenha proporcionado um aumento de quase 1000% na disponibilidade hídrica total dos açudes, passando de 0,126 m³/s para 12,159 m³/s, os valores obtidos ainda representaram uma redução de 60% na disponibilidade hídrica total quando comparado ao Cenário 1.

Tabela 4: Disponibilidade hídrica dos reservatórios considerando quantidade e qualidade para uma garantia de atendimento de 90 %

Reservatórios	Vazão máxima outorgável com 90% de garantia (m ³ /s)			Demanda Requerida estimada pelo Plano da Bacia (m ³ /s)
	Quantidade (Cenário 1)	Quantidade e Qualidade (Classe 2)	Quantidade e Qualidade (Classe 3)	
Armando Ribeiro	27,720	0,126	11,916	16,718
Boqueirão de Parelhas	0,351	0,000	0,000	0,902
Itans	0,630	0,000	0,099	0,795
Mendubim	0,378	0,000	0,000	0,091
Passagem das Traíras	0,945	0,000	0,045	0,752
Marechal Dutra	0,180	0,000	0,000	0,799
Esguicho	0,405	0,000	0,099	0,077
Cruzeta	0,126	0,000	0,000	0,938
Pataxó	0,135	0,000	0,000	0,060
Rio da Pedra	0,000	0,000	0,000	0,147
Caldeirão de Parelhas	0,024	0,000	0,000	0,099
Beldroega	0,045	0,000	0,000	0,088
Total	30,939	0,126	12,159	21,466

Estes valores ratificam que a maioria dos reservatórios da região semiárida encontra-se com a concentração de fósforo acima do limite máximo estabelecido pela legislação vigente e evidenciam o quanto este nutriente pode comprometer o processo de alocação de água para o atendimento dos múltiplos usos na região. Isto porque embora ainda existam vazões disponíveis em termos quantitativos, a retirada de água dos reservatórios nestas condições de qualidade acarretaria no aumento da concentração deste nutriente (Freitas *et al.*, 2011; Costa *et al.*, 2016; Rocha Junior *et al.*, 2018), contribuindo para um cenário cada vez mais crítico em termos de qualidade dos recursos hídricos, aumentando, segundo Moss *et al.*, (2011), a susceptibilidade dos reservatórios à eutrofização.

A presença deste nutriente em excesso é ainda mais indesejada em reservatórios que são utilizados para o abastecimento humano, como é o caso dos reservatórios analisados, com exceção de Mendubim. Isto porque a elevada concentração de nutrientes pode acarretar na floração de cianobactérias que são, em sua grande maioria, bactérias potencialmente produtoras de cianotoxinas, substância que coloca em risco a saúde humana (Jeppensen *et al.*, 2015; Medeiros *et al.*, 2015; Brasil *et al.*, 2016; Costa *et al.*, 2016).

O resultado disto é a má qualidade das águas acumuladas nos reservatórios, o que acaba comprometendo o processo de alocação de água mesmo quando ainda existem volumes disponíveis para serem outorgados, em termos quantitativos, agravando as já escassas fontes de água para consumo humano da região.

Assim, para que seja possível alocar água e garantir o atendimento dos múltiplos usos, torna-se fundamental e imediato o controle da qualidade das águas dos reservatórios, intervindo tanto nas principais fontes antrópicas deste nutriente, que segundo Vasconcelos (2011) e Barbosa (2012) tem sido a disposição inadequada de águas servidas, incluindo esgotos urbanos e industriais não tratados, a agricultura, principalmente pela utilização de fertilizantes ricos em fósforo e seu plantio próximo aos reservatórios, e a pecuária, provocado pelo dejetos dos animais que na sua grande maioria tem livre acesso e tendem a se aglomerar próximo aos corpos d'água; quanto na aplicação das técnicas de imobilização do fósforo no sedimento, impedindo a fertilização interna deste nutriente, ou seja, a sua disponibilidade novamente para coluna d'água (Cooke *et al.*, 2005; Oliveira, 2017).

3.4. CENÁRIO 3

Considerando que grande parte da redução nas vazões passíveis de serem alocadas deveu-se ao fato dos reservatórios analisados apresentarem concentrações de fósforo acima do limite estabelecido pela Resolução do CONAMA 357/2005, mesmo quando os açudes se encontravam com volumes próximos a capacidade de armazenamento máxima dos reservatórios, foram cenarizados situações hipotéticas alterando o parâmetro de qualidade, de modo a aumentar a disponibilidade hídrica dos reservatórios para o atendimento das demandas.

Assim, admitiu-se a hipótese de que os reservatórios apresentariam, para o seu volume máximo, uma concentração de fósforo igual a 10 mg/m^3 , sendo estes valores de concentração alterados a medida que o volume de água armazenada nos reservatórios é reduzido (Equação 10).

Os resultados mostraram que, mesmo neste cenário hipotético, ao considerar a concentração de fósforo máxima permissível dos reservatórios igual a 30 mg/m^3 , apenas quatro dos doze reservatórios apresentaram disponibilidade hídrica diferente de zero (Tabela 5). Dentre eles, Esguicho que apresentou vazão disponível superior à demanda total requerida para o atendimento dos múltiplos usos; Armando Ribeiro que apresentou disponibilidade hídrica capaz de atender 97% da demanda total e; Itans e Passagem das Traíras que embora não tenham apresentado disponibilidade hídrica suficiente para o atendimento total das demandas, conseguiram atender os usos prioritários e parcialmente os demais.

Por outro lado, ao considerar os reservatórios como corpos de água doce Classe 3, o resultado da simulação e otimização das demandas mostrou que além dos quatro reservatórios que já apresentavam disponibilidade hídrica quando considerado o reservatório como Classe 2, Boqueirão de Parelhas e Mendubim passaram a apresentar vazões disponíveis para atendimento dos usos, totalizando seis reservatórios com disponibilidade hídrica diferente de zero. Dentre estes reservatórios, apenas Armando Ribeiro, Mendubim e Esguicho conseguiram atender a demanda total requerida; Itans e Passagem das Traíras atenderam os usos prioritários e parcialmente os demais, enquanto que Boqueirão de Parelhas só conseguiu atender 4% da demanda total requerida, o que não corresponde sequer ao atendimento dos usos prioritários.

Assim, embora a alteração da classificação dos reservatórios de Classe 2 para Classe 3, segundo os resultados da simulação e otimização, tenha proporcionado um aumento de quase 33% na disponibilidade hídrica total dos açudes, os valores obtidos para este cenário ainda representaram uma redução de praticamente 30% na disponibilidade hídrica total quando comparado ao Cenário 1.

Dentre os reservatórios analisados, Marechal Dutra, Cruzeta, Pataxó, Rio da Pedra, Caldeirão de Parelhas e Beldroega são os mais críticos em termos de concentração de fósforo, tendo em vista a disponibilidade hídrica igual a zero mesmo para a situação hipotética e considerando o corpo como Classe 3.

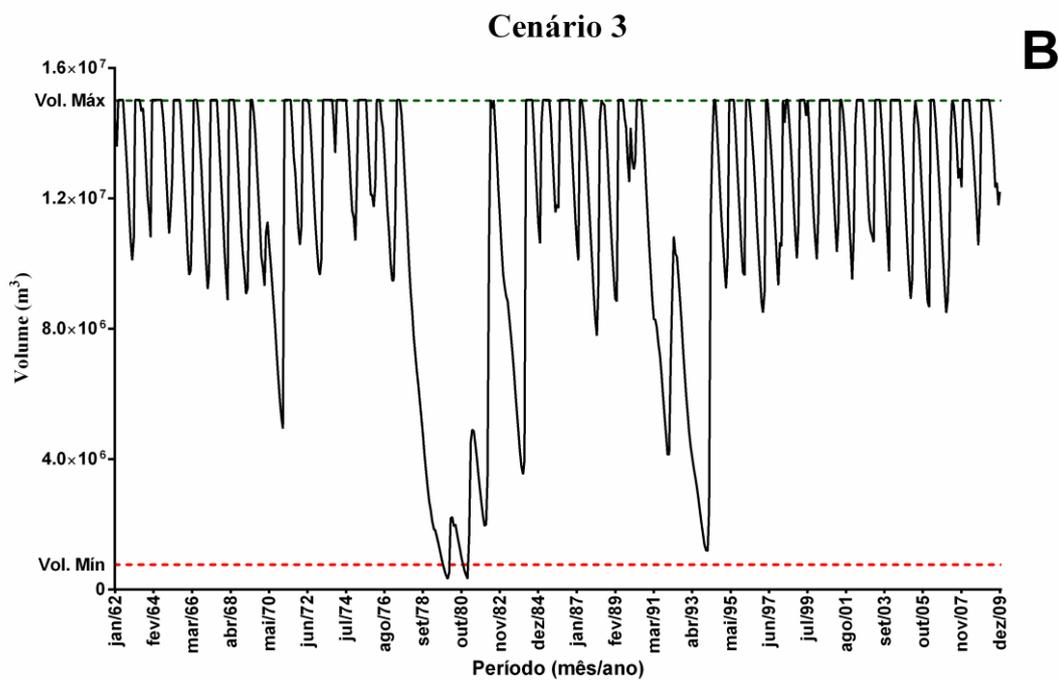
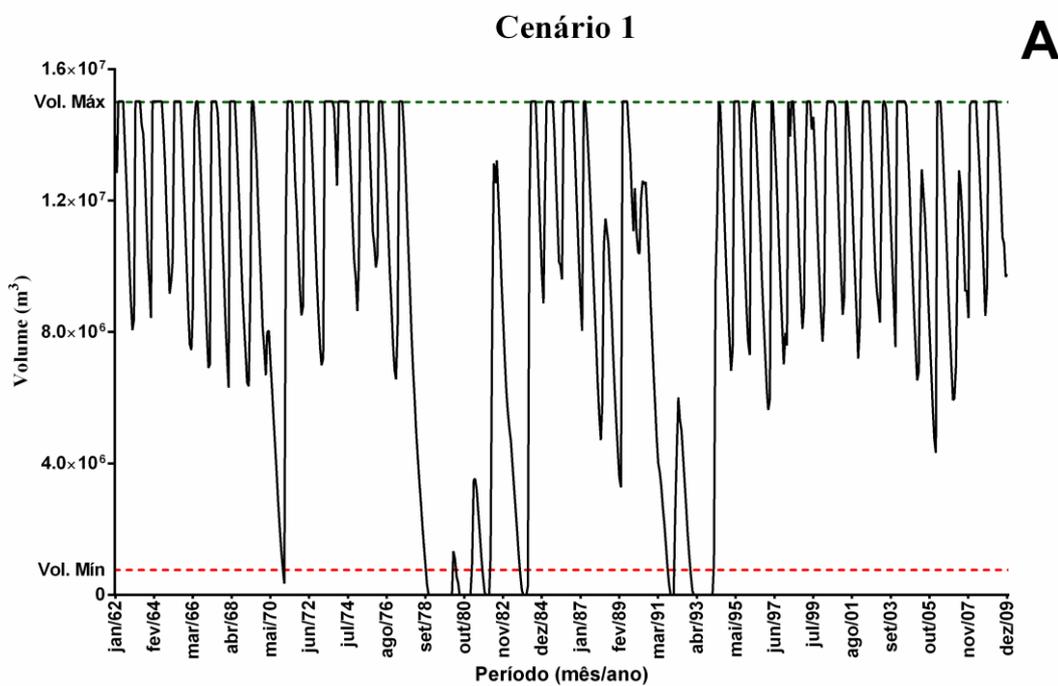
Tabela 5: Disponibilidade hídrica dos reservatórios considerando quantidade e qualidade para uma garantia de atendimento de 90 % (Cenário hipotético)

Reservatórios	Vazão máxima outorgável com 90% de garantia (m ³ /s)			Demanda Requerida estimada pelo Plano da Bacia (m ³ /s)
	Quantidade (Cenário 1)	Quantidade e Qualidade (Classe 2)	Quantidade e Qualidade (Classe 3)	
Armando Ribeiro	27,720	16,164	20,925	16,718
Boqueirão de Parelhas	0,351	0,000	0,036	0,902
Itans	0,630	0,216	0,396	0,795
Mendubim	0,378	0,000	0,135	0,091
Passagem das Traíras	0,945	0,234	0,477	0,752
Marechal Dutra	0,180	0,000	0,000	0,799
Esguicho	0,405	0,162	0,252	0,077
Cruzeta	0,126	0,000	0,000	0,938
Pataxó	0,135	0,000	0,000	0,060
Rio da Pedra	0,000	0,000	0,000	0,147
Caldeirão de Parelhas	0,024	0,000	0,000	0,099
Beldroega	0,045	0,000	0,000	0,088
Total	30,939	16,776	22,221	21,466

Os resultados deste cenário nos permitem afirmar ainda que a concentração de fósforo teve maior efeito no processo de alocação de água do reservatório Pataxó, tendo em vista que a princípio, quando considerado apenas o aspecto quantitativo dos recursos hídricos (Cenário 1), este açude apresentava vazões alocáveis superiores à demanda total requerida e agora mostrou-se com disponibilidade hídrica igual a zero.

Analisando o comportamento volumétrico deste reservatório após as simulações, foi possível visualizar que para que o parâmetro de qualidade seja atendido este reservatório precisa se manter com altos níveis de volume de água (Figura 12). Contudo, as características naturais da região já tornam esta condição praticamente impossível, o que acaba resultando em uma disponibilidade hídrica para alocação igual a zero (90% de garantia), haja vista que a água presente no reservatório não tem sido suficiente sequer para diluir a concentração de fósforo presente no açude.

Figura 12: Comportamento volumétrico do reservatório Pataxó quando considerado no processo de alocação apenas o aspecto quantitativo (A) e quando considerado os aspectos quantitativos e qualitativos dos recursos hídricos (B).



3.5. CENÁRIO 4

Na tentativa de verificar o quanto a disponibilidade hídrica aumentaria caso a concentração de fósforo total nas águas dos reservatórios fosse ainda menor, foi considerada uma nova hipótese. Desta vez foi admitido que os reservatórios apresentariam, para o seu volume máximo, uma concentração de fósforo igual a 5 mg/m³, sendo estes valores de concentração alterados a medida que o volume de água armazenada nos reservatórios é reduzido (Equação 11).

Os resultados da simulação e otimização, considerando os reservatórios como corpos de água doce Classe 2, mostraram que oito dos doze reservatórios estudados apresentaram vazões diferentes de zero (Tabela 6). Embora o número de reservatórios com disponibilidade hídrica para alocação tenha duplicado, quando comparado ao cenário anterior para a mesma Classe, 75% dos açudes estudados ainda não são capazes de atender a demanda total requerida com uma garantia de 90%. Além disso, os valores mostraram que houve uma redução de 20% na disponibilidade hídrica total quando comparado com o Cenário 1, evidenciando que mesmo para este cenário hipotético a concentração de fósforo ainda influenciou no processo de alocação de água.

De acordo com os resultados obtidos, além dos quatro reservatórios que já apresentavam vazões disponíveis no cenário anterior, Mendubim passou a apresentar valores outorgáveis de aproximadamente 2,2 vezes superior ao requerido; Boqueirão de Parelhas passou a atender 12% da demanda requerida, vazão esta que garante, com folga, o atendimento da demanda destinada ao abastecimento humano e; Pataxó e Marechal Dutra, que embora tenham apresentado possibilidade de alocação, o valor disponível não é suficiente para atender sequer a demanda requerida para o abastecimento humano.

Por outro lado, observou-se que os reservatórios Cruzeta, Rio da Pedra, Caldeirão de Parelhas e Beldroega foram os mais comprometidos no processo de alocação de água, apresentando disponibilidade hídrica igual a zero mesmo para este cenário hipotético. Dentre os açudes analisados, estes são os reservatórios de menor capacidade de armazenamento (Tabela 1) e segundo os resultados obtidos no Cenário 1 (Tabela 3) em todos eles o valor da demanda requerida é superior à vazão máxima passível de ser outorgada. Assim, estes resultados nos permitem afirmar que o desequilíbrio entre a oferta e a demanda de água, principalmente em reservatórios com baixa capacidade de armazenamento, faz com que os açudes permaneçam na maior

parte do tempo com baixos volumes de água, o que contribui para o aumento da concentração de nutrientes nos reservatórios e conseqüentemente para degradação da qualidade das águas, comprometendo, desta forma, o processo de alocação.

Tabela 6: Percentual da demanda atendida por reservatório considerando quantidade e qualidade para uma garantia de atendimento de 90% (Cenário hipotético)

Reservatórios	Vazão máxima outorgável com 90% de garantia (m ³ /s)		Percentual da demanda atendida
	Quantidade (Cenário 1)	Quantidade e Qualidade (Classe 2)	
Armando Ribeiro	27,720	23,211	100% *
Boqueirão de Parelhas	0,351	0,108	12%
Itans	0,630	0,450	57%
Mendubim	0,378	0,198	100% *
Passagem das Traíras	0,945	0,576	77%
Marechal Dutra	0,180	0,027	3%
Esguicho	0,405	0,288	100% *
Cruzeta	0,126	0,000	0%
Pataxó	0,135	0,027	45%
Rio da Pedra	0,000	0,000	0%
Caldeirão de Parelhas	0,024	0,000	0%
Beldroega	0,045	0,000	0%

*Atendeu a demanda total requerida com folga

Ao aplicar a metodologia considerando os reservatórios como corpos de água doce Classe 3, foi verificado que, com exceção de Boqueirão de Parelhas e Passagem das Traíras, todos os demais reservatórios apresentaram disponibilidade hídrica equivalente aos valores do Cenário 1, no qual foi considerado apenas o aspecto quantitativo (Tabela 7). Isto significa que caso a hipótese deste cenário fosse verdadeira, o aspecto qualitativo não iria comprometer o processo de alocação de água, sendo necessário apenas o tratamento convencional ou avançado das águas para viabilizar o seu uso para o consumo humano, conforme recomendado pela Resolução do CONAMA 357/2005.

Alcançar este cenário em termos de concentração de fósforo frente a realidade verificada nos reservatórios analisados, todavia, se constitui em um grande desafio para os gestores. Contudo, o gerenciamento da bacia hidrográfica, dando ao solo o uso mais

adequado e controlando as principais fontes antrópicas de fósforo; dos recursos hídricos, garantindo o equilíbrio entre a oferta e a demanda e; do passivo ambiental existente nos reservatórios, através das técnicas de imobilização do fósforo no sedimento, se constituem nas alternativas mais eficazes para a redução das emissões/concentrações de fósforo nos reservatórios.

Tabela 7: Disponibilidade hídrica dos reservatórios considerando quantidade e qualidade (Classe 3) para uma garantia de atendimento de 90%

Reservatórios	Vazão máxima outorgável com 90% de garantia (m ³ /s)			Percentual da demanda atendida
	Quantidade (Cenário 1)	Quantidade e Qualidade (Classe 2)	Quantidade e Qualidade (Classe 3)	
Armando Ribeiro	27,720	23,211	27,720	100% *
Boqueirão de Parelhas	0,351	0,108	0,297	33%
Itans	0,630	0,450	0,630	79%
Mendubim	0,378	0,198	0,378	100% *
Passagem das Traíras	0,945	0,576	0,891	100% *
Marechal Dutra	0,180	0,027	0,180	23%
Esguicho	0,405	0,288	0,405	100% *
Cruzeta	0,126	0,000	0,126	13%
Pataxó	0,135	0,027	0,135	100% *
Rio da Pedra	0,000	0,000	0,000	0%
Caldeirão de Parelhas	0,024	0,000	0,024	24%
Beldroega	0,045	0,000	0,045	51%
Total	30,939	24,885	30,831	

*Atendeu a demanda total requerida com folga

Ressalta-se, entretanto, que mesmo neste cenário, apenas 40% dos reservatórios estudados da região semiárida são capazes de atender os múltiplos usos requeridos em sua totalidade com uma garantia de 90%.

Os maiores déficits no atendimento continuaram sendo nos reservatórios de Cruzeta e Marechal Dutra, o que nos permite afirmar que embora a concentração de fósforo nestes reservatórios pese no processo de alocação de água (Cenário 2), a má gestão dos recursos hídricos, evidenciada pelo desequilíbrio entre a oferta e a demanda de água, conforme destacado no Cenário 1, contribui para o frequente cenário de escassez dos reservatórios da região.

4. CONCLUSÕES

- O resultado da análise estatística mostrou que a porcentagem do volume armazenado é um potencial indicador para estimar as concentrações de fósforo total presentes nos reservatórios, o que valida a metodologia proposta.
- A alteração da garantia de atendimento de 100 para 90% no processo de alocação de água implicou no aumento de 70% na disponibilidade hídrica total dos reservatórios, quando considerado apenas o aspecto quantitativo.
- Quando considerado apenas o aspecto quantitativo, sem nenhuma limitação em termos de qualidade, foi constatado que das garantias analisadas, apenas a de 90% é capaz de proporcionar o atendimento dos múltiplos usos. Ainda assim a maioria dos reservatórios analisados, aproximadamente 60%, não consegue atender a demanda total requerida, deixando claro o real déficit hídrico da região.
- A inserção do aspecto qualitativo no processo de alocação de água reduziu a disponibilidade hídrica dos reservatórios em 100%, quando considerado o reservatório como corpo de água doce Classe 2 e 60%, quando considerado o reservatório como corpo de água doce Classe 3, evidenciando a má qualidade das águas dos reservatórios analisados e o quanto o aspecto qualitativo pode comprometer o processo de alocação de água.
- Caso a concentração de fósforo presente nas águas dos reservatórios analisados seja inferior a 5 mg/m^3 , quando os açudes estiverem em sua capacidade de armazenamento máxima, o processo de alocação de água não será comprometido pela concentração deste nutriente.
- O desequilíbrio entre a oferta e a demanda de água, principalmente em reservatórios com baixa capacidade de armazenamento, contribui para a deterioração da qualidade dos recursos hídricos.
- A baixa disponibilidade hídrica dos reservatórios dado as características naturais da região semiárida, o desequilíbrio verificado entre a oferta e a demanda de água e a má qualidade dessas águas torna urgente a necessidade do aprimoramento da gestão das demandas e de controle das principais fontes externas e internas de fósforo aos reservatórios da região.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional De Águas (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos**: informe 2014. Brasília: ANA, 2015.
- Agência Nacional de Águas (ANA). **Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Piancó Piranhas-Açu**. Resumo Executivo. ANA, 2016
- Agência Nacional de Águas (ANA). **Reservatórios do Semiárido Brasileiro: Hidrologia, Balanço Hídrico e Operação**. Relatório síntese. Brasília: ANA, 2017.
- Barbosa, J.E.L., Medeiros, E.S.F., Brasil, J., Cordeiro, R.S., Crispim, M.C.B. and Silva, G.H.G. (2012). **Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology and management**. Acta Limnologica Brasiliensia, 24(1), 103-118.
- Brasil, J., Attayde, J.L., Vasconcelos, F.R., Dantas, D.D.F., Huszar, V.L.M. (2016). **Drought-induced water-level reduction favors cyanobacteria blooms in tropical shallow lakes**. Hydrobiologia, 770(1), 145-164.
- BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução nº 16 de 08 de maio de 2001. **Estabelece critérios gerais para a outorga de direito de uso de recursos hídricos**. Disponível em: <http://www.cnrh.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=14> Acesso em: 03 out. 2016.
- BRASIL. Lei nº 9. 433 de 08 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 9 jan. 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/19433.htm> Acesso em: 03 out. 2016.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. **Resolução CONAMA nº 357/2005**, de 18 de março de 2005 – In: Resoluções, 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>> Acesso em: 19. fev. 2018.
- Bravo, J.M., Collischonn, W., Tucci, C.E.M., 2008. **Otimização de Regras de Operação de Reservatórios com Incorporação da Previsão de Vazão**. Rev. Bras. Recur. Hídricos 13, 181–196.
- Cardoso, W.G.J., Zinato, C.E., Alves, R.F.F., Castro, F.J. de, Santos, W.G., 2016. **Metodologia para alocação de água em sistemas hídricos**. XIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste 1–10.
- Carpenter, S.R. (2008) **Phosphorus control is critical to mitigating eutrophication**. Proc. Natl. Acad. Sci, v.105, n.32, p.11039-11040.
- Chaves, P., Tsukatani, T., Kojiri, T. (2004). **Operation of storage reservoir for water quality by using optimization and artificial intelligence techniques**. Math. Comput. Simul. 67, 419–432.

Cooke, G. D., Welch E. B., Peterson S. A. e Nichols, S. A. (2005). **Restoration and Management of Lakes and Reservoirs**. 3ª Ed. Boca Raton, Flórida: CRC Press, 613 p.

Costa, I.A.S.; Azevedo, S.M.F.O.; Senna, P.A.; Bernardo, R.R.; Costa, S.M.; Chellappa, N.T. (2006). **Occurrence of toxin-producing cyanobacterial blooms in a Brazilian semiarid reservoir**. *Brazilian Journal of Biology*, 66 (1B): 211-219.

Costa, I. A. S. da, Cunha, S. R. de S., Panosso, R., Araújo, M. F. F., Melo, J. L. de S., & Eskinazi-Sant'Anna, E. M. (2009). **Dinâmica de cianobactérias em reservatórios eutróficos do semi-árido do Rio Grande do Norte**. *Oecologia Brasiliensis*, 13(2), 382–401.

Costa, M.R.A., Attayde, J.L., Becker, V. (2016). **Effects of water level reduction on the dynamics of phytoplankton functional groups in tropical semi-arid shallow lakes**. *Hydrobiologia* 75–89.

Davidsen, C., Liu, S., Mo, X., Holm, P.E., Trapp, S., Rosbjerg, D., Bauer-Gottwein, P. (2015). **Hydroeconomic optimization of reservoir management under downstream water quality constraints**. *J. Hydrol.* 529, 1679–1689.

Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN). **Monitoramento pluviométrico**. Disponível em: <<http://187.60.73.143:8181/monitoramento/monitoramento.php>> Acesso em: 22. fev. 2018.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). **Estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman- Monteith**. Disponível em: <http://www.fao.org/nr/climpag/pub/en1102_en.asp>. Acesso em: 30. nov. 2017.

Freitas, F.R.S., Righetto, A.M., Attayde, J.L., (2011). **Cargas de fósforo total e material em suspensão em um reservatório do semi-árido Brasileiro**. *Oecologia Aust.* 15, 655–665.

Instituto de Gestão das Águas do Estado do Rio Grande do Norte (IGARN). **Situação Volumétrica dos Reservatórios do RN**. Disponível em: <<http://sistemas.searh.rn.gov.br/MonitoramentoVolumetrico/>>. Acesso em: 30. nov. 2017.

Jeppesen, E., Brucet, S., Naselli-Flores, L., Papastergiadou, E., Stefanidis, K., Nøges, T., Nøges, P., Attayde, J.L., Zohary, T., Coppens, J., Bucak, T., Menezes, R.F., Freitas, F.R.S., Kernan, M., Søndergaard, M., Beklioglu, M. (2015). **Ecological impacts of global warming and water abstraction on lakes and reservoirs due to changes in water level and related changes in salinity**. *Hydrobiologia*, 750(1), 201-227.

Karamouz, M., Asce, F. & Kerachian, R. (2004). **Optimal Operation of Reservoir Systems Considering the Water Quality: Application of Stochastic Sequential Genetic Algorithms**. , pp.1–10.

- Karamouz, M., Moridi, A., Fayyazi, H.M. (2008). **Dealing with Conflict over Water Quality and Quantity Allocation : A Case Study.** Sci. Iran. 15, 34–49.
- Kerachian, R., Karamouz, M. (2007). **A stochastic conflict resolution model for water quality management in reservoir-river systems.** Adv. Water Resour. 30, 866–882.
- Lopes, A.V., Freitas, M.A. de S. (2007). **A alocação de água como instrumento de gestão de recursos hídricos : experiências brasileiras.** Rega 4, 5–28.
- Machado, É.C.M.N., Galvão, C. de O., Souza Filho, F. de A. (2012). **Alocação Quali-quantitativa de Águas em Bacias Hidrográficas: Metodologia Multiobjetivo Inserida no Contexto da Gestão dos Recursos Hídricos.** Rev. Bras. Recur. Hídricos 17, 213–227.
- Medeiros, L. D. C., Mattos, A., Lürling, M., & Becker, V. (2015). **Is the future blue-green or brown? The effects of extreme events on phytoplankton dynamics in a semi-arid man-made lake.** Aquatic Ecology, 49(3), 293–307.
- Moss, B., Kosten, S., Meerhoff, M., Battarbee, R.W., Jeppesen, E., Mazzeo, N., Havens, K., Lacerot, G., Liu, Z., Meester, L., Paerl, H., Scheffer, M. (2011). **Allied attack: climate change and eutrophication.** Inland Waters, 1(2), 101-105.
- Nunes, T.H.C., Galvão, C. de O., Rêgo, J.C., 2016. **Rule curve for seasonal increasing of water concessions in reservoirs with low regularized discharges.** Rev. Bras. Recur. Hídricos 21, 493–501.
- Oliveira, J.N.P. (2017). **Aplicação da geoengenharia como ferramenta para controle de florações de algas e da fertilização interna de fósforo em um ecossistema aquático eutrofizado.** Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais.
- Padisák, J. **Cylindrospermopsis raciborskii (Woloszynska) Seenayya et Subba Raja, an expending highly adaptative cyanobacterium: worldwide distribution and review of its ecology.** Arch für Hydrobiology, v.107, p.563-593, 1997.
- Programa Água Azul. **Rede compartilhada de monitoramento da qualidade da água: Monitoramento da qualidade das águas superficiais.** Disponível em: <http://programaaguaazul.ct.ufrn.br/relatorios/aguas_superficiais/> Acesso em: 7. jan. 2018.
- Ribeiro M. M. R. (2000). **Alternativas para a outorga e a cobrança pelo uso da água: simulação de um caso.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Porto Alegre – RS, 200p.
- Rocha Junior, C.A.N., Costa, M.R.A., Menezes, R.F., Attayde, J.L., Becker, V., (2018). **Water volume reduction increases eutrophication risk in tropical semi-arid reservoirs.** Acta Limnol. Bras. 30.
- Santos, J.A.D.S., Celeste, A.B., 2016. **Curvas-Guia Operacionais de Reservatório**

Sergipano Derivadas por Otimização Estocástica Implícita e Regressão Não Linear. *Scientia cum Industria.* 4, 32–37.

Secretaria de Estado dos Recursos Hídricos (SERHID). **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte – PERH/RN.** Relatório Síntese. Rio Grande do Norte: SERHID, 1998.

Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte (SEMARH/RN). **Ficha técnica dos reservatórios.** Disponível em: <<http://sistemas.searh.rn.gov.br/monitoramentovolumetrico>> Acesso em: 24. fev. 2018.

Sharpley, A.N.; Chapra, S.C.; Wedepohl, R.; Sims, J.T; Daniel, T.C.; Reddy, K.R, 1994. **Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: issues and options.** *Journal of Environmental Quality* 23: 437-451

Schindler, D.W., Hecky, R.E., Findlay, D.L., Stainton, M.P., Parker, B.R., Paterson, M.J., Beaty, K.G., Lyng, M. e Kasian, S.E.M. (2008). **Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of a 37-year whole-ecosystem experiment.** *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A*, v.105, n.32, p.11254-11258.

Studart, T.M. de C., Campos, J.N.B. (2001). **Incertezas nas Estimativas da Vazão Regularizada por um Reservatório.** *Rev. Bras. Recur. Hídricos* 6, 81–94.

Vasconcelos, V.H.F. (2011). **Emissões naturais e antrópicas de nitrogênio e fósforo para os principais açudes da bacia hidrográfica do rio Seridó, RN.** Dissertação (Mestrado em Ecologia) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Wurbs, R. A. (1996). **Modeling and analysis of reservoir system operations.** Prentice-Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey, 356 p.