



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

MAURÍCIO DE GOIS GOMES

DEFINIÇÃO DE REGRA DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS NA REGIÃO
SEMIÁRIDA EM SITUAÇÕES DE ESCASSEZ HÍDRICA E EUTROFIZAÇÃO

Natal-RN
2020

MAURÍCIO DE GOIS GOMES

**DEFINIÇÃO DE REGRA DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS NA REGIÃO
SEMIÁRIDA EM SITUAÇÕES DE ESCASSEZ HÍDRICA E EUTROFIZAÇÃO**

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

Orientador(a): Prof^a. Dr^a. Joana D'arc Freire de Medeiros

Natal-RN
2020

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

Gomes, Maurício de Gois.

Definição de regra de operação de reservatórios na região semiárida em situações de escassez hídrica e eutrofização / Maurício de Gois Gomes. - 2020.

93 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Natal, RN, 2020.

Orientadora: Profa. Dra. Joana D'arc Freire de Medeiros.

1. Operação de reservatórios - Dissertação. 2. Escassez hídrica - Dissertação. 3. Qualidade da água - Dissertação. 4. Eutrofização - Dissertação. 5. Otimização - Dissertação. I. Medeiros, Joana D'arc Freire de. II. Título.

RN/UF/BCZM

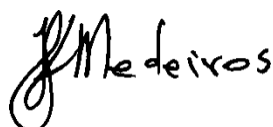
CDU 628.13

MAURÍCIO DE GOIS GOMES

**DEFINIÇÃO DE REGRA DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS NA
REGIÃO SEMIÁRIDA EM SITUAÇÕES DE ESCASSEZ HÍDRICA E
EUTROFIZAÇÃO**

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

BANCA EXAMINADORA



Prof.^a Dr.^a Joana Darc Freire de Medeiros – Orientador(a) (UFRN)



Prof.^a Dr.^a Adelenia Gonçalves Maia – Examinadora Interna (UFRN)



Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão – Examinador Externo (UFCG)

Natal, 08 de junho de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me conduzido nessa trajetória com proteção, colocando à minha frente as pessoas certas para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha orientadora, Prof^a Joana D’Arc Freire de Medeiros, por confiar na minha dedicação e propor as instruções e correções adequadas. Agradeço a ela também pela atenção e prioridade dada ao meu trabalho sempre que precisei de ajuda.

À Prof^a Adelena Maia por disponibilizar acesso aos computadores da sua sala, contribuindo com o desenvolvimento deste trabalho, bem como pela sua disposição a colaborar sempre que necessário.

À minha família, por ter sido minha raiz nessa etapa, sempre me fornecendo os nutrientes necessários e me sustentando para alcançar meus objetivos. Agradeço também pelas suas visitas, que me alegravam ao me fazer sentir novamente em casa.

À minha namorada, Rayanne Tojal, agradeço todos os momentos ao seu lado, aliviando minhas tensões e ouvindo meus aborrecimentos, bem como, me motivando a concluir este trabalho da melhor maneira possível. Agradeço também a família dela por me acolher sempre com carinho.

À CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

Por fim, agradeço aos meus familiares e amigos que direta ou indiretamente contribuíram no meu bem-estar durante esses dois anos de mestrado e torceram para que sua conclusão se realizasse com sucesso.

A todos vocês meu muito obrigado!

RESUMO

O aumento das demandas de água associado a degradação da qualidade de água pode implicar conflitos entre usuários, principalmente, nas regiões semiáridas por causa da redução de vazão em longos períodos de estiagem. Para minimizar os danos, a operação estratégica de reservatórios é uma importante ferramenta que permite alocar satisfatoriamente a água disponível entre os usuários. O método Curva Guia baseado em Zonas tem sido utilizado na operação de reservatórios e consiste em racionar os usos de água em função do nível de armazenamento de água no reservatório e, assim, preservar um volume de água para atender as demandas em uma estiagem futura. No entanto, é necessário analisar também a qualidade, visto que a eutrofização em reservatórios é um fator que limita os usos e disponibilidades da água. Com isso, esse trabalho tem o objetivo de otimizar a regra de operação de seis reservatórios da Bacia Piancó-Piranhas-Açu, localizada na região semiárida do Brasil, por meio de simulações de quantidade e qualidade, com o propósito de encontrar o atendimento satisfatório aos usuários e reduzir a escassez hídrica e eutrofização nos reservatórios. Na otimização, o Algoritmo Genético Multiobjetivo, NSGA-II, foi utilizado para verificar em cada reservatório quais são os limites ideais das zonas e seus coeficientes de racionamento. Desta forma, cenários com diferentes garantias para atendimento das demandas prioritárias (abastecimento humano e dessedentação de animais) foram simulados e otimizados. Os resultados mostram que otimizar as regras de operação considerando somente quantidade não atende aos critérios de qualidade para abastecimento na maioria dos reservatórios. No entanto, considerando a qualidade na otimização, o abastecimento dos usuários prioritários nas garantias desejadas depende das concentrações de fósforo na água dos reservatórios. Sendo possível em alguns cenários atender aos critérios de qualidade somente racionando as demandas não prioritárias. Porém, quando as concentrações são elevadas, esse racionamento pode ser inviável além de causar maiores perdas por evaporação e vertimento. Com isso, somente é possível atender aos aspectos qualitativos dos usuários sem causar perdas significativas se as concentrações de fósforo nos reservatórios forem reduzidas, logo, além do aumento dos volumes acumulados no reservatório é necessário executar ações que amenizem as entradas de nutrientes nos reservatórios.

Palavras-chave: operação de reservatórios; otimização; qualidade.

ABSTRACT

The increase in water deficits and water with improper qualities in the reservoirs may imply conflicts between users, mainly in semi-arid regions because of the reduction in flows during periods of drought. To minimize damage, the strategic operation of reservoirs is an important tool that allows for a satisfactory allocation of available water among users. The Zone-based Guide Curve method was used to optimize the operating rules, the purpose of which is to ration the water uses according to the level of water storage in the reservoir and, thus, preserve a volume of water to meet the demands in a drought future. However, it is also necessary to analyze the quality, since eutrophication in the reservoirs is a factor that limits the uses and availability of water. Thus, this work aims to optimize the operating rule of six reservoirs in the Piancó Piranhas-Açu Basin, located in the semiarid region of Brazil, through simulations of quantity and quality, with the objective of finding satisfactory service to users and reduce water scarcity and eutrophication in reservoirs. In the optimization of the rules, the Multiobjective Genetic Algorithm, NSGA-II, was used to verify in each reservoir what are the ideal limits of zones and its optimized relationship coefficients. In this way, scenarios with different guarantees for meeting priority demands (human supply and animal feed) were simulated and optimized. The results show that optimizing the operating rules considering only quantity does not comply with the quality criteria for supply in most reservoirs. However, considering the quality in the optimization, the supply of priority users in the desired guarantees depends on the concentrations of phosphorus in the water of the reservoirs. It is possible in some scenarios to meet the quality criteria only by rationalizing non-priority demands. However, when concentrations are high, this rationing may be impracticable in addition to causing greater losses through evaporation and pouring. Thereby, it is only possible to comply with the qualitative aspects of the users without causing significant losses if the phosphorus concentrations in the reservoirs are low, therefore, in addition to the increase in the accumulated volumes in the reservoir, it is necessary to carry out actions that mitigate the nutrient inflows in the reservoirs.

Keywords: reservoir operation; optimization; quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área de estudo	17
Figura 2 - Variação Volumétrica do reservatório Eng. Armando R. Gonçalves.....	18
Figura 3- Concentrações de fósforo nos reservatórios do estudo.....	20
Figura 4 - Exemplos de zonas com fases de racionamento	21
Figura 5 - Fluxograma das Etapas Metodológicas	22
Figura 6 - Desempenho das Funções Objetivo para diferentes gerações.	31
Figura 7 - Frequência de tempo da posição do nível de água em Cruzeta para os períodos úmidos e secos resultantes das otimizações das aplicações de FO1 e FO2: (a) 1ª situação; (b) 2ª situação; (c) 3ª situação; e (d) 4ª situação	33
Figura 8 - Porcentagem do tempo que D1 (à esquerda) e D2 (à direita) receberam a vazão total, parcial e nula no Cenário 1 nos reservatórios: (a) Boqueirão de Parelhas; (b) Cruzeta; (c) Itans e (d) Marechal Dutra.	34
Figura 9 - Valores de V1, V2 e α_{21} otimizados em Boqueirão de Parelhas para o Cenário 2 (a), Cenário 3 (b) e Cenário 4 (c).....	38
Figura 10 - Valores de V1 e V2 e α_{21} otimizados em Cruzeta para o Cenário 2 (a), Cenário 3 (b) e Cenário 4 (c).....	39
Figura 11 - Valores de V1 e V2 e α_{21} otimizados em Itans para o Cenário 2 (a), Cenário 3 (b), Cenário 4 (c).	40
Figura 12 - Valores de V1 e V2 e α_{21} otimizados em Marechal Dutra para o Cenário 3 (a), Cenário 4 (b).	41
Figura 13 - Precipitação anual e atendimentos anuais das demandas para o Cenário 4 em Boqueirão de Parelhas.	44
Figura 14 - Precipitação anual e atendimentos anuais das demandas para o Cenário 4 em Cruzeta.....	45
Figura 15 - Volumes vertidos e evaporados nos reservatórios Boqueirão de Parelhas (a), Cruzeta (b), Itans (c) e Marechal Dutra (d).	46
Figura 16 - Variação do número de falhas em relação às cargas afluentes e fluxos de fósforo para o Cenário 1 em Armando R. Gonçalves (a) e em Passagem de Traíras (b).	48
Figura 17 - Variação do número de falhas em relação às cargas afluentes e fluxos de fósforo para o Cenário 1 (a), Cenário 2 (b), Cenário 3 (c) e Cenário 4 (d) em Boqueirão de Parelhas.	49
Figura 18 - Variação do número de falhas em relação às cargas afluentes e fluxos de fósforo para o Cenário 1 (a), Cenário 2 (b), Cenário 3 (c) e Cenário 4 (d) em Cruzeta.	50
Figura 19 - Variação do número de falhas em relação às cargas afluentes e fluxos de fósforo para o Cenário 1 (a), Cenário 2 (b), Cenário 3 (c) e Cenário 4 (d) em Itans.	50
Figura 20 - Variação do número de falhas em relação às cargas afluentes e fluxos de fósforo para o Cenário 1 (a), Cenário 3 (b) e Cenário 4 (c) em Marechal Dutra.	51
Figura 21 - Valores de V1, V2 e α_{21} otimizados em Boqueirão de Parelhas para o Cenário 2 (a), Cenário 3 (b) e Cenário 4 (c) considerando qualidade em condições favoráveis.....	58
Figura 22 - Valores de V1, V2 e α_{21} otimizados em Cruzeta para o Cenário 2 (a), Cenário 3 (b) e Cenário 4 (c) considerando qualidade em condições favoráveis.....	59

Figura 23 - Valores de V1, V2 e α_{21} otimizados em Itans para o Cenário 2 (a), Cenário 3 (b) e Cenário 4 (c) considerando qualidade em condições favoráveis.	60
Figura 24 - Valores de V1, V2 e α_{21} otimizados em Marechal Dutra para o Cenário 2 (a), Cenário 3 (b) e Cenário 4 (c) considerando qualidade em condições favoráveis. ...	61
Figura 25 - Valores de V1, V2 e α_{21} otimizados em Passagem de Traíras para o Cenário 4 considerando qualidade em condições favoráveis.....	61
Figura 26 - Valores de V1, V2 e α_{21} otimizados em Boqueirão de Parelhas para o Cenário 2 considerando qualidade em condições intermediárias e classificação Classe 3 para o corpo hídrico.	63
Figura 27 - Valores de V1, V2 e α_{21} otimizados em Cruzeta para o Cenário 2 (a) e Cenário 3 (b) considerando qualidade em condições Intermediárias.	63
Figura 28 - Valores de V1, V2 e α_{21} otimizados em Itans para o Cenário 2 (a), Cenário 3 (b) e Cenário 4 (c) considerando qualidade em condições Intermediárias.....	64
Figura 29 - Valores de V1, V2 e α_{21} otimizados em Marechal Dutra para o Cenário 2 considerando qualidade em condições Intermediárias e classificação Classe 3 para o corpo hídrico.....	64
Figura 30 - Variação das concentrações de fósforo nas condições favoráveis (a) e intermediárias (b) com o uso da POP (1) e da Curva Guia Baseada em Zonas otimizada considerando somente quantidade (2) e quantidade e qualidade no Cenário 2 (3) no reservatório Boqueirão de Parelhas.	70
Figura 31 - Variação das concentrações de fósforo nas condições favoráveis (a) e intermediárias (b) com o uso da POP (1) e da Curva Guia Baseada em Zonas otimizada considerando somente quantidade (2) e quantidade e qualidade no Cenário 2 (3) no reservatório Cruzeta.....	71
Figura 32 - Variação das concentrações de fósforo nas condições favoráveis (a) e intermediárias (b) com o uso da POP (1) e da Curva Guia Baseada em Zonas otimizada considerando somente quantidade (2) e quantidade e qualidade no Cenário 2 (3) no reservatório Itans.	72
Figura 33 - Variação das concentrações de fósforo nas condições favoráveis (a) e intermediárias (b) com o uso da POP (1) e da Curva Guia Baseada em Zonas otimizada considerando quantidade e qualidade no Cenário 2 (2) no reservatório Marechal Dutra.	74
Figura 34 - Variação das concentrações de fósforo nas condições favoráveis (a) e intermediárias (b) com o uso da POP (1) e da Curva Guia Baseada em Zonas otimizada considerando quantidade e qualidade no Cenário 4 (2) no reservatório Passagem de Traíras.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características Gerais dos Reservatórios	17
Tabela 2 - Demandas dos usos nos reservatórios	19
Tabela 3 - Nomenclatura dos coeficientes de racionamento nas diferentes zonas.	22
Tabela 4 - Fluxos do fósforo no reservatório obtidos por Oliveira (2019).	25
Tabela 5 - Comparação das cargas adotadas de P afluentes mínimas, médias e máximas (kg.mes ⁻¹) com as observadas na literatura provenientes de diferentes fontes.	26
Tabela 6 - Dados adotados de concentração inicial (Co) nos reservatórios.	27
Tabela 7 - Déficits hídricos do reservatório Cruzeta para as diferentes aplicações de FO1 e FO2.	32
Tabela 8 - Vazões Regularizadas para garantias de 90%, 95% e 100% no atendimento das demandas.	34
Tabela 9 - Déficits Hídricos no atendimento as demandas não prioritárias (D2) no período total de simulação (T), no período úmido (U) e no período seco (S).	35
Tabela 10 - Frequência do tempo em que as vazões fornecidas (QF) a D1 e D2 são superiores à vazão regularizada (QR) para o período total (T), úmido (U) e seco (S)...	36
Tabela 11 – Intervalos sem atendimentos e número de falhas para D1 e D2 considerando somente quantidade na otimização das regras de operação.	43
Tabela 12 - Variáveis adotadas no balanço de massa do fósforo para situação favorável, intermediária e desfavorável.	54
Tabela 13 - Déficits Hídricos dos atendimentos a D2 no período total de simulação (T), no período úmido (U) e no período seco (S) considerando qualidade na otimização das regras de operação.	55
Tabela 14 - Intervalos sem atendimentos e número de falhas para D1 e D2 considerando qualidade na otimização das regras de operação na situação favorável.	66
Tabela 15 - Intervalos sem atendimentos e número de falhas para D1 e D2 considerando qualidade na otimização das regras de operação na situação intermediária.	68

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	16
2.1. ÁREA DE ESTUDO.....	16
2.2. DETERMINAÇÃO DAS REGRAS DE OPERAÇÃO.....	20
2.2.1. Simulação do reservatório.....	23
2.2.2. Otimização das regras de operação.....	28
2.2.3. Cenários.....	31
3. RESULTADOS	32
3.1. ANÁLISE DO DESEMPENHO DAS FUNÇÕES OBJETIVO	32
3.2. ANÁLISE DAS REGRAS DE OPERAÇÃO CONSIDERANDO QUANTIDADE	33
3.2.1. Regra da Política de Operação Padrão – Sem Racionamento.....	33
3.2.2. Regra da Curva Guia baseada em Zonas.....	35
3.3. ANÁLISE DA QUALIDADE NAS OTIMIZAÇÕES CONSIDERANDO QUANTIDADE	47
3.4. ANÁLISE DAS REGRAS DE OPERAÇÃO CONSIDERANDO QUANTIDADE E QUALIDADE	55
4. CONCLUSÃO.....	75
5. REFERÊNCIAS	77

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da população, juntamente com a urbanização, crescimento industrial e ocupação do solo pela agropecuária, influenciam no uso e nas disponibilidades dos recursos hídricos (Vieira, 1996). Esses fatores aumentam a demanda de água e geram, muitas vezes, desequilíbrio em relação a oferta, o que resulta em competição e conflitos pelo uso dos recursos hídricos entre os diferentes usuários (Vieira, 2002; Raje & Mujumdar, 2010; Pinheiro *et al.*, 2011).

Em regiões semiáridas tais conflitos se agravam devido às reduções das vazões aos corpos hídricos em períodos de estiagem (Vieira, 2002; Krol *et al.*, 2006; Zamani *et al.*, 2017) associadas a maiores demandas de água para uso doméstico e de irrigação. Esta é uma realidade vivenciada em diversas regiões semiáridas do mundo, por exemplo, nas regiões semiáridas da Grécia (Demertzi *et al.*, 2014), do Irã (Ahmad & Giordano, 2010) e do Brasil (Döll *et al.*, 2002; Pinheiro, 2002; Lima e Curi, 2007; ANA, 2010).

Em virtude da escassez dos recursos hídricos presente em regiões semiáridas, as regras e procedimentos de alocação de água tornam-se importantes mecanismos para prevenir os conflitos e atender satisfatoriamente as demandas de diferentes usuários e necessidades ambientais dos mananciais (Babel *et al.*, 2005; Lopes e Freitas, 2007; Zhang *et al.*, 2010; Correia *et al.*, 2012; Roa-García, 2014; Silva *et al.*, 2017). Considerando que os reservatórios são muitas vezes as únicas fontes hídricas disponíveis nestas regiões, a operação estratégica dos mesmos se torna uma ferramenta importante para alocação de água (Vieira, 2003; Lopes e Freitas, 2007; Zhang *et al.*, 2010; Curi *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2017; Gondim, 2018).

Uma operação adequada permite maximizar os benefícios, minimizar os custos, satisfazer os fluxos exigidos no rio e armazenar água nos reservatórios, respondendo às demandas principalmente em situações de eventos hidrológicos críticos. Tais requisitos exigem um modelo de otimização que permita solucionar ou minimizar eventuais conflitos (Van Oel *et al.*, 2012; Bozzorg Haddad *et al.*, 2014; Ahmad *et al.*, 2018; Tahiri *et al.*, 2018). Por esse motivo, regras foram desenvolvidas e aplicadas em reservatórios a fim de estabelecer um sistema de abastecimento de água em períodos de escassez hídrica que implique no mínimo de dano e interrupção das atividades dos usuários.

A regra conhecida por Política Operacional Padrão (POP) é considerada simples para operação de reservatórios, pois libera a água o mais próximo possível da meta de entrega e armazena somente as quantidades excedentes (Maass *et al.*, 1962; Klemes,

1977; Stedinger, 1984). No entanto, em períodos de estiagem, a disponibilidade de água armazenada pode ser inferior à necessária para atender aos usuários, o que pode resultar em déficits hídricos elevados nos atendimentos. Portanto, como modificação a essa regra, surgiu a metodologia chamada “hedging rule” ou curva guia (CG) nas quais são aceitos determinados déficits nas entregas atuais, para que o volume armazenado se aproxime do volume indicado pela curva guia cujo objetivo é satisfazer, pelo menos, parte das demandas sem grandes déficits em períodos de estiagem futuros (Bayazit & Ünal, 1990; Shih & Revelle, 1994; Srinivasan & Philipose, 1996). Para determinar a melhor curva guia, bem como os racionamentos necessários, vários autores estudaram a aplicação e otimização dos parâmetros dessa metodologia (Oliveira & Loucks, 1997; Srinivasan & Philipose, 1998; Draper & Lund, 2004; Shiau & Lee, 2005; Karamouz & Araghinejad, 2008; You & Cai, 2008; Moghaddasi *et al.*, 2010; Shiau, 2011; Zhao *et al.*, 2011; Moghaddasi *et al.*, 2013; Huang *et al.*, 2016; Ji *et al.*, 2016; Kang *et al.*, 2016; Tan *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2017; Srinivasan & Kumar, 2018; Kumar & Kasthuriengan, 2018; Bathia *et al.*, 2018).

Apesar dessa modificação permitir a redução da escassez hídrica, foi verificado que ela não corresponde ao comportamento operacional real dos gestores, visto que a curva guia tratada em questão representa uma função contínua o que obrigaria aos operadores adotarem diferentes tipos de racionamentos contínuos. Uma alternativa para contornar esta dificuldade operacional é discretizar a curva guia, permitindo que o racionamento seja realizado em etapas discretas (Shih & Revelle, 1994). Deste modo, a curva guia baseada em zonas ou “zone-based hedging” é uma aplicação da curva guia utilizada em regras de operação de reservatórios, inclusive, naqueles localizados em regiões com problemas de atendimento nos períodos de seca (Tu *et al.*, 2003; Guo *et al.*, 2013; Taghian *et al.*, 2014; Ahmandianfar *et al.*, 2017; Xu *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2017; Shiau *et al.*, 2018; Sun *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2018; Alahdin *et al.*, 2019; Chang *et al.*, 2019; Men *et al.*, 2019a, 2019b).

Neste método, os reservatórios são divididos em zonas de armazenamento que definem a regra de operação por meio de racionamentos no uso da água instituídos em função da zona em que o nível da água se encontra. Então, no início de cada período de tempo, a quantidade de água a ser liberada para atendimento das demandas é definida com base na respectiva zona na qual o nível do volume do reservatório está localizado (Shih & Revelle, 1995; Neelankatan & Pundarikanthan, 1999; Neelankatan & Pundarikanthan, 2000; Barros *et al.*, 2008). Assim, quando os níveis de armazenamento

estão baixos e a conservação da água se torna necessária, há redução das liberações determinada pela zona de armazenamento em que o nível da água se encontra, ocorrendo as maiores reduções quando o volume armazenado alcança zonas mais baixas.

Na aplicação da curva guia baseada em zonas se torna necessário saber “quando a regra deve iniciar” e “qual o racionamento ideal”, ou seja, conhecer os níveis de volume da água que limitam as diferentes zonas e os coeficientes de redução da liberação. Com isso, diversos estudos desenvolveram métodos apropriados para encontrar tais variáveis de decisão (Neelankatan & Pundarikanthan, 1999; Neelankatan & Pundarikanthan, 2000; Vianna & Lanna, 2002; Tu *et al.*, 2003; Tu *et al.* 2008; Guo *et al.*, 2012; Guo *et al.*, 2013; Taghian *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2015; Ahmandianfar *et al.*, 2017). O número de zonas, tipos de racionamento e as demandas envolvidas são estabelecidas no estágio do planejamento e dependem das características do reservatório e do propósito da operação (Tu *et al.*, 2003).

No entanto, operar reservatórios no semiárido considerando somente as questões quantitativas não é suficiente. Além da quantidade, é importante considerar a qualidade da água nas estratégias de operação, visto que a degradação do corpo hídrico em aspectos qualitativos também é um fator que limita os usos e a disponibilidade de água (Babel *et al.*, 2005; Efstratiadis & Hadjibirius, 2011; Shokri *et al.*, 2014).

Nas regiões semiáridas, longos períodos de estiagem e elevadas taxas de evaporação causam variações nos volumes de água armazenados nos reservatórios, o que afeta as condições físicas, químicas e biológicas da qualidade da água nesses sistemas (Figueirêdo *et al.*, 2006; Chellapa *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2012; Bezerra *et al.*, 2014a; Mosley, 2015; Braga *et al.*, 2015; Costa *et al.*, 2015; Lacerda *et al.* 2018). Em épocas de estiagem quando os volumes dos reservatórios estão em níveis mais rasos, o tempo de retenção da água e a temperatura do corpo aquático podem aumentar (Mosley, 2015) implicando maiores concentrações de nutrientes (fósforo e nitrogênio), condutividade elétrica, turbidez e biomassa de algas, levando à degradação da qualidade da água e condições eutróficas (Bezerra *et al.*, 2014b; Costa *et al.*, 2015; Jeppesen *et al.*, 2015; Medeiros *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2016; Viana *et al.*, 2016; Lacerda *et al.*, 2018; Rocha *et al.*, 2018).

Desta forma, é preciso otimizar a operação do reservatório considerando a qualidade da água e a quantidade armazenada. A maioria dos autores abordam esta questão utilizando os modelos de simulação-otimização vinculados, no qual a quantidade

e qualidade da água são simulados primeiramente para que a operação do reservatório seja otimizada posteriormente.

Nesses estudos, as simulações são realizadas por meio de abordagem determinística (Kuo et al., 2006; Dhar & Datta, 2008; Karamouz *et al.*, 2008; Shokri *et al.*, 2014), estocástica (Kerachian & Karamouz, 2006; Kerachian & Karamouz, 2007; Chaves & Kojiri, 2007; Shirangi *et al.*, 2008; Soltani *et al.*, 2010; Machado et al., 2012) ou híbrida, determinística para qualidade e estocástica para quantidade (Chaves *et al.*, 2003; Karamouz *et al.*, 2009). As otimizações têm sido realizadas através dos Algoritmos Evolutivos (AE), tais como o Algoritmo Genético (GA) e suas variações (Kerachian & Karamouz, 2006; Kuo et al., 2006; Kerachian & Karamouz, 2007; Dhar & Datta, 2008; Karamouz *et al.*, 2008; Shirangi *et al.*, 2008; Karamouz *et al.*, 2009; Soltani *et al.*, 2010; Machado *et al.*, 2012; Shokri *et al.*, 2014) e Lógica Fuzzy combinada com Programação Dinâmica (Chaves & Kojiri, 2003; Chaves *et al.*, 2003; Chaves et al., 2004).

A maioria desses trabalhos transformam um problema de otimização de múltiplos objetivos em um de único objetivo. Nesses casos uma solução ótima é obtida, no entanto em problemas multiobjetivos a maioria dos objetivos colocados em questão são conflitantes, assim os problemas de otimização multiobjetivo geralmente não possuem uma única solução que otimize todas suas metas, resultando em diferentes soluções ótimas. Logo, uma vantagem da aplicação de métodos multiobjetivos é permitir que o gerente do sistema tenha diferentes opções de soluções ótimas, escolhendo a que mais se adequa a sua realidade (Machado *et al.*, 2012; Castelletti *et al.*, 2012; Shokri *et al.*, 2014).

Um exemplo de algoritmo evolutivo utilizado para otimizar os parâmetros em problemas multiobjetivos é o NSGA-II (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm II*) (Deb *et al.*, 2002), aplicado, inclusive, em problemas de operação de reservatório (Chang & Chang, 2009; Shiao et al., 2009; Shokri *et al.*, 2014; Ahmadi *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2015; Kang *et al.*, 2016; Ahmadianfar *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2017; Azari *et al.*, 2018; Bathia *et al.*, 2018; Alahdin *et al.*, 2019). O NSGA-II, uma versão melhorada do NSGA (Srinivas e Deb, 1994), foi desenvolvido para ampliar a capacidade de modelagem para resolver problemas complexos (Deb *et al.*, 2002). Sua aplicação pode pesquisar adequadamente as séries de alocação de água ideais e obter menores taxas de escassez sazonal de água (Chang *et al.*, 2016; Azari *et al.*, 2018).

Devido a capacidade de encontrar soluções próximas ao resultado ideal com tempo de computação razoável em problemas lineares ou não-lineares (Labadie *et al.*, 2004; Lima & Lanna, 2005; Rani & Moreira, 2010) e multiobjetivos (Pianosi et al, 2019),

observa-se que os AE têm sido bastante utilizados para as otimizações das regras de operação de reservatórios em termos quanti-qualitativos. No entanto, para a regra de Curva-Guia baseada em Zonas só foi encontrado aplicações de AE para otimizar a quantidade da água de reservatórios. Logo, otimizar a qualidade da água considerando essa regra de operação pode trazer resultados positivos uma vez que existe relações entre os racionamentos das demandas com os volumes armazenados e destes com as concentrações de poluentes no reservatório.

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo otimizar a operação de reservatórios, através de um modelo de simulação-otimização vinculado e de forma multiobjetiva, a fim de atender adequadamente as demandas, tanto em quantidade quanto em qualidade. Desta forma, busca-se possibilitar o suprimento satisfatório das demandas em aspecto quanti-qualitativos e reduzir a escassez hídrica e eutrofização em reservatórios.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi desenvolvido em seis reservatórios localizados na porção potiguar da bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu (Figura 1 e Tabela 1). Essa bacia hidrográfica possui área total de 43.683 km² com seu território dividido entre os Estados da Paraíba (60%) e do Rio Grande do Norte (40%) (ANA, 2016).

Figura 1 - Localização da área de estudo

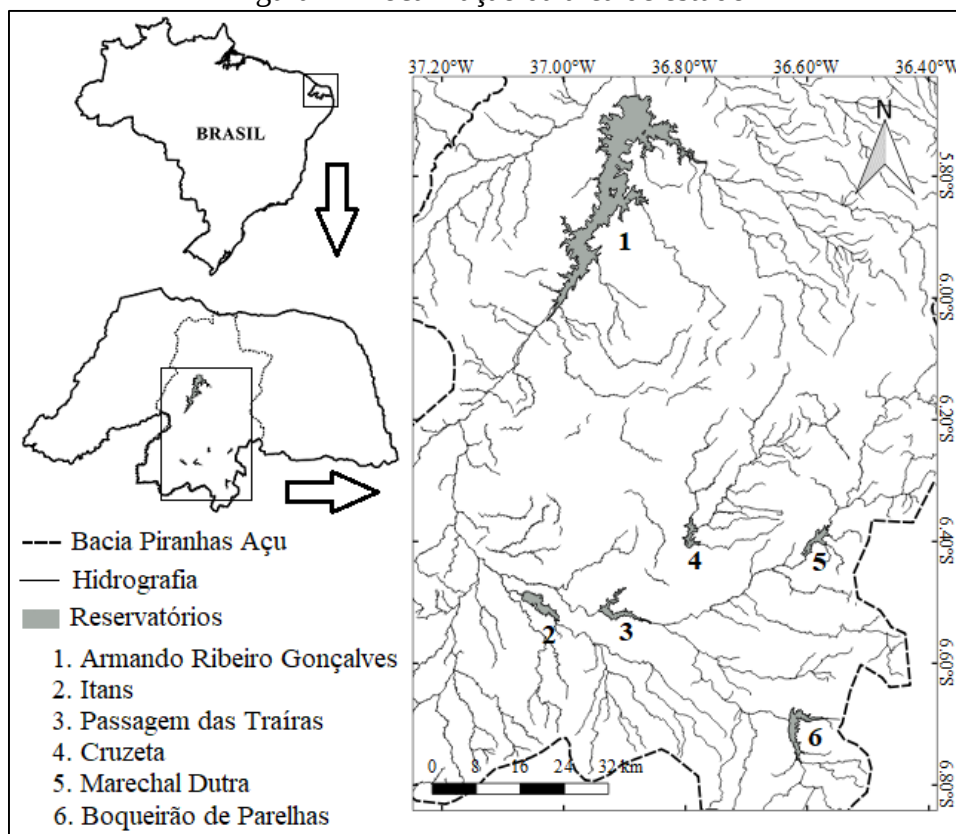


Tabela 1 - Características Gerais dos Reservatórios

Reservatórios	Área da Bacia Hidrográfica (km ²)	Área Superficial Máxima (km ²)	Capacidade Máxima (hm ³)	Profundidade Máxima (m)
Armando Ribeiro Gonçalves	36770	192,00	2400,00	31,0
Itans	1268	13,40	81,75	24,0
Passagem de Traíras	7600	10,43	49,70	15,3
Cruzeta	1400	6,16	23,55	9,3
Marechal Dutra	2400	8,05	44,42	21,0
Boqueirão de Parelhas	1430	12,67	84,79	19,0

O clima é classificado como Bsh ou semiárido quente, com precipitação anual variando de 440 a 1050 mm, caracterizado por uma estação chuvosa concentrada entre os meses de fevereiro a junho e uma estação seca nos demais meses. A evaporação média de Piché é de 2.338 mm.ano⁻¹ e a evapotranspiração, segundo os métodos de Hargreaves e Penman-Monteith, da ordem, respectivamente, de 1.620 mm.ano⁻¹ e 1.786 mm.ano⁻¹ (ANA, 2016).

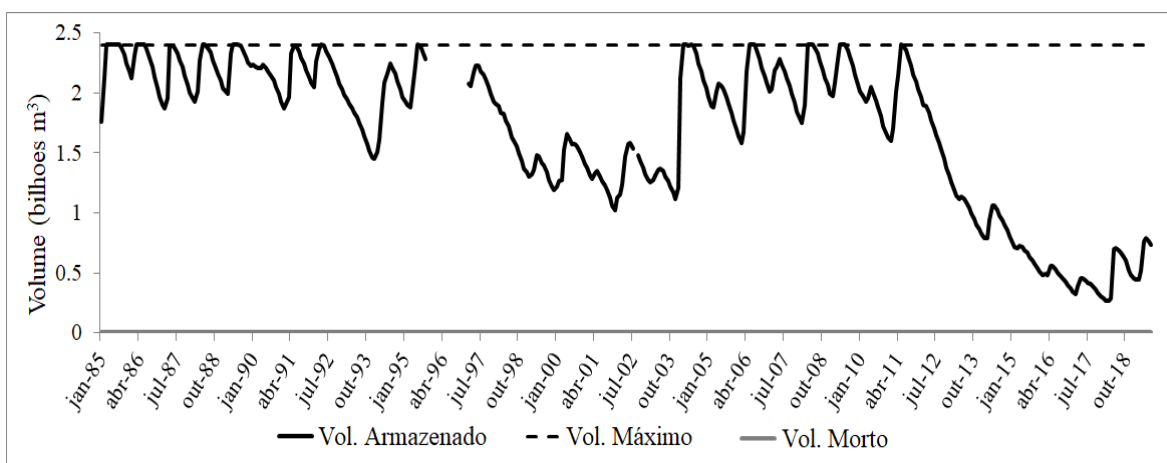
Esta bacia possui 51 açudes com capacidade de armazenamento acima de 10 hm³, segundo o Plano de Recursos Hídricos da Bacia (ANA, 2016), dentre os quais, foram

selecionados seis para o presente estudo, pela sua importância para o Estado e pela disponibilidade de dados.

A capacidade de armazenamento não possui relação direta com a disponibilidade hídrica, uma vez que os reservatórios semiáridos apresentam flutuações sazonais, podendo alcançar a capacidade máxima no final da estação chuvosa (Cabral *et al.*, 2013), mas ficarem praticamente secos nos períodos de seca (Zohary e Ostrovsky, 2011).

A Figura 2 apresenta a variação volumétrica do reservatório Eng. Armando R. Gonçalves monitorada por IGARN (2020). Mesmo sendo um reservatório de grandes dimensões, é verificada variações entre os períodos secos e úmidos.

Figura 2 - Variação Volumétrica do reservatório Eng. Armando R. Gonçalves.



Fonte: IGARN, 2020

Os reservatórios selecionados atendem demandas de usos múltiplos para abastecimento humano e industrial, irrigação, pecuária e, em dois deles, para a aquicultura. A soma total dessas demandas é de aproximadamente $21 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Os grandes usuários de água desta bacia são irrigação (51,8%) e Aquicultura (41,8%), ambas desenvolvidas principalmente a jusante do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves. Os usos prioritários são abastecimento humano e dessedentação de animais, conforme a Lei nº 9.433 de 1977, juntos representam 6,4% da demanda total do reservatório (ANA, 2016) (Tabela 2).

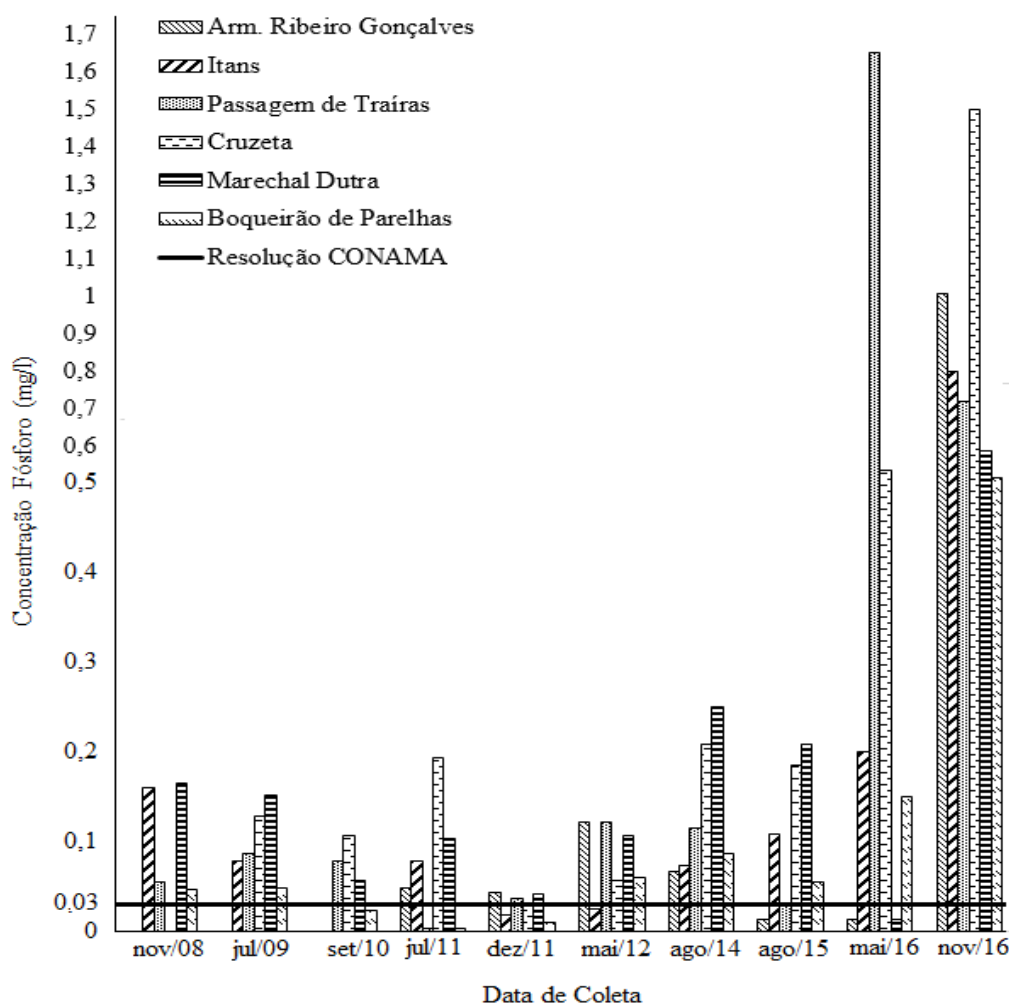
Tabela 2 - Demandas dos usos nos reservatórios

Reservatórios	Demandas (m ³ .s ⁻¹)					
	Abastecimento Humano	Pecuária	Irrigação	Industrial	Aquicultura	Total
Armando Ribeiro Gonçalves	0,860	0,060	7,259	0,119	8,420	16,718
Itans	0,006	0,027	0,675	0,087	0,000	0,795
Passagem de Traíras	0,038	0,022	0,676	0,013	0,003	0,752
Cruzeta	0,028	0,026	0,874	0,010	0,000	0,938
Marechal Dutra	0,125	0,013	0,649	0,012	0,000	0,799
Boqueirão de Parelhas	0,093	0,029	0,697	0,083	0,000	0,902
Total	1,150	0,177	10,830	0,324	8,423	20,904

Com relação a qualidade da água armazenada nos reservatórios, de acordo com o Programa Água Azul (2019), todos os seis apresentam, na maior parte do tempo, concentração de fósforo acima de 0,03 mg.l⁻¹, limite estabelecido pela Resolução do CONAMA 357/2005 para corpos de água doce Classe 2 (Figura 3), mostrando que todos eles apresentam histórico de eutrofização, o que está de acordo com outros estudos (Panosso et al., 2007; Chellapa et al., 2009; Vasconcelos, 2011; Oliveira, 2012; Rocha Júnior et al., 2018).

Observa-se ainda que estes reservatórios apresentam variações temporais nas concentrações de fósforos. Em alguns anos, como 2011, os reservatórios apresentam baixos valores de concentração quando comparado com outros anos, como por exemplo 2016. Estudos mostraram que nos reservatórios da bacia Seridó ocorre a diminuição dos seus volumes armazenados, principalmente em períodos extremos de seca, aumentando as concentrações de nutrientes na água (Bezerra *et al.*, 2011; Medeiros 2016; Cavalcante *et al.*, 2018; Rocha Júnior *et al.*, 2018). Já com as chuvas, os volume armazenados podem aumentar e ocasionar diluições das concentrações de nutrientes (Bouvy *et al.*, 2003), porém, por outro lado a lixiviação dos solos pode carrear nutrientes ao corpo hídrico (Bezerra *et al.*, 2014.b).

Figura 3- Concentrações de fósforo nos reservatórios do estudo



Fonte: Adaptado Programa Água Azul (2019)

As principais fontes de poluição de reservatórios nesta região são os lançamentos de efluentes domésticos pontuais, as atividades agropecuárias e a exposição do solo (Meneses *et al.*, 2015; Morais Neto, 2018; Melo, 2019). Além das cargas afluentes de fósforo, a liberação deste nutriente pela suspensão dos sedimentos do reservatório também contribuem para o aumento das suas concentrações (Welch & Cooke, 2005; Freitas *et al.*, 2011; Søndergaard *et al.*, 2013; Ding *et al.*, 2015; Ni & Wang, 2015; Doig *et al.*, 2017; Cavalcante *et al.*, 2018; Lacerda *et al.*, 2018).

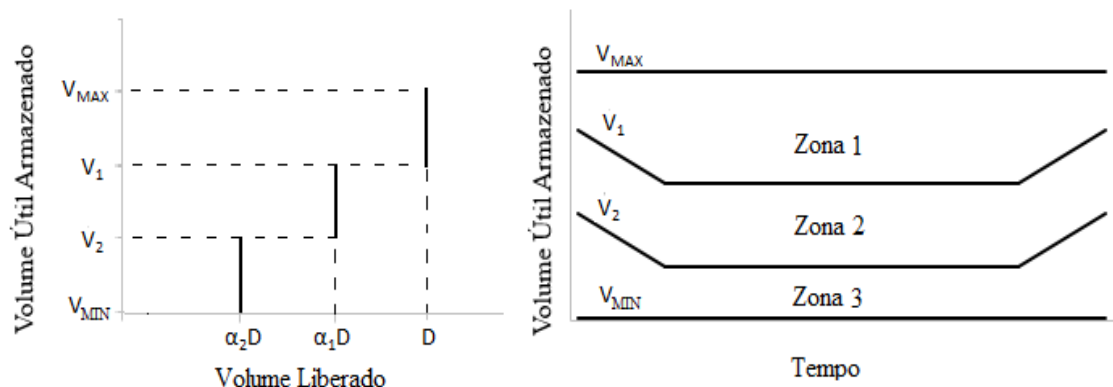
2.2. DETERMINAÇÃO DAS REGRAS DE OPERAÇÃO

A regra de operação dos reservatórios foi definida considerando o método Curva Guia baseada em Zonas, proposto por Tu *et al.* (2008), modificado para incorporar critérios de qualidade. Tais regras consistem na definição da quantidade de água a ser

liberada aos diferentes usuários através de coeficientes de racionamentos que dependem do nível do armazenamento do reservatório. Assim, o armazenamento total do reservatório é dividido em faixas verticais, onde cada uma delas apresentará regras de racionamento de atendimento das demandas. Neste trabalho, procurou-se evitar ou minimizar os períodos de escassez e a eutrofização dos reservatórios.

Uma exemplificação do método de Curva Guia baseada em Zonas é apresentada na Figura 4, onde para um determinado intervalo de tempo, se o armazenamento for maior que o volume de armazenamento V_1 , então a demanda total (D) esperada pode ser liberada, sem precisar de racionamento. Porém, se o armazenamento estiver entre os volumes V_2 e V_1 , ou seja, na Zona 2, então a primeira fase de racionamento será ativada, ou seja, a demanda será reduzida para uma fração da demanda total, utilizando-se o coeficiente α_1 . Já se o armazenamento estiver na Zona 3, com volume menor que V_2 e maior que V_{MIN} , a demanda será reduzida para uma proporção de α_2 da demanda total (Shih & Revelle, 1994; Tu *et al.*, 2003; Tu *et al.*, 2008; Ahmandianfar *et al.*, 2017).

Figura 4 - Exemplos de zonas com fases de racionamento



Fonte: Adaptado Ahmandianfar *et al.* (2017)

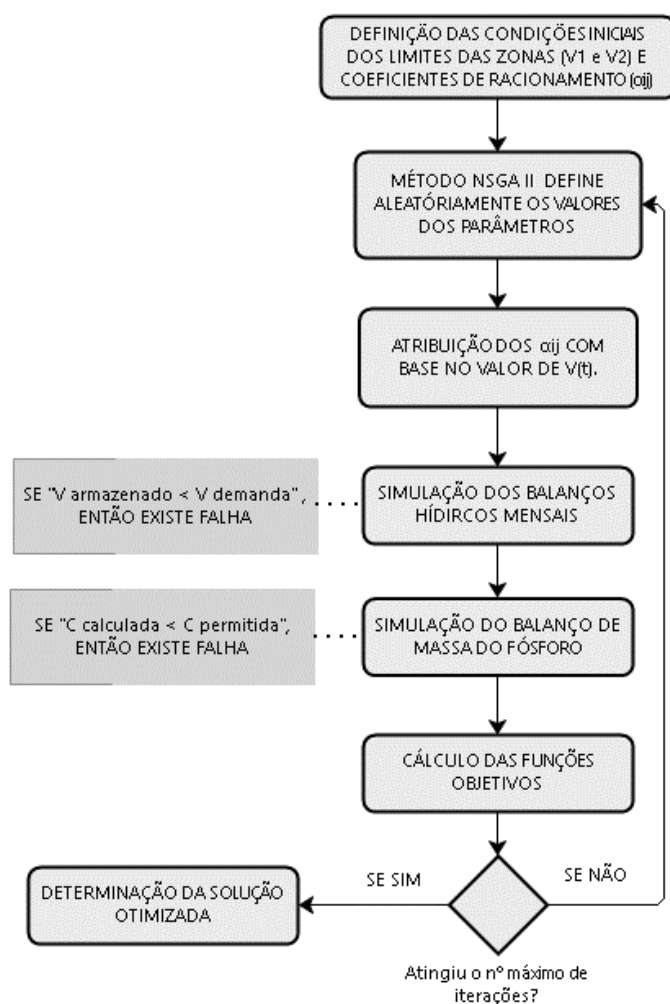
Neste trabalho, foram consideradas duas classes de demandas: as demandas prioritárias (D_1), composta pelas demandas para abastecimento humano e pecuária; e as demandas não prioritárias (D_2) para os demais usos presentes no reservatório. Essas demandas apresentarão diferentes coeficientes de racionamento a depender da zona em que o nível do reservatório está localizado (Tabela 3).

Tabela 3 - Nomenclatura dos coeficientes de racionamento nas diferentes zonas.

Demanda	Coeficientes de Racionamento		
	Zona 1 $V_{MAX} > V(t) > V1$	Zona 2 $V1 > V(t) > V2$	Zona 3 $V2 > V(t) > V_{MIN}$
D_1	-	α_{11}	α_{21}
D_2	-	α_{12}	α_{22}

A otimização dos parâmetros, ou seja, dos limites das zonas ($V1$ e $V2$) e dos coeficientes de racionamento (α_{11} , α_{12} , α_{21} e α_{22}) foi realizada utilizando o método de otimização NSGA-II (Deb et al., 2002) com base na simulação dos volumes através do balanço hídrico. As etapas da metodologia estão ilustradas no fluxograma da Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma das Etapas Metodológicas



2.2.1. Simulação do reservatório

O período de simulação dos reservatórios foi de 1921 a 2012. O balanço hídrico foi realizado por meio da Equação 1, a fim de obter os volumes armazenados em cada intervalo de tempo.

$$S(t+1) = S(t) + Q(t) + P(t) - \sum_i^n \alpha_{ji}(t) \cdot D_i(t) - E(t) - V(t) \quad (1)$$

Sendo $S(t+1)$ o volume do reservatório no final do mês t ; $S(t)$ o volume do reservatório no final do mês anterior; $Q(t)$ o volume afluente ao reservatório no mês t ; $P(t)$ o volume precipitado no mês t ; $D_i(t)$ a demanda do reservatório para o usuário i ; α_{ji} o coeficiente de racionamento da zona j para o usuário i ; n o número de classes de demandas; $E(t)$ o volume evaporado no mês t e $V(t)$ o volume vertido no mês t .

Na Equação 1 foram definidas algumas restrições para os valores armazenados. Onde, $S(t+1)$ deve ser superior ou igual ao volume morto (V_{MIN}), pois abaixo deste volume haverá falha no atendimento das demandas. Já se $S(t+1)$ for superior ao volume máximo (V_{MAX}), então ocorrerá o vertimento da água. Tais limitações são apresentadas nas Inequações 2 e 3.

$$S(t+1) = V_{MIN}; \text{ se } S(t+1) < V_{MIN} \quad (2)$$

$$S(t+1) = V_{MAX}; \text{ se } S(t+1) > V_{MAX} \quad (3)$$

Os dados de vazões afluentes, evaporação, curva cota-área-volume dos reservatórios e demandas dos usuários são disponibilizados no Plano da Bacia Piancó-Piranhas Açú (ANA, 2016) e as precipitações foram fornecidas pela EMPARN (2016).

Para simular a qualidade da água no reservatório, utilizou-se como indicador as concentrações de fósforo (P), considerando que este nutriente é o agente limitante ao crescimento de algas na grande maioria dos corpos hídricos (Salas & Martino, 1991; Schindler *et al.*, 2012; Rangel *et al.*, 2012; Santos *et al.*, 2017). Desta forma, as concentrações de fósforo mensais foram simuladas por meio do balanço de massa considerando que a massa total de fósforo no reservatório é o produto da concentração (C) pelo volume (S) em um determinado tempo (t) (equação 4).

$$C(t+1) \cdot S(t+1) - C(t) \cdot S(t) = C_{afl} \cdot Q(t) - C_{med} \cdot \sum_i^n \alpha_{ji}(t) \cdot D_i(t) - \text{Fluxo. A} \quad (4)$$

Onde: $C(t+1)$ é a concentração de P no reservatório no final do mês (mg/m^3); $C(t)$ é a concentração de P no reservatório no final do mês anterior (mg/m^3); C_{afl} é a concentração de P afluente ao reservatório proveniente das fontes antrópicas difusas e fontes naturais (mg/m^3); C_{med} é a concentração média de fósforo no intervalo de tempo (mg/m^3); Fluxo é a diferença entre a massa do nutriente que sedimenta com a que retorna para a coluna d'água ($\text{mg}/\text{mês}.\text{m}^2$); e A é a área do espelho d'água do reservatório (m^2).

Os valores da concentração de fósforo total, por sua vez, foram limitados pelos valores estabelecidos na Resolução do CONAMA nº 357/2005 para corpos de água doce Classe 2, indicando que concentrações acima desses limites acarretaria em falha no atendimento das demandas. Para os casos em que as restrições previstas pela Classe 2 não permitiu atender satisfatoriamente as demandas prioritárias, utilizou-se os valores estabelecidos para os corpos de água doce Classe 3. As restrições são indicadas nas Inequações 5 e 6.

$$C \leq 0,03 \text{ mg.l}^{-1}; \text{ para corpos de Classe 2} \quad (5)$$

$$C \leq 0,05 \text{ mg.l}^{-1}; \text{ para corpos de Classe 3} \quad (6)$$

Os valores utilizados de Fluxo de fósforo nos seis reservatórios estudados foram obtidos pelo estudo elaborado por Oliveira (2019) realizado nos mesmos reservatórios com base nos balanços de massa realizados em diferentes períodos (Tabela 4). Foram considerados somente os Fluxos cujos balanços implicam no transporte de fósforo da coluna d'água para o sedimento. Sendo, portanto, considerado neste trabalho como única entrada de fósforo ao reservatórios as cargas afluentes provenientes de fontes difusas na bacia hidrográfica.

Tabela 4 - Fluxos do fósforo no reservatório obtidos por Oliveira (2019).

Reservatório	Período de Análise	Fluxos (mg/mês)
Eng. Armando Ribeiro Gonçalves	Nov a Dez/2007	1636,64
	Ago a Set/2007	1455,19
	Nov a Dez/2006	666,43
	Out a Nov/2006	178,98
Boqueirão de Parelhas	Ago a Set/2008	152,30
	Set a Out/2006	142,48
	Ago a Set/2007	126,86
	Out a Nov/2007	64,65
Cruzeta	Ago a Set/2006	236,73
	Ago a Out/2008	83,25
	Set a Out/2006	71,03
	Set a Out/2007	54,37
	Ago a Set/2008	18,05
Itans	Ago a Set/2006	107,64
	Ago a Set/2007	92,15
	Ago a Set/2008	30,14
Marechal Dutra	Out a Nov/2006	316,82
	Set a Out/2008	177,00
	Set a Out/2007	156,97
	Out a Nov/2007	72,25
	Ago a Out/2007	34,04
Passagem de Traíras	Out a Nov/2008	352,96
	Ago a Set/2006	76,72
	Out a Nov/2007	49,24
	Ago a Set/2008	19,01
	Out a Nov/2006	8,84

Considerando que as concentrações de fósforo afluentes aos reservatórios (C_{afl}) multiplicadas pela vazão $Q(t)$ representam uma carga de fósforo afluente ao reservatório, utilizou-se os coeficientes de exportação (C_e) de fósforo que representam a carga de fósforo por unidade de área da bacia hidrográfica para determinar o termo da multiplicação $C_{afl} \times Q(t)$ da equação 4. Outros estudos também utilizaram esse coeficiente

para cálculo das cargas provenientes da poluição difusa (Bezerra *et al.*, 2011; Freitas *et al.*, 2011; Oliveira, 2012; Pinheiro *et al.*, 2013; Bezerra *et al.*, 2014b; Freitas *et al.*, 2014; Yilmaz e Sivri, 2014; Barbosa e Cirilo, 2015; Lima *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2019).

Os C_e adotados foram obtidos por Bezerra *et al.* (2011) para os reservatórios Cruzeta e Marechal Dutra. Considerando que os valores de C_e obtidos por Bezerra *et al.*, (2011) apresentam variações, optou-se por se trabalhar com três valores de C_e : um valor mínimo, $C_{e_{min}} = 0,024 \text{ kg.ha.ano}^{-1}$, um valor médio, $C_{e_{med}} = 0,048 \text{ kg.ha.ano}^{-1}$, e um valor máximo, $C_{e_{max}} = 0,072 \text{ kg.ha.ano}^{-1}$ para todos os reservatórios.

Para verificar que os valores de C_e utilizados estavam coerentes, foram multiplicados separadamente o C_e mínimo, médio e máximo com a área da bacia hidrográfica de cada reservatório, resultando assim na Carga de fósforo mínima, média e máxima, respectivamente. Estas foram comparadas com as cargas encontradas por Vasconcelos (2011) provenientes de diferentes fontes nos mesmos reservatórios analisados (Tabela 5). Verifica-se que nos quatro reservatórios que contém dados, os valores de carga mínima são semelhantes às cargas emitidas por fontes naturais, provenientes da deposição atmosférica e da denudação do solo.

Tabela 5 - Comparação das cargas adotadas de P afluentes mínimas, médias e máximas (kg.mes^{-1}) com as observadas na literatura provenientes de diferentes fontes.

Reservatório	Carga Mínima	Carga Média	Carga Máxima	Tipo de Fonte	Carga Vasconcelos (2011)
Itans	254	507	761	Emissões Naturais	250
				Esgotos Domésticos	1.483
				Agricultura	2.042
				Pecuária	13.333
Boqueirão de Parelhas	304	608	911	Emissões Naturais	225
				Esgotos Domésticos	1.483
				Agricultura	4.942
				Pecuária	9.392
Cruzeta	280	560	840	Emissões Naturais	200
				Esgotos Domésticos	1.642
				Agricultura	2.825
				Pecuária	13.492
Marechal Dutra	480	960	1.440	Emissões Naturais	425
				Esgotos Domésticos	4.542
				Agricultura	6.258
				Pecuária	21.708

No entanto, ocorre uma discrepância entre as cargas máximas e as cargas provenientes das fontes antrópicas, principalmente quando se soma todas as emissões. Esta diferença pode ser explicada pelo fato das cargas apresentadas por Vasconcelos (2011) terem sido estimadas com base nas concentrações de fósforo per capita nos locais de origem, não considerando, portanto, o decaimento da carga do nutriente durante o percurso do escoamento superficial, que tem sido abordado em outros estudos (Cecchi *et al.*, 2007; Barbosa e Cirilo, 2015; Lima *et al.*, 2016; Medeiros, 2016; Xu e Zhang, 2018). Huang *et al.*, (2015), por exemplo, mostram que a concentração de fósforo diminui gradualmente ao longo do rio devido à deposição de sedimentos.

Sendo assim, é possível aplicar o Ce máximo igual a 0,072 kg.ha.ano⁻¹ obtido na bacia hidrográfica do reservatório Cruzeta por Bezerra *et al.* (2011) nos demais reservatórios, uma vez que se considerar que todas as cargas provenientes das fontes naturais e antrópicas calculadas por Vasconcelos (2011) alcançassem os reservatórios, os valores de carga por unidade de área de cada reservatório apresentariam pequenas variações entre si, logo, sendo aceitável a possibilidade dos demais reservatórios também apresentem o mesmo Ce verificado em Cruzeta.

Outro fator que foi levado em consideração para utilizar os mesmos valores de Ce em todos os reservatórios estudados é que os reservatórios estão em uma mesma região com características físicas, como solo e clima, e socioeconômicas semelhantes (ANA, 2016; EMBRAPA, 2019). A única exceção é o Reservatório Eng. Armando R. Gonçalves por pertencer a uma maior bacia hidrográfica cujas áreas apresentam diferentes características físicas e maiores variações hidrológicas (ANA, 2016).

No início do período de simulação, foi considerada uma concentração inicial de fósforo (C₀) em cada reservatório como sendo a mediana dos dados de concentração observados no Programa Água Azul (2019) (Tabela 6). Observa-se que as C₀ já são superiores às concentrações permitidas para corpos hídricos Classe 2 e 3.

Tabela 6 - Dados adotados de concentração inicial (C₀) nos reservatórios.

Reservatório	C ₀ (mg/L)
Armando Ribeiro Gonçalves	0,091
Boqueirão de Parelhas	0,061
Cruzeta	0,087
Itans	0,087
Marechal Dutra	0,124
Passagem de Traíras	0,078

2.2.2. Otimização das regras de operação

A regra ideal é aquela que permite o maior atendimento das demandas dos usuários sem haver prejuízos aos mesmos, evitando a liberação desnecessária de água e mantendo o volume armazenado no reservatório necessário para atender as restrições de qualidade da Resolução CONAMA nº 357/2005. Assim, a otimização da regras de operação dos reservatórios deve garantir água neles o maior tempo possível para satisfazer as demandas dos usuários integralmente ou parcialmente em períodos de escassez.

Neste trabalho a otimização foi realizada em duas etapas. A primeira considera somente os problemas com relação a quantidade, desprezando os critérios de qualidade. A segunda, além da quantidade, leva-se em consideração também a qualidade da água do reservatório. A partir dos resultados obtidos pela comparação entre as soluções encontradas nessas duas etapas, foi possível verificar a influência da qualidade nas regras de operação de reservatórios.

Para otimizar a operação dos reservatórios considerando somente as questões de quantidade, utilizou-se duas funções objetivos: FO1 - minimizar a diferença entre o volume de água requerido ($D(t)$) para atendimento de todas as demandas no tempo t e o volume de água disponível ($R(t)$) para ser alocado no tempo t (Equação 7); e FO2 – minimizar a quantidade de vezes que o reservatório ficou na Zona 3 e no Volume Morto (V_{morto}) (Equação 8).

$$FO1 = \min\{\sum_{t=1}^N [D(t) - R(t)]\} \quad (7)$$

$$FO2 = \min\{\sum_{t=1}^N Zona_3(t) + \sum_{t=1}^N V_{morto}(t)\} \quad (8)$$

Inicialmente foram testadas as aplicações das duas funções objetivos em quatro situações distintas para avaliar que situação apresentava o melhor desempenho em relação aos déficits hídricos:

- 1ª situação - foi considerado os valores de $V1$ e $V2$ constantes para todo o ano, sendo as funções objetivo analisadas em todo horizonte de operação N ;

- 2ª situação - os valores de V1 e V2 variavam nos períodos úmidos e secos, logo, se otimiza quatro valores de volume, dois para o período úmido (V1u e V2u) e dois para o período seco (V1s e V2s).
- 3ª situação - os valores V1 e V2 são constantes para todo período analisado e as funções objetivos são analisadas somente nos meses de período seco.
- 4ª situação - equivale a segunda associada com a terceira, ou seja, as funções objetivos são analisadas somente nos meses de período seco, porém considerando diferentes V1 e V2 para período úmido e seco. Este teste de desempenho foi realizado somente para o reservatório Cruzeta para uma garantia de 90% de abastecimento nos usuários prioritários.

Os déficit hídricos foram calculados a partir da Equação 9. Em que, para o cálculo dos déficits no período total de análise todos os meses t são considerados, já para os déficits no período seco, foram somente considerados na Equação 9 os meses t pertencentes ao período seco.

$$\text{Déficit Hídrico (\%)} = \sum_{t=1}^N \frac{D(t)-R(t)}{D(t)} \times 100 \quad (9)$$

Após definição do melhor desempenho das Funções Objetivo, a mesma foi aplicada na otimização das regras de operação de todos os reservatórios estudados. Com isto, foi definida a solução ótima para a operação dos reservatórios considerando apenas quantidade.

Após esta etapa, utilizou-se os mesmos parâmetros otimizados para simular a operação dos reservatórios considerando agora as restrições da qualidade a fim de verificar a frequência com que os reservatórios ficam com concentrações de fósforo acima da permitida pela resolução CONAMA nº 357/2005 para corpos hídricos Classe 2.

Para verificar a sensibilidade da regra de operação com relação a variações de fluxo de fósforo no reservatório e suas concentrações afluentes, foram utilizados todos os dados disponíveis destas variáveis em outros estudos (Oliveira, 2019; Bezerra *et al.*, 2011). Desta forma, foram obtidos resultados de 15 (quinze) simulações para os reservatórios Cruzeta, Marechal Dutra e Passagem de Traíras, 12 (doze) simulações para Boqueirão de Parelhas e Eng. Armando R. Gonçalves e 9 (nove) simulações para Itans.

A partir destes resultados, foram definidas três situações: (i) favorável, quando apresentava o menor número de falhas; (ii) intermediária, ao exibir o número de falhas intermediário; e (iii) desfavorável, quando se obteve o maior número de falhas.

Na segunda etapa da otimização, agora, considerando também a qualidade da água no reservatório, além da minimização das funções objetivos FO1 e FO2 definidas anteriormente foi minimizado também a função objetivo FO3 - número de vezes em que a concentração foi diferente da aceitável (equação 10 e inequações 11 e 12). A minimização desta função objetivo buscou manter as concentrações de fósforo o mais próximo possível do seu valor permitido.

Nesta etapa, se considerou as situações favoráveis, intermediárias e desfavoráveis de operação do reservatório definidas anteriormente.

$$FO3 = \min\{\sum_{t=1}^N [C_{superior}(t)] + \sum_{t=1}^N [C_{inferior}(t)]\} \quad (10)$$

$$\text{Se } C_{OBS}(t) > C_{PER}(t), \text{ então } C_{superior}(t) = C_{OBS}(t) - C_{PER}(t) \quad (11)$$

$$\text{Se } C_{OBS}(t) \leq C_{PER}(t), \text{ então } C_{inferior}(t) = C_{PER}(t) - C_{OBS}(t) \quad (12)$$

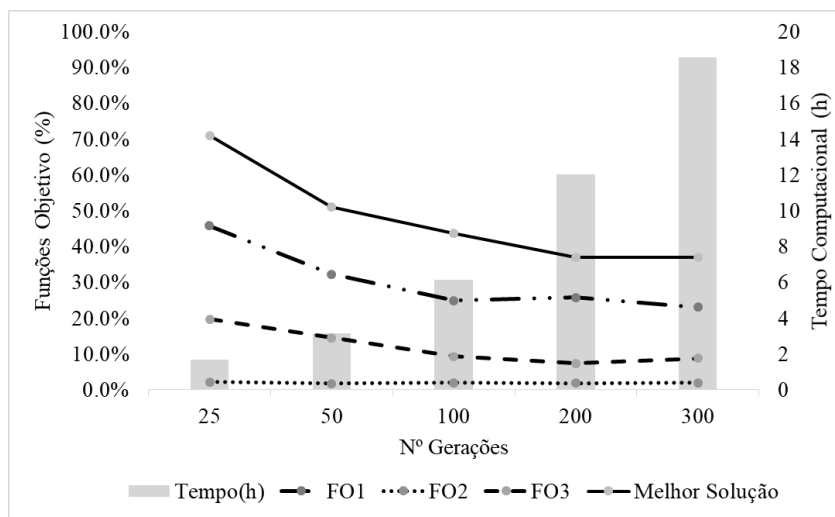
Sendo $C_{OBS}(t)$ a concentração de fósforo observada em cada reservatório no tempo t e $C_{PER}(t)$ a concentração máxima de fósforo permitida de modo a atender a Resolução do CONAMA n° 357/2005 para corpos de água doce Classe 2 ou 3. Então, $C_{superior}(t)$ é o valor da concentração de fósforo acima da concentração permitida no tempo t e $C_{inferior}(t)$ é a diferença entre as concentrações de fósforo permitidas e observadas quando estas forem inferiores a aquelas no tempo t .

Para otimizar as regras de operação, ou seja, definir os valores ideais para as delimitações das zonas (V1 e V2) e dos coeficientes de racionamentos das demandas (α_{ij}), foi utilizado o algoritmo NSGA-II, por meio do pacote “NSGA2R” no programa R (R Core Team, 2018).

Na aplicação do NSGA-II foi definido o tamanho da população igual a 100 e o critério de parada sendo no máximo 100 gerações. A escolha pelos valores numéricos de População e de Gerações levou em consideração a convergência dos resultados otimizados e o tempo computacional. Com isso, comparados os resultados com diferentes valores de gerações, foi visto que a partir de 100 gerações os resultados otimizados para FO1, FO2 e FO3 começam a convergir para valores semelhantes (Figura 6), de forma que o aumento do número de gerações não traria ganhos significativos no valor das funções objetivos e por outro lado, elevaria consideravelmente o tempo de processamento,

dificultando o desenvolvimento do trabalho. Portanto, foi definido o tamanho 100 para a população, 100 gerações como critério de parada e para o processo cruzamento e mutação considerou-se a fração de cruzamento de 0,8 e a taxa de mutação de 0,1.

Figura 6 - Desempenho das Funções Objetivo para diferentes gerações.



2.2.3. Cenários

A Política Nacional de Recursos Hídricos, Lei nº 9.433 de janeiro de 1997, diz no Art 1º, inciso III, “em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais”. Portanto, em todos os cenários estudados as demandas prioritárias (D1) receberam sempre que possível toda a demanda necessária, ou seja, sem sofrer racionamentos. Com isso, α_{11} e α_{12} foram sempre iguais a 1,0. No entanto, o sistema de gestão não trabalha sempre com 100% de garantia, permite que a operação apresente falhas de atendimento numa certa porcentagem de tempo. No Rio Grande do Norte, a gestão de recursos hídricos trabalha com uma garantia de 90%, ou seja, aceita que o sistema apresente falha no atendimento das demandas em 10% do tempo.

Para considerar estas questões na otimização das regras de operação dos seis reservatórios estudados, considerou-se 04 (quatro) cenários de garantia: Cenário 1 – sem racionamentos; Cenário 2 – 90% de garantia para D1; Cenário 3 – 95% de garantia para D1; Cenário 4 – 100% de garantia de abastecimento a D1. As demanda não prioritárias (D2), no entanto, podem sofrer racionamentos nas Zonas 2 e 3 nos Cenários 2, 3 e 4, nos quais α_{21} pode variar entre 0.2 e 1.0 e α_{22} sempre será 0.0 para todos os cenários.

Com isso, será possível avaliar as variações dos atendimentos das demandas em cada Cenário e, assim, permitir a visualização daqueles que apresentam os resultados mais satisfatórios para os usuários.

3. RESULTADOS

3.1. ANÁLISE DO DESEMPENHO DAS FUNÇÕES OBJETIVO

Ao considerar V1 e V2 constantes, o fornecimento de água é semelhante nas duas situações estudadas (1ª e 3ª situação), tanto para período total como para o período seco, indicando que nessas situações otimizar reduzindo os déficits somente no período seco (3ª situação) não traz ganho para o sistema (Tabela 7). No entanto, se as funções objetivos forem aplicadas considerando V1 e V2 variável (2ª e 4ª situação), observa-se que ao otimizar o déficit em todo o período (2ª situação), o fornecimento de água no período seco é reduzido em relação ao período úmido. Porém, se otimizar o déficit hídrico somente para o período seco (4ª situação), apesar dos déficits hídricos no período total ser superior em relação às demais situações, essa situação apresenta a redução mais significativa do déficit hídrico somente no período seco (Tabela 7).

Salienta-se que as regras de racionamento são aplicadas somente às demandas não prioritárias, logo, os fornecimentos de água às demandas prioritárias nos períodos úmidos e secos não se alteram.

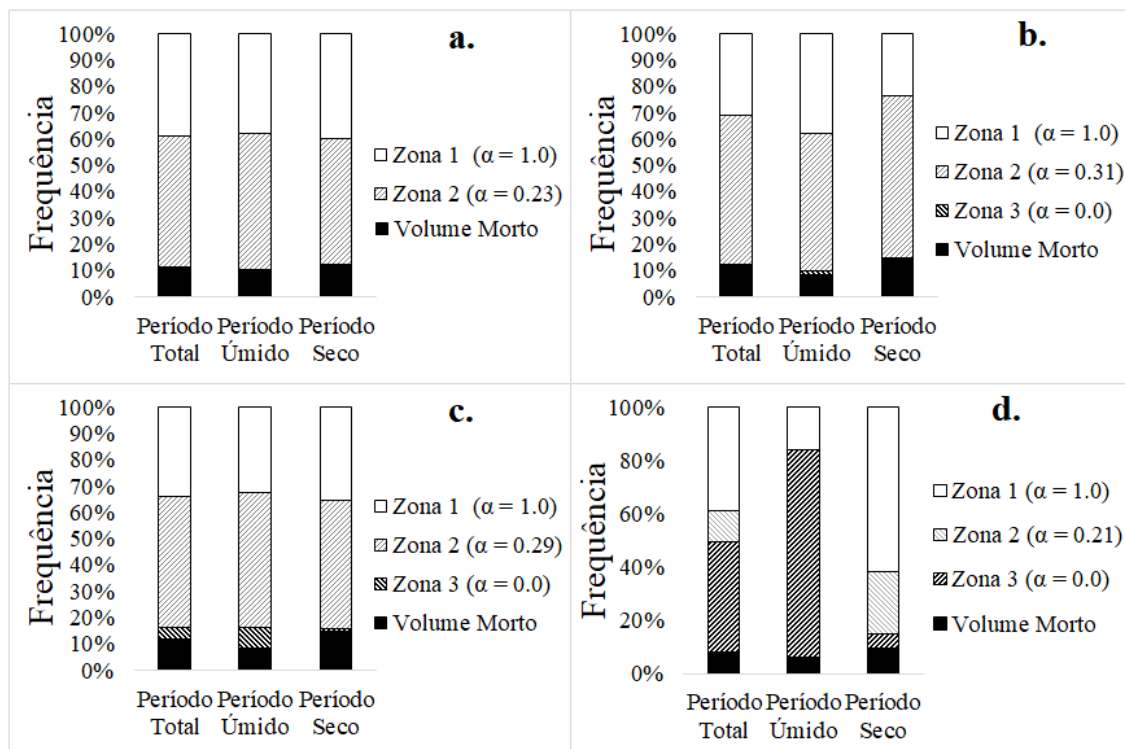
Tabela 7 - Déficit hídricos do reservatório Cruzeta para as diferentes aplicações de FO1 e FO2.

	1ª Situação	2ª Situação	3ª Situação	4ª Situação
Déficit Hídrico no Período Total	48%	49%	48%	53%
Déficit Hídrico no Período Seco	41%	50%	41%	29%

Desta forma, se o déficit hídrico no período total fosse considerado, a 1ª e 3ª situação seriam as mais ideais para a otimização, no entanto, como na região semiárida a irrigação necessita de maiores quantidades de água no período seco devido ao longo tempo de estiagem, foi utilizada a 4ª situação para otimizar a operação dos reservatórios.

Nessa situação, verifica-se nos períodos úmidos maiores frequências da posição do nível da água nas zonas com regras de racionamentos a fim de se preservar maiores volumes de água para o período seco e assim resultar em maiores fornecimentos tanto para os usuários prioritários como também para os não prioritários (Figura 7).

Figura 7 - Frequência de tempo da posição do nível de água em Cruzeta para os períodos úmidos e secos resultantes das otimizações das aplicações de FO1 e FO2: (a) 1ª situação; (b) 2ª situação; (c) 3ª situação; e (d) 4ª situação



3.2. ANÁLISE DAS REGRAS DE OPERAÇÃO CONSIDERANDO QUANTIDADE

3.2.1. Regra da Política de Operação Padrão – Sem Racionamento.

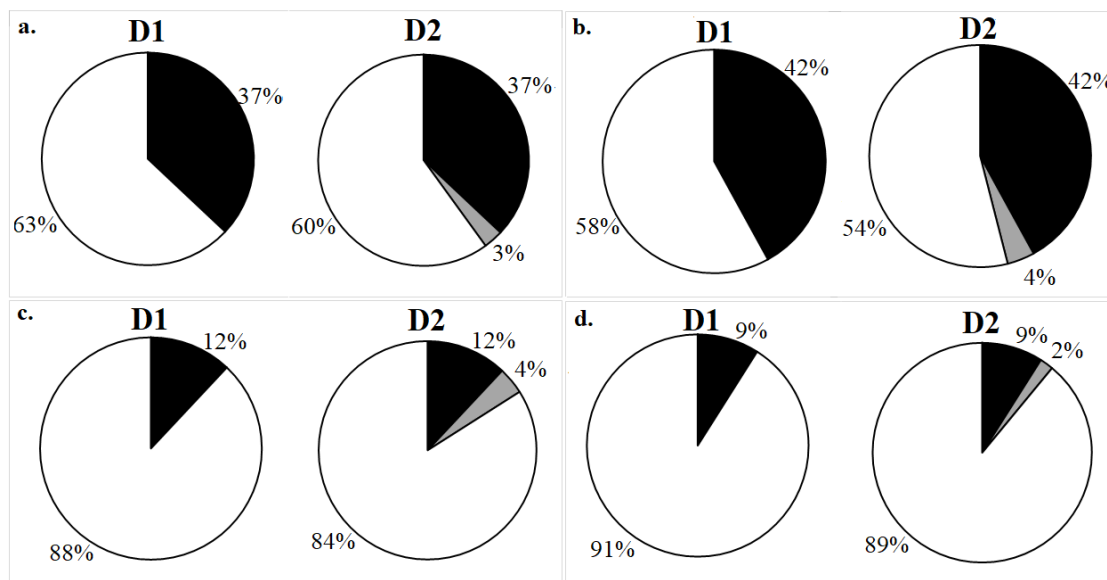
Antes de analisar as regras de operação definimos as vazões regularizadas dos reservatórios com garantias de 90%, 95% e 100% (Tabela 8). Observa-se que as demandas atuais dos reservatórios Eng. Armando R. Gonçalves e Passagem de Traíras são suficientes para atender os usuários em 100% do tempo. Enquanto que para os demais reservatórios as demandas atuais são superiores em relação às vazões regularizadas. De forma que os mesmos não foram otimizados quando se considerou somente a quantidade.

Tabela 8 - Vazões Regularizadas para garantias de 90%, 95% e 100% no atendimento das demandas.

Reservatório	Demanda (m ³ /s)	Vazão Regularizada (m ³ /s)		
		90%	95%	100%
Eng. Armando R. Gonçalves	16,718	37,50	32,25	22,54
Boqueirão de Parelhas	0,902	0,390	0,315	0,190
Cruzeta	0,938	0,335	0,255	0,070
Itans	0,795	0,655	0,565	0,340
Marechal Dutra	0,799	0,799	0,600	0,310
Passagem de Traíras	0,752	1,850	1,410	0,760

Ao simular os reservatórios sem racionamento por meio da Regra da Política de Operação Padrão (POP) (Figura 8) observa-se que o reservatório Cruzeta foi o que apresentou a menor garantia de abastecimento as demandas prioritárias (D1) e não-prioritárias (D2) fornecendo água para os usuários em somente 58% do tempo.

Figura 8 - Porcentagem do tempo que D1 (à esquerda) e D2 (à direita) receberam a vazão total, parcial e nula no Cenário 1 nos reservatórios: (a) Boqueirão de Parelhas; (b) Cruzeta; (c) Itans e (d) Marechal Dutra.



Atendimento:

□ Total ■ Parcial ■ Nulo

O reservatório Marechal Dutra foi capaz de garantir 90% do atendimento a D1 com nenhum racionamento, sendo necessário otimizá-lo para as confiabilidades de 95% e 100% (Cenários 3 e 4). Para os demais reservatórios, Boqueirão de Parelhas, Cruzeta e

Itans, as garantias foram inferiores a 90% no cenário sem racionamentos (Cenário 1), logo precisou-se otimizar a operação destes reservatórios em todos os demais cenários.

3.2.2. Regra da Curva Guia baseada em Zonas

De modo geral, os resultados da otimização considerando somente aspectos da quantidade de água disponível mostrou que quanto maior for as garantias para atendimento a D1, menores são os fornecimentos totais das vazões alocadas a D2 (Tabela 9). Isto ocorre porque para reservar a água para os usos futuros, principalmente em períodos de estiagens, a fim de evitar escassez hídrica aos usos prioritários, é necessário reduzir as saídas de água mesmo havendo disponibilidades de água. Este fato também foi relatado em outras bacias da região semiárida. Vianna Junior e Lanna (2002) mostraram a necessidade de racionamento das demandas não prioritárias (abastecimento para agricultura) através da operação de reservatórios na bacia do rio Curu no Ceará. Rodrigues et al., (2011) relataram que na Bacia do Rio Piancó na Paraíba foi necessário comprometer os usos menos prioritários para garantir os atendimentos mais prioritários mesmo havendo água armazenada no reservatório.

Tabela 9 - Déficit Hídricos no atendimento as demandas não prioritárias (D2) no período total de simulação (T), no período úmido (U) e no período seco (S).

Reservatório	Cenário	Déficit Hídrico		
		T.	U.	S.
Boqueirão de Parelhas	1	37%	35%	40%
	2	58%	98%	20%
	3	62%	99%	26%
	4	65%	98%	31%
Cruzeta	1	43%	39%	46%
	2	58%	91%	25%
	3	60%	90%	29%
	4	67%	89%	46%
Itans	1	14%	13%	15%
	2	19%	25%	12%
	3	28%	50%	6%
	4	47%	94%	1%
Marechal Dutra	1	10%	10%	10%
	2	-	-	-
	3	16%	27%	5%
	4	44%	83%	5%

No entanto, observa-se nos Cenários 2, 3 e 4 que o racionamento das vazões destinadas a D2 ocorrem principalmente nos períodos úmidos devido ao objetivo de

reduzir os déficits hídricos dos períodos secos, ao contrário do resultado obtido utilizando-se POP no Cenário 1.

Nos reservatórios Boqueirão de Parelhas e Cruzeta, os déficits hídricos no período seco são menores para o Cenário 2. Este fato já era esperado, uma vez que neste cenário, aceita-se uma falha de 10% no atendimento das demandas prioritárias. No entanto, nos reservatórios Itans e Marechal Dutra o comportamento foi diferente, com uma redução no déficit hídrico no período seco a medida que aumenta a garantia no atendimento das demandas prioritárias, ou seja sendo possível fornecer mais água a D2 no Cenário 4. Isto ocorreu porque a otimização da regra de operação utilizada neste trabalho respeita as porcentagens de falhas definidas nos cenários para D1, logo sendo necessário apresentar 10% de falha no Cenário 2 e 5% de falha no Cenário 3, resultando, consequentemente, em déficits hídricos maiores para D2 nos períodos secos.

Nos períodos secos, as vazões fornecidas aos usuários foram, em média, 86% maiores do que as vazões regularizadas para as mesmas garantias desejadas a D1 nos diferentes cenários (Tabela 10). Contudo, para isso ser possível, foi necessário nos períodos úmidos fornecer vazões inferiores às vazões regularizadas na maior parte do tempo.

Tabela 10 - Frequência do tempo em que as vazões fornecidas (QF) a D1 e D2 são superiores à vazão regularizada (QR) para o período total (T), úmido (U) e seco (S).

Reservatório	Cenário	QF $\geq$ QR		
		T.	U.	S.
Boqueirão de Parelhas	2	45%	2%	88%
	3	49%	2%	94%
	4	45%	2%	88%
Cruzeta	2	40%	10%	70%
	3	37%	8%	66%
	4	49%	12%	86%
Itans	2	66%	60%	72%
	3	49%	6%	92%
	4	52%	6%	98%
Marechal Dutra	2	-	-	-
	3	78%	62%	94%
	4	58%	18%	98%

Ao analisar os valores de V1 e V2 e de α_{21} (Figuras 9, 10, 11 e 12) verifica-se que o racionamento nas demandas não prioritárias no período úmido inicia-se quando o reservatório se encontra próximo da capacidade máxima. Inclusive, os reservatórios

Boqueirão de Parelhas, Cruzeta e Itans praticamente não atendem totalmente aos usos não prioritários no período úmido, ou seja o volume limite para o início do racionamento em D2 encontra-se muito próximo ao nível do volume máximo. Isto ocorre porque os reservatórios guardam água para atender a estes usos no período seco.

É interessante observar que ao fazer este racionamento no período úmido (época em que os agricultores podem ter outras fontes hídricas) os reservatórios conseguem atender totalmente as demandas não prioritárias em mais de 60% do tempo durante os períodos secos, no cenário 2, ou seja, quando aceita 10% de falha no atendimento das demandas prioritárias. Os reservatórios Itans e Marechal Dutra conseguem inclusive atender totalmente as demandas não prioritárias em mais de 80% do tempo mesmo no Cenário 4, no qual há 100% de garantia nas demandas prioritárias.

Figura 9 - Valores de V1, V2 e α_{21} otimizados em Boqueirão de Parelhas para o Cenário 2 (a), Cenário 3 (b) e Cenário 4 (c).

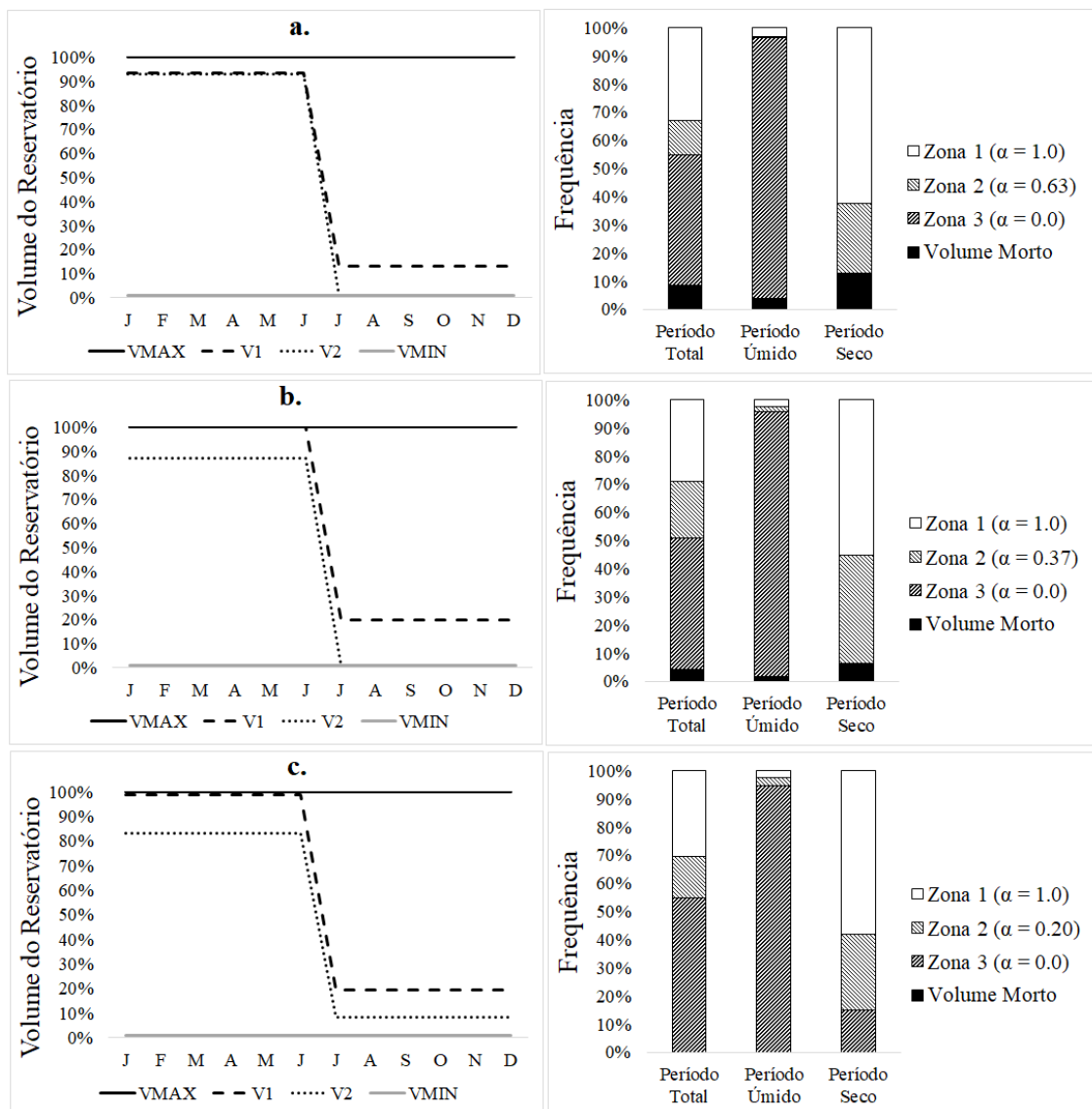


Figura 10 - Valores de V1 e V2 e α_{21} otimizados em Cruzeta para o Cenário 2 (a), Cenário 3 (b) e Cenário 4 (c)

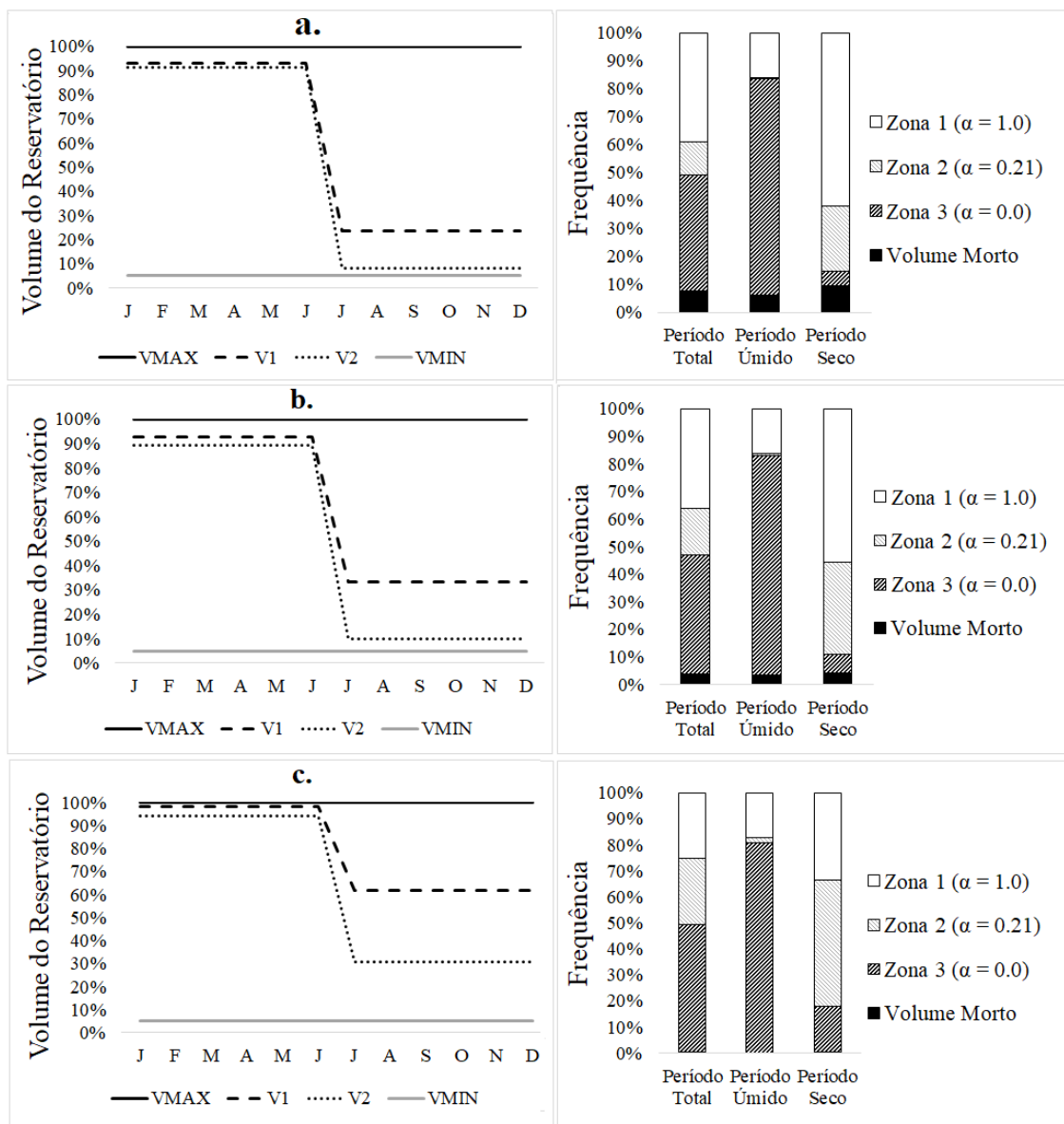


Figura 11 - Valores de V1 e V2 e α_{21} otimizados em Itans para o Cenário 2 (a), Cenário 3 (b), Cenário 4 (c).

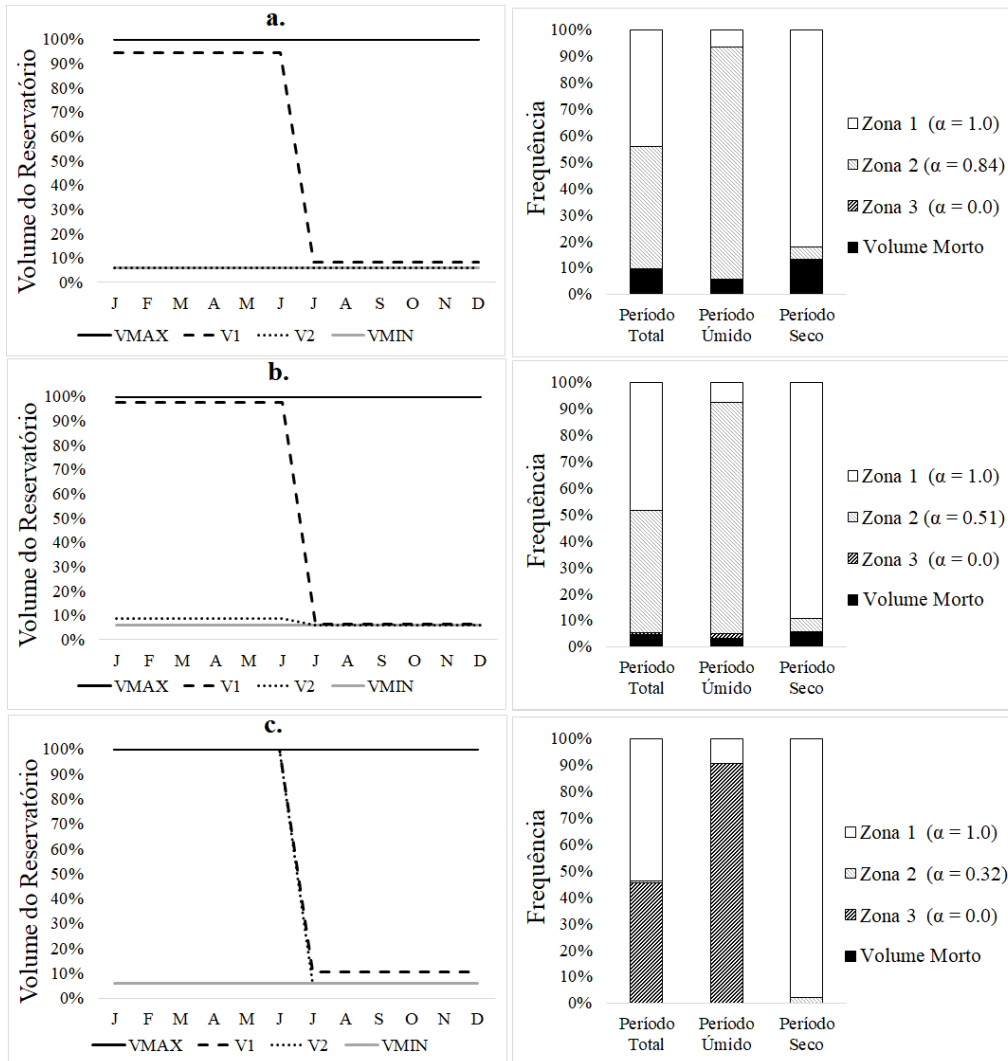
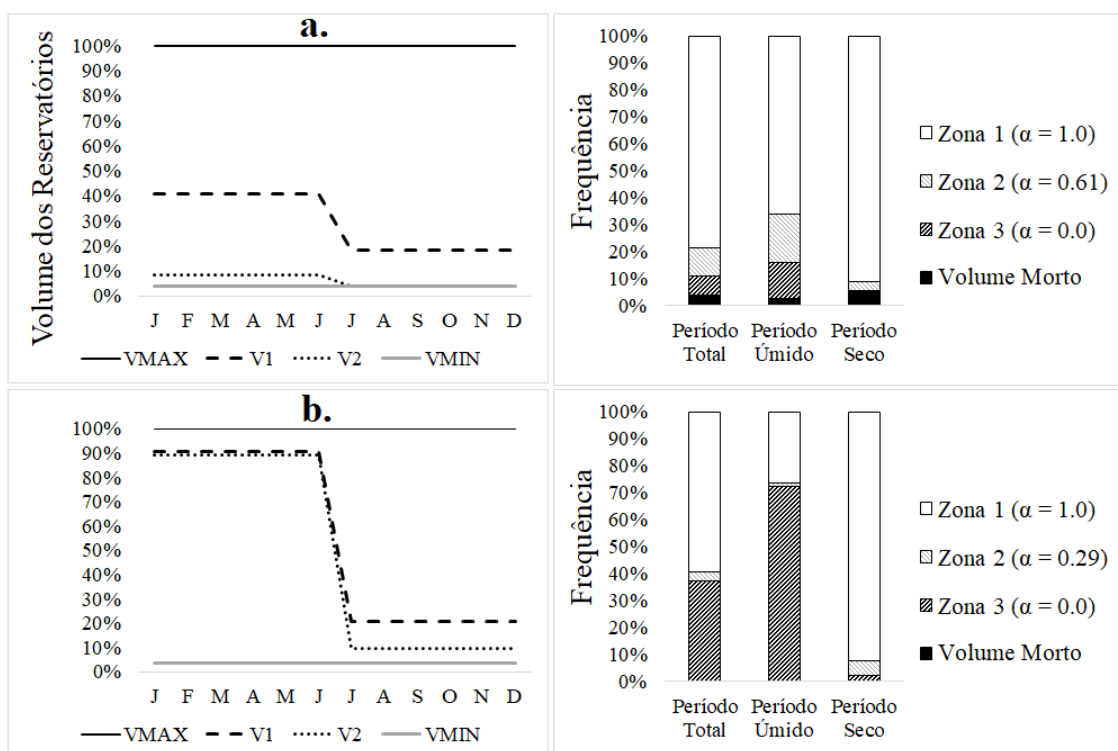


Figura 12 - Valores de V1 e V2 e α_{21} otimizados em Marechal Dutra para o Cenário 3 (a), Cenário 4 (b).



Com isso, é verificado que a aplicação da Curva Guia baseada em Zonas para atender as garantias desejadas a D1, reduz a escassez hídrica nos períodos secos, resultando em maiores garantias de atendimento aos usuários em relação a POP (Figura 9). Além disso, nos períodos secos foi capaz de fornecer vazões superiores às vazões regularizadas, resultando na possibilidade de maiores usos de água nesses períodos sem prejudicar as garantias de abastecimento a D1 (Tabela 10). Essa comparação entre as regras de operação também foi verificada em outros estudos (Wang et al., 2017; Wang et al., 2018; Xu et al., 2019; Men et al., 2019a), resultando também em menores escassez hídricas com a aplicação da Curva Guia baseada em Zonas.

Os resultados obtidos mostraram que o uso das duas funções objetivos foi essencial, uma vez que otimizar somente se preocupando em minimizar os déficits hídricos poderia implicar em diminuição nas frequências de atendimento, visto que seria priorizado a entrega total das vazões demandadas e, conseqüentemente, os volumes armazenados nos reservatórios seriam reduzidos mais rapidamente, como foi observado por Xu et al. (2017), levando ao aumento da frequência dos volumes armazenados na Zona 3 e Volume Morto. Por isso, a FO2 possuiu um papel importante na otimização dos fornecimentos de água, pois permitiu minimizar a frequência dos não atendimentos as

demandas nas estações secas, priorizando os racionamentos na Zona 2 para que as demandas possam receber quantidades de água por mais tempo possível.

Esses reservatórios passam muito tempo sem abastecer as cidades devido às ocorrências de secas e estiagens, assim, o Plano da Bacia classifica as sedes municipais abastecidas por esses reservatórios em baixa garantia hídrica para o abastecimento humano, com exceção dos municípios abastecidos pela barragem Eng. Armando R. Gonçalves e o açude Itans, classificados como elevada e média garantia, respectivamente (ANA, 2016). Como exemplo, devido à seca que ocorreu entre os anos de 2012 e 2017, a Companhia de Água e Esgotos do estado do Rio Grande do Norte precisou adotar o sistema de rodízio em 81 cidades para economizar água, incluindo os municípios abastecidos pelos reservatórios analisados neste trabalho (Tribuna do Norte, 2019).

Portanto, como a região do semiárido possui secas prolongadas, além da análise dos déficits hídricos, é importante também averiguar se as falhas de atendimento as demandas acontecem distribuídas ou concentradas durante os anos analisados, principalmente nos respectivos períodos secos. Com isso, o intervalo máximo sem abastecimento e a porcentagem de anos cujo período seco não alocou água por mais de três meses seguidos foram analisados para auxiliar na análise dos desempenhos dos reservatórios (Tabela 11).

Apesar de que em períodos úmidos os usuários de irrigação possuem a chuva como outra fonte alternativa de água e, deste modo, as restrições de fornecimento de água estabelecido nas regras de operação na estação chuvosa não afetaria muito as atividades agrícolas, existem secas prolongadas na região semiárida nas quais não há indícios de chuva nem mesmo nos períodos úmidos (Alvalá *et al.*, 2017). Portanto, é importante também considerar os intervalos máximos sem atendimento a D2 na análise da regra de operação mais satisfatória.

Tabela 11 – Intervalos sem atendimentos e número de falhas para D1 e D2 considerando somente quantidade na otimização das regras de operação.

Reservatório	Cenário	Intervalo máximo sem atendimento (meses)		Nº Falhas total (%)	Nº Falhas no período seco (%)	Períodos secos
		D1	D2			sem atender por ≥ 3 meses
Boqueirão de Parelhas	1	20	20	40%	21%	41%
	2	9	18	66%	16%	12%
	3	6	11	69%	19%	7%
	4	0	32	68%	18%	12%
Cruzeta	1	23	23	46%	24%	55%
	2	9	20	60%	15%	8%
	3	6	20	63%	17%	5%
	4	0	34	72%	27%	15%
Itans	1	9	9	16%	8%	14%
	2	9	9	55%	7%	13%
	3	9	10	51%	4%	4%
	4	0	6	48%	1%	0%
Marechal Dutra	1	8	8	11%	5%	10%
	2	-	-	-	-	-
	3	6	10	22%	3%	7%
	4	0	10	45%	3%	1%

Para o atendimento das demandas D1, observa-se que operar o reservatório sem nenhum tipo de racionamento (Cenário 1) resulta em maiores intervalos sem abastecimento em todos os reservatórios. Assim, sem dúvida, a aplicação das regras de operação dos Cenários 2, 3 e 4 beneficiam os atendimentos dos usos prioritários, diminuindo os intervalos sem abastecimento à medida que se aumenta as garantias (Tabela 11). Já para D2, não existe um padrão que define o cenário com maior e menor intervalo de meses máximo sem atendimento, variando em cada reservatório. No entanto, observa-se que as durações sem atendimento a D2 nos reservatórios Boqueirão de Parelhas e Cruzeta são bastante elevados em relação a D1, principalmente nos Cenários 4, nos quais pode chegar a quase 03 (três) anos consecutivos sem fornecer água a D2 (Tabela 11).

Esses reservatórios passam muito tempo sem abastecer as cidades devido às ocorrências de secas e estiagens, assim, o Plano da Bacia classifica as sedes municipais abastecidas por esses reservatórios em baixa garantia hídrica para o abastecimento humano, com exceção dos municípios abastecidos pela barragem Eng. Armando R. Gonçalves e o açude Itans, classificados como elevada e média garantia, respectivamente

(ANA,2016). Como exemplo, devido à seca que ocorreu entre os anos de 2012 e 2017, a Companhia de Água e Esgotos do estado do Rio Grande do Norte precisou adotar o sistema de rodízio em 81 cidades para economizar água, incluindo os municípios abastecidos pelos reservatórios analisados neste trabalho (Tribuna do Norte, 2019).

Os períodos sem atendimento a D2 estão associadas aos períodos em que as precipitações estiveram sistematicamente abaixo da média anual, indicando períodos críticos de seca, como, por exemplo, entre os anos de 1930 a 1934 e os anos de 1950 a 1962 em Boqueirão de Parelhas e Cruzeta (Figura 13 e Figura 14). É importante observar nestes períodos críticos a regra de operação considerando 100% de garantia para D1, o que é o desejado pela população urbana da região, foi verificada maior duração de meses seguidos sem atendimento à D2, sendo inclusive superior ao Cenário 1. Portanto, os gestores responsáveis pela operação dos reservatórios precisam avaliar se atender 100% de D1 em todo o período é a melhor opção socioeconômica para a região de estudo, uma vez que as atividades econômicas, usos não prioritários segundo a Lei nº 9.433/1997, ficam bastante comprometidas neste cenário.

Figura 13 - Precipitação anual e atendimentos anuais das demandas para o Cenário 4 em Boqueirão de Parelhas.

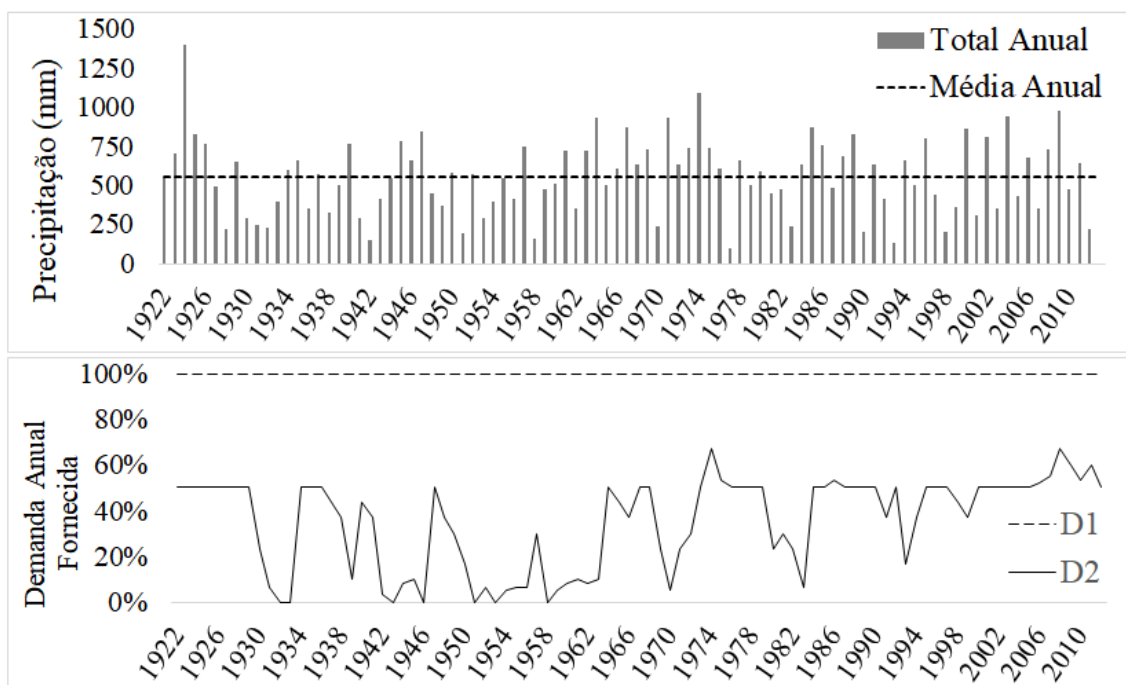
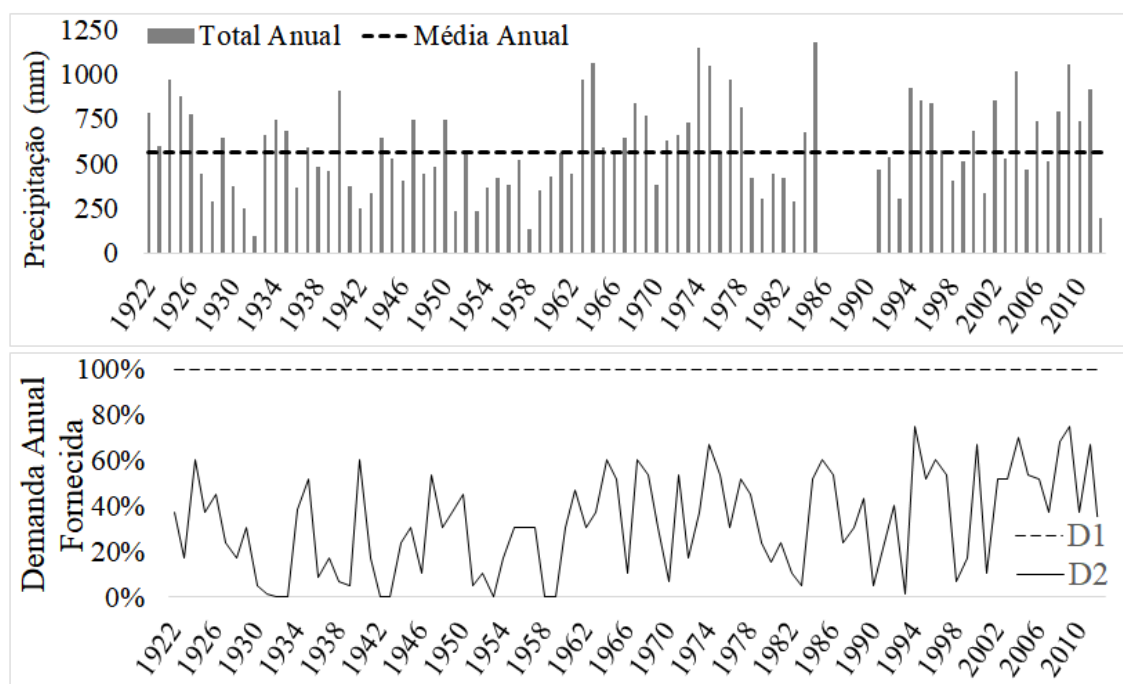


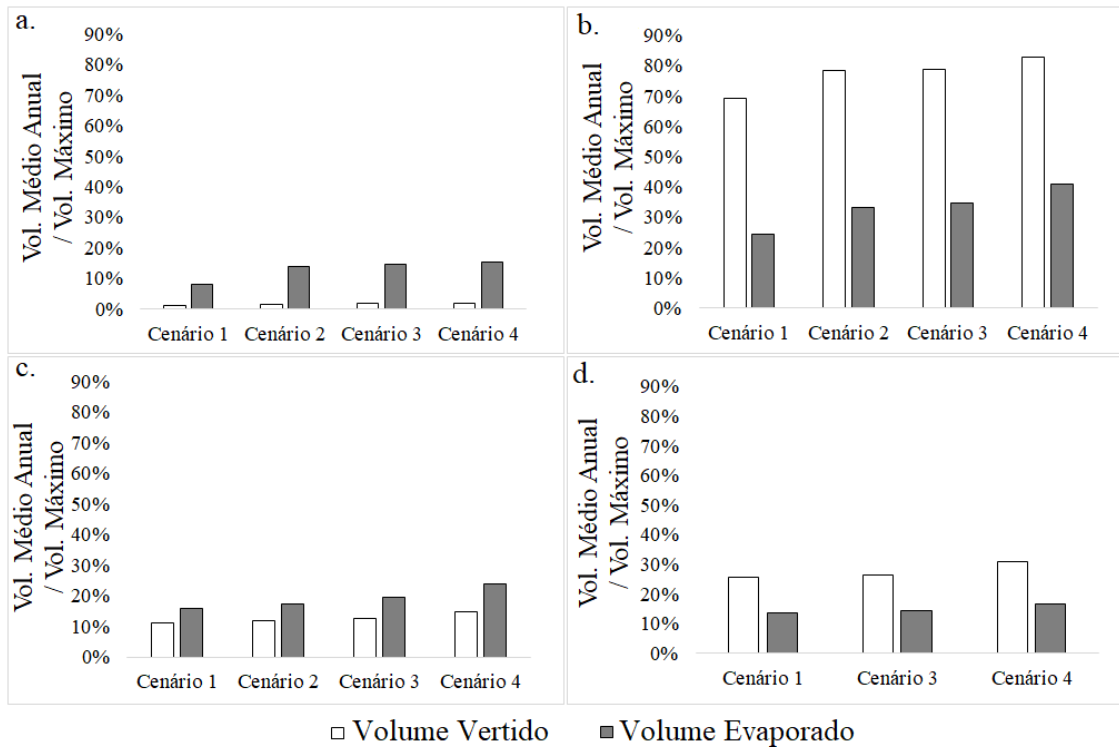
Figura 14 - Precipitação anual e atendimentos anuais das demandas para o Cenário 4 em Cruzeta.



Observa-se também que nos cenários com racionamentos, o número de falhas total aumenta em relação ao Cenário 1, isto ocorre porque o atendimento parcial é considerado falha, no entanto as falhas no período seco são inferiores, ou seja, indicando maiores ocorrências de falhas durante o período úmido. Além disso, o número de períodos secos sem atendimento por 3 (três) meses ou mais é relativamente baixo, indicando que a otimização realizada nos Cenários 2, 3 e 4 reduzem a concentração dos não atendimentos na estação seca em comparação com a do Cenário 1 (Tabela 11).

Como visto, para atender as garantias desejadas no abastecimento a D1 foi necessário aumentar os racionamentos a D2 nos períodos úmidos a fim de elevar os volumes de água armazenados nos reservatórios para que seja possível abastecer nos períodos secos. Isso acaba resultando em maiores níveis volumétricos nos períodos chuvosos, o que intensifica os vertimentos bem como o aumento da área de espelho d'água nos períodos secos causando maiores evaporações (Figura 15). Silva (2019) também relatou aumentos de evaporação e vertimento em vários reservatórios da mesma bacia hidrográfica Piancó-Piranhas Açú, à medida que as regras de operação se tornam mais restritivas.

Figura 15 - Volumes vertidos e evaporados nos reservatórios Boqueirão de Parelhas (a), Cruzeta (b), Itans (c) e Marechal Dutra (d).



Analisando as perdas entre os cenários, observa-se que nos reservatórios Boqueirão de Parelhas e Cruzeta os principais aumentos ocorrem na mudança do tipo de regra de operação, entre os Cenários 1 e 2, sendo o maior aumento equivalente a 17% em Cruzeta. Já nos reservatórios Itans e Marechal Dutra os maiores acréscimos estão na mudança para o Cenário 4. Apesar disso, o aumento das perdas ao variar as garantias de atendimento a D1 entre os cenários com racionamentos não foram muito significativas, sendo a maior variação equivalente a 12% entre os Cenários 2 e 4 no reservatório Cruzeta. Nos reservatórios Boqueirão de Parelhas e Itans as principais perdas de água são devido a evaporação e nos reservatórios Cruzeta e Marechal Dutra as principais perdas são por vertimento.

De modo geral, a média das perdas anuais por evaporação em relação à capacidade máxima no Cenário 4 foram da ordem de 15% em Boqueirão de Parelhas; 41% em Cruzeta; 24% em Itans; e 17% em Marechal Dutra. Isso mostra que as perdas de água por evaporação nos reservatórios são elevadas, principalmente em Cruzeta. Campos *et al.*, (2003) e Medeiros (2016) verificaram que os reservatórios com maiores capacidades de armazenamento são mais resistentes aos eventos de seca em relação aos de menores capacidade de acumulação, relatando que os primeiros possuem menores percentuais de

perdas por evaporação em relação aos segundos. Com isso, observa-se que o reservatório Cruzeta por ter dimensões menores sofre maiores perdas por evaporação em relação aos demais reservatórios. Em Boqueirão de Parelhas as evaporações são as menores uma vez que sua capacidade de acumulação é a maior.

Outro fato a ser ressaltado é que os reservatórios desta região, de modo geral, apresentam poucos períodos com vertimento. No entanto, apresentam elevados volumes de água perdidos por extravasamentos. Por exemplo, no reservatório Cruzeta foi observado no Cenário 1 que o nível volumétrico ultrapassa o volume máximo somente em 7% do período analisado, porém são vertidos elevados volumes de água (Figura 15.b), chegando a ser perdido em um mês um volume oito vezes maior do que a capacidade de armazenamento. Observa-se então que a média do volume vertido anualmente, mesmo sem racionamentos de D2, é de aproximadamente 70% da capacidade máxima do reservatório, mostrando que as dimensões do reservatório Cruzeta não são capazes de evitar grandes perdas por vertimento, chegando a ser de 83% no Cenário 4.

Nos demais reservatórios as mesmas ficam na ordem de 2% em Boqueirão de Parelhas; 15% em Itans; e 31% em Marechal Dutra. De acordo com Silva (2019), os reservatórios com relações entre volume máximo e vazão afluente baixas tendem a apresentar um elevado percentual de vertimento. Como é o caso dos reservatórios Cruzeta e Marechal Dutra, já no reservatório Boqueirão de Parelhas essa relação é alta (ANA, 2019).

Deste modo as funções objetivos utilizadas neste trabalho não otimizaram as perdas por vertimento e evaporação dos reservatórios estudados. No entanto, de acordo com Nunes *et al.*, (2016), é possível minimizar essas perdas de água através da regra de curva guia utilizada para essa finalidade, ou seja, utilizando, em períodos de maiores influxos, parte da água que seria vertida ou perdida por evaporação.

3.3. ANÁLISE DA QUALIDADE NAS OTIMIZAÇÕES CONSIDERANDO QUANTIDADE

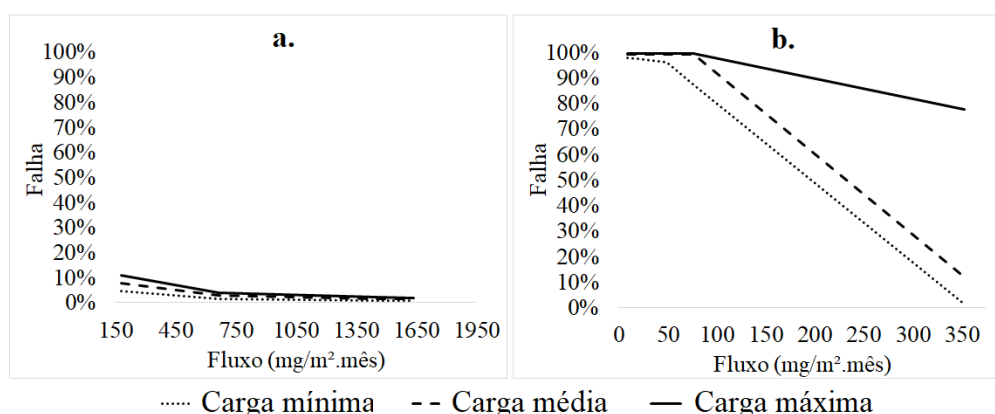
Para verificar a frequência com que os reservatórios ficam com concentrações de fósforo acima da permitida pela resolução CONAMA nº 357/2005 para corpos hídricos Classe 2, os reservatórios foram simulados considerando as regras de operação otimizadas anteriormente. Nesta simulação considerou-se como falha quando o reservatório não consegue atender completamente as demandas prioritárias (D1) ou quando o valor de

concentração de fósforo é superior aos limites permitidos, ambas ocorrendo simultaneamente ou isoladas.

Em todos os reservatórios verifica-se que o número de falhas aumenta em todos os cenários estudados quando comparado com a simulação considerando só quantidade (Figura 16, 17, 18 e 19). Observa-se que para o Cenário 4, quando o atendimento de D1 deveria ser de 100%, o número de falhas cresce sensivelmente, sendo possível atender D1 com essa garantia somente se as cargas afluentes forem mínimas e os fluxos de fósforo forem elevados. No entanto, quando os fluxos de fósforo são reduzidos e as cargas afluentes de fósforo são elevadas os número de falhas são próximos a 100% em quase todos os reservatórios. Em Marechal Dutra e Cruzeta, mesmo as cargas afluentes sendo mínimas as falhas são próximas de 90%, enquanto em Boqueirão de Parelhas e Itans são próximos de 20%.

Nos reservatórios Eng. Armando R. Gonçalves e Passagem de Traíras que não apresentaram falhas ao simular a operação considerando somente a quantidade, após adicionar o balanço de fósforo, foi visto que existiram falhas no abastecimento. Na Eng. Armando R. Gonçalves, as falhas podem ser superiores a 10% em situações com baixos fluxos de fósforo e elevadas cargas afluentes (Figura 16.a). Já no reservatório Passagem de Traíras pode ocorrer falhas em praticamente 100% do tempo, a qual é reduzida quando o fluxo de fósforo for elevado, principalmente se as cargas afluentes forem baixas (Figura 16.b).

Figura 16 - Variação do número de falhas em relação às cargas afluentes e fluxos de fósforo para o Cenário 1 em Armando R. Gonçalves (a) e em Passagem de Traíras (b).



Em todos os reservatórios estudados, foi verificada uma redução no número de falhas com o aumento do Fluxo de fósforo. Este é um resultado esperado, uma vez que o Fluxo representa a saída de fósforo do sistema. Resultado semelhante é observado com

relação a carga, ou seja, quanto maior a carga, maior o número de falhas. Logo, quanto menor a carga de fósforo, menor serão as concentrações no interior do reservatório. Esse fato também foi visualizado por Kuo *et al.*, (2006) que observaram a redução do estado eutrófico no reservatório após otimizar as cargas afluentes de fósforo.

É interessante observar que nos cenários com 100% de atendimentos aos usuários prioritários, se as cargas afluentes forem mínimas e os fluxos de fósforo forem elevados, praticamente não há aumentos das falhas devido aos critérios de qualidade (Figuras 17, 18, 19 e 20). Isso mostra que, nessa situação, ao otimizar as regras de operação considerando somente a quantidade, o aumento dos volumes armazenados devido os racionamentos de D2 são suficientes para diluir as concentrações de fósforo e não comprometer a qualidade da água.

Figura 17 - Variação do número de falhas em relação às cargas afluentes e fluxos de fósforo para o Cenário 1 (a), Cenário 2 (b), Cenário 3 (c) e Cenário 4 (d) em Boqueirão de Parelhas.

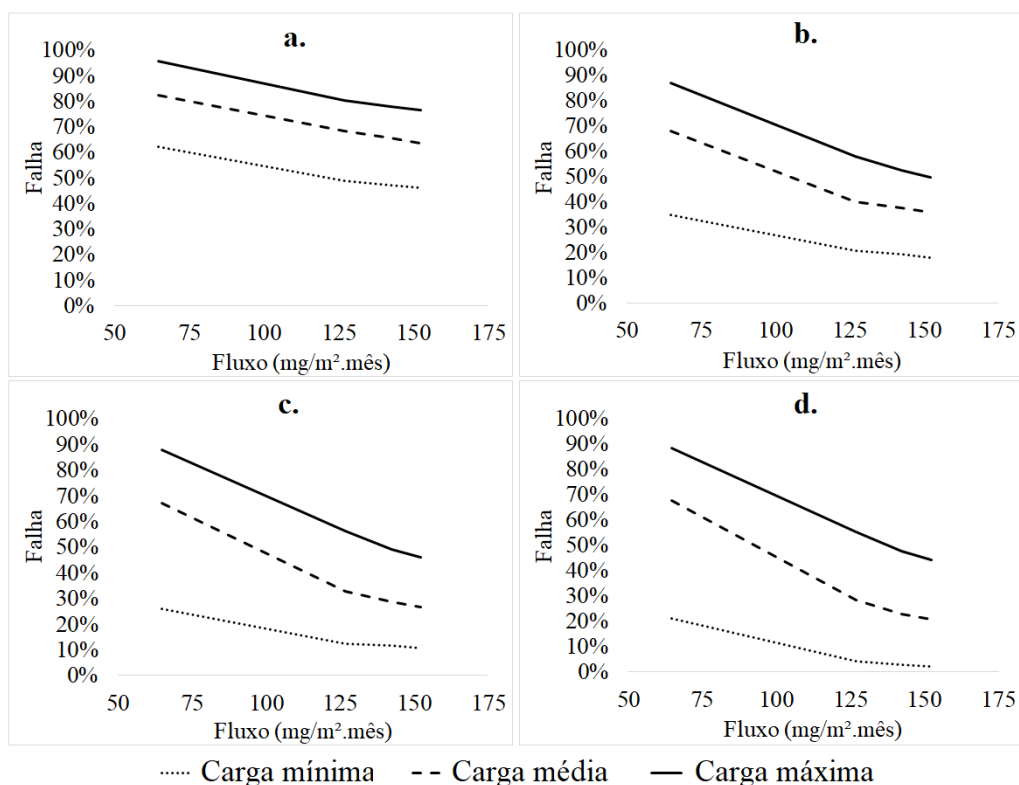


Figura 18 - Variação do número de falhas em relação às cargas afluentes e fluxos de fósforo para o Cenário 1 (a), Cenário 2 (b), Cenário 3 (c) e Cenário 4 (d) em Cruzeta.

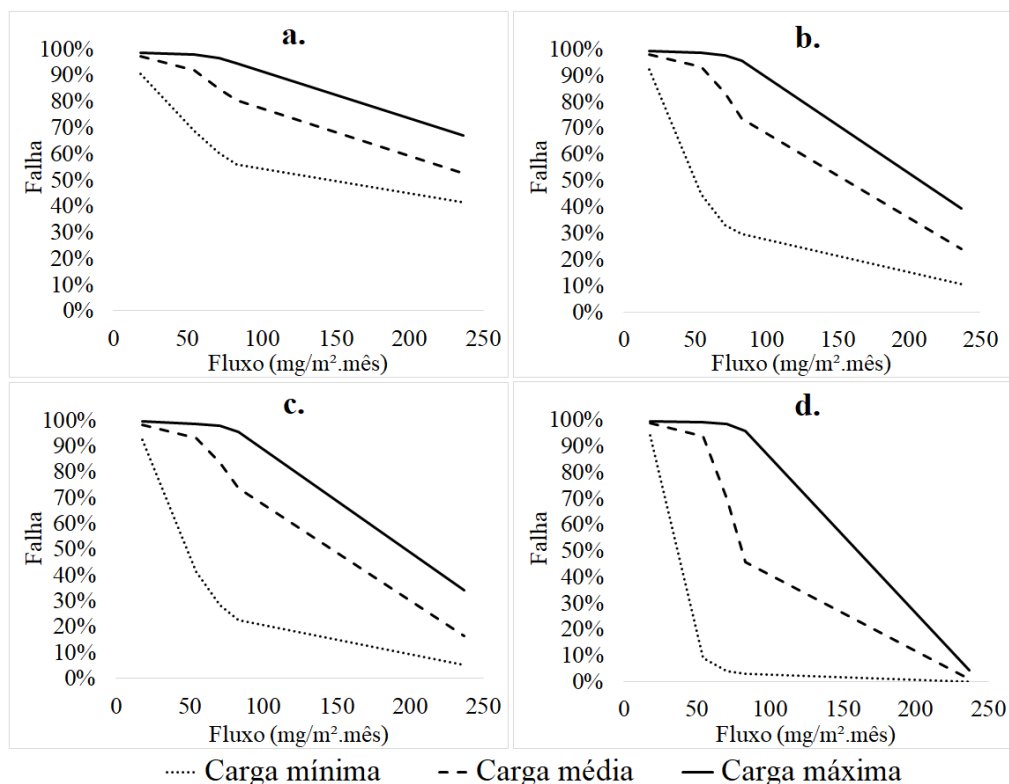


Figura 19 - Variação do número de falhas em relação às cargas afluentes e fluxos de fósforo para o Cenário 1 (a), Cenário 2 (b), Cenário 3 (c) e Cenário 4 (d) em Itans.

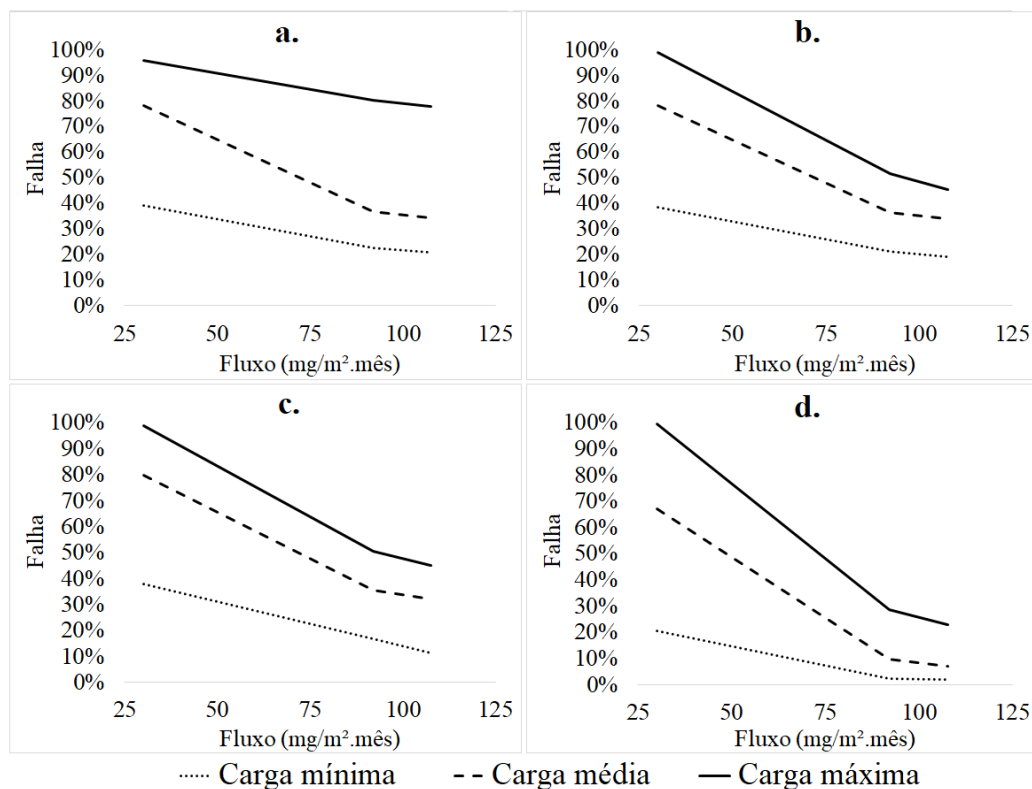
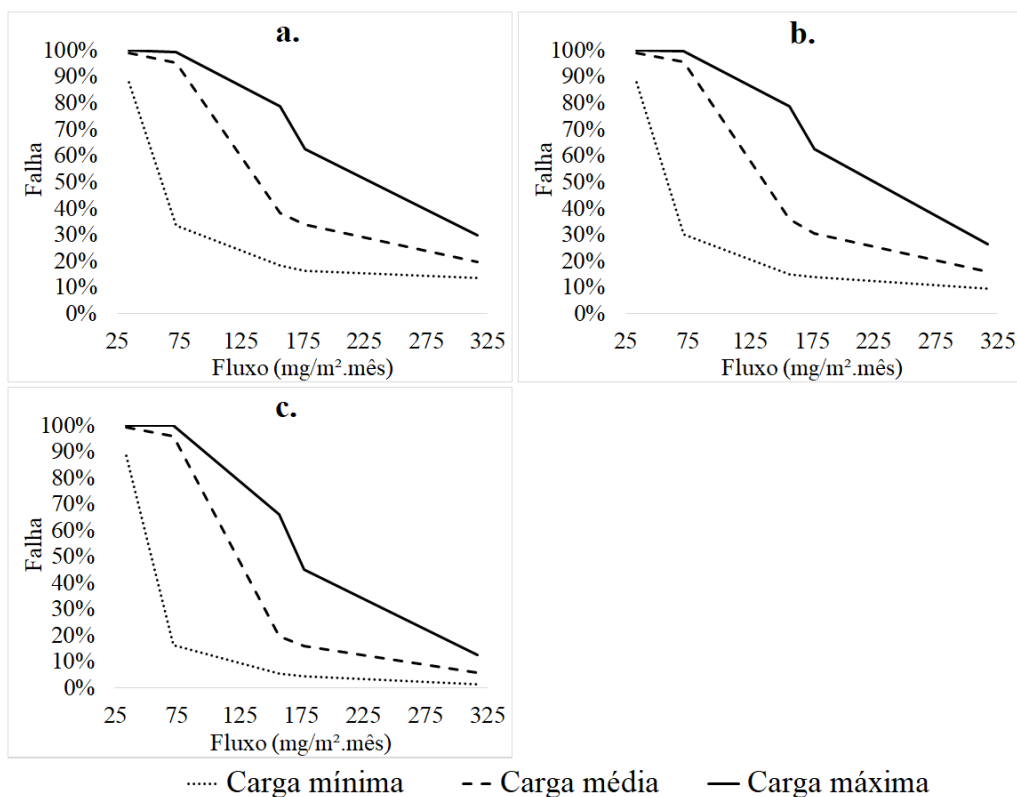


Figura 20 - Variação do número de falhas em relação às cargas afluentes e fluxos de fósforo para o Cenário 1 (a), Cenário 3 (b) e Cenário 4 (c) em Marechal Dutra.



Nos reservatórios Cruzeta e Marechal Dutra, se os fluxos de fósforo forem baixos e as cargas afluentes forem elevadas, aumentar os racionamentos das demandas não prioritárias para que o volume armazenado seja maior não é suficiente para diminuir as concentrações de fósforo, sendo necessário melhorar a qualidade das vazões afluentes. Pois, neste caso, se as cargas forem baixas, à medida que o fluxo aumenta, menos falhas serão atingidas. Já quando o fluxo é elevado, racionar os fornecimentos de água dos usuários não prioritários traz vantagens, pois em situações com maiores volumes armazenados, as falhas são menores (Figura 18 e 20).

Estes resultados mostram que adotar regras de operação otimizadas para atender aos usuários em quantidades satisfatórias sem considerar a qualidade da água pode acarretar distribuições de águas com qualidade imprópria em vários momentos. Mostrando a importância de adicionar os critérios de qualidade nas otimizações das regras de operação principalmente nos reservatórios do semiárido, que de modo geral são vulneráveis ao processo de eutrofização (Panosso *et al.*, 2007; Sousa, 2007; Barbosa *et*

al., 2012) devido as altas perdas por evaporação durante o período seco que elevam as concentrações de fósforo (Miranda, 2014).

Atualmente, na prática, todos os reservatórios estudados são operados considerando somente a quantidade e ainda sem nenhuma otimização, o que resulta no comprometimento da qualidade dos reservatórios em boa parte do tempo como foi visto por Panosso *et al.*, (2007); Chellapa *et al.*, (2009); Vasconcelos, (2011); Oliveira, (2012) e Rocha Júnior *et al.*, (2018). Na verdade, os resultados do Cenário 1, ou seja, com aplicação da Regra da Política de Operação Padrão, espelham bem a realidade observada nos reservatórios, apresentando altas concentrações de fósforo.

Verificou-se que quanto maior a carga de fósforo afluente ao reservatório, maior o número de falhas. Por tanto, é necessário minimizar as cargas afluentes de fósforo para que seja possível otimizar as regras de operação a fim de atender as garantias desejadas para os usuários prioritários. No entanto, a ocupação do solo existente nas bacias hidrográficas desses reservatórios pode dificultar a redução das entradas do nutriente, principalmente durante o período chuvoso quando ocorre o maior carreamento de partículas do solo da bacia para o reservatório. Aumentos nas concentrações de fósforo no início do período chuvoso em reservatórios do semiárido foram visualizados por Bezerra *et al.*, (2014b).

No reservatório Boqueirão de Parelhas, apesar da ocupação do solo no seu entorno por atividades poluidoras como agricultura, pecuária e mineração ser de pequenas dimensões (Miranda, 2014), de acordo com Melo (2019), a zona ripária do reservatório é ocupada principalmente por solo exposto, o qual possui valores elevados de fósforo que podem ser carreados para as águas do reservatório em períodos de chuva. Essas mesmas características de ocupação da zona ripária também foram observadas no reservatório Itans (Melo, 2019).

No município Cruzeta, as atividades econômicas predominantes são o plantio de culturas e a pecuária extensiva (CPRM, 2005). Segundo Ferreira (2015), o solo utilizado por essas atividades apresenta valores altos de fósforo, além disso Cruzeta não possui Sistema de Esgotamento Sanitário, existindo apenas grandes fossas sépticas criadas pela prefeitura, localizadas as margens do reservatório, que atendem parte da cidade. De acordo com o mesmo autor, outra possível fonte de fósforo é o uso do sedimento do reservatório por olarias que pode devolver ao corpo aquático o fósforo que estava contido no fundo do reservatório através da erosão das pilhas de sedimento tornando-o disponível na coluna d'água.

As elevadas concentrações de fósforo no reservatório Passagem de Traíras estão associadas às atividades presentes na bacia: pecuária, agricultura, ocupação urbana, e mineração. Dentre essas, a pecuária apresenta o maior percentual de área (54,42%), favorecendo a degradação da qualidade da água por apresentar maiores teores de fósforo e maior quantidade de solo erodido (Medeiros, 2016).

No entanto também foi visto que somente a redução das fontes de poluição podem não ser suficientes para um adequado atendimento das demandas prioritárias, sendo necessário também racionamentos das demandas não prioritárias para que os volumes armazenados sejam maiores. Foi verificado que a influência das variáveis (carga afluyente e fluxo de fósforo) na ocorrência das falhas de atendimento, é mais impactante à medida que aumenta-se os racionamentos, mostrando que maiores volumes armazenados possuem grande influência nas concentrações de fósforo. Jepessen *et al.* (2015), Santos *et al.*, (2017) e Cavalcante *et al.*, (2018) confirmam essa relação indireta entre volumes armazenados e concentração de nutrientes. Assim, subentende-se que a diminuição das saídas de água favorece as reduções nas concentrações de fósforo no reservatório. No entanto, Oliveira (2019) mostrou que em situações nas quais as vazões afluentes possuem baixas concentrações de fósforo, a maior retirada de água passa a ser um fator positivo, pois implica renovação da água armazenada, diminuindo a retenção de fósforo no reservatório. Além disso, maiores saídas de água, reduzem o tempo de residência da água e, conseqüentemente, a retenção de fósforo no reservatório (Bezerra *et al.*, 2014b; Londe *et al.*, 2016; Waters & Webster-Brown, 2016; Morales-Marín *et al.*, 2017).

Como o esperado, foi visto que há menos falhas nos reservatórios quando ocorre menores cargas afluentes e maiores fluxo de fósforo, sendo, portanto, essa situação a mais favorável, já o inverso mostra a condição mais desfavorável, ou seja, com maior carga afluyente e menor fluxo de fósforo. Com base neste fato, foram definidas as situações favorável, intermediária e desfavorável das condições de fósforo para a operação dos reservatórios considerando a qualidade da água. A Tabela 12 apresenta as cargas afluentes e os fluxos de fósforo de cada situação em cada reservatório.

Tabela 12 - Variáveis adotadas no balanço de massa do fósforo para situação favorável, intermediária e desfavorável.

Reservatório	Situação	Carga Afluente (Kg/mês)	Fluxo de Fósforo (mg/m ² .mês)
Armando Ribeiro Gonçalves	Favorável	7354	1636,64
	Intermediária	7354	178,98
	Desfavorável	22062	178,98
Boqueirão de Parelhas	Favorável	304	152,30
	Intermediária	911	142,48
	Desfavorável	911	64,65
Cruzeta	Favorável	280	236,73
	Intermediária	280	54,37
	Desfavorável	840	18,05
Itans	Favorável	254	107,64
	Intermediária	761	92,15
	Desfavorável	761	30,14
Marechal Dutra	Favorável	480	316,82
	Intermediária	1440	177,00
	Desfavorável	1440	34,04
Passagem de Traíras	Favorável	1520	352,96
	Intermediária	4560	352,96
	Desfavorável	4560	8,84

Observa-se que a situação intermediária não segue um padrão do tipo de carga afluente e fluxo de fósforo utilizado, sendo definido diferentemente para cada reservatório a partir do número de falhas. Por isso, nos reservatórios Boqueirão de Parelhas, Itans, Marechal Dutra e Passagem de Traíras as cargas afluentes máximas representam a situação intermediária de balanço de fósforo, indicando ser possível mitigar as falhas por qualidade apenas minimizando as cargas afluentes de fósforo. Já em Cruzeta e na Eng. Armando R. Gonçalves a situação intermediária é representada pela carga afluente mínima, logo o aumento das concentrações de fósforo entre as condições favoráveis e intermediárias se deve exclusivamente pela diminuição do fluxo no interior do reservatório, sendo difícil o controle para minimizar as falhas.

3.4. ANÁLISE DAS REGRAS DE OPERAÇÃO CONSIDERANDO QUANTIDADE E QUALIDADE

A otimização considerando a qualidade da água mostrou que na condição desfavorável do balanço de massa de fósforo, nenhum dos reservatórios foi capaz de abastecer as demandas prioritárias nas garantias desejadas devido as elevadas falhas de qualidade (Tabela 13). Mesmo sem fornecer água para os usuários não prioritários em todo o período, as concentrações de fósforo não alcançaram os valores permitidos. Isso mostra que o aumento do volume armazenado não foi capaz de diluir as concentrações de fósforo provenientes das altas cargas de entrada e dos baixos fluxos de fósforo no interior do reservatório.

Tabela 13 - Déficits Hídricos dos atendimentos a D2 no período total de simulação (T), no período úmido (U) e no período seco (S) considerando qualidade na otimização das regras de operação.

Reservatório	Cenário	Déficits Hídricos								
		Situação Favorável			Situação Intermediária			Situação Desfavorável		
		T.	U.	S.	T.	U.	S.	T.	U.	S.
Boqueirão de Parelhas	2	58%	92%	25%	85%*	97%*	74%*	-	-	-
	3	64%	96%	31%	-	-	-	-	-	-
	4	70%	98%	42%	-	-	-	-	-	-
Cruzeta	2	58%	87%	27%	74%	88%	60%	-	-	-
	3	60%	88%	34%	80%	84%	77%	-	-	-
	4	67%	89%	45%	-	-	-	-	-	-
Itans	2	19%	32%	6%	50%	83%	18%	-	-	-
	3	25%	48%	2%	58%	90%	26%	-	-	-
	4	44%	83%	2%	81%*	88%*	74%*	-	-	-
Marechal Dutra	2	14%	21%	8%	72%*	79%*	65%*	-	-	-
	3	34%	66%	4%	-	-	-	-	-	-
	4	44%	82%	6%	-	-	-	-	-	-
Passagem de Traíras	4	13%	26%	0%	-	-	-	-	-	-

*Cenário otimizado considerando o corpo hídrico como Classe 3.

Na situação intermediária, somente os reservatórios Cruzeta e Itans conseguiram atender as demandas nos Cenários 2 e 3, quando considerado os corpos hídricos como Classe 2. Os reservatórios Boqueirão de Parelhas e Marechal Dutra só foram otimizados para o Cenário 2 quando se considerou como Classe 3. Nas garantias maiores de abastecimento dos usos prioritários (Cenário 4) os reservatórios estudados não foram

possíveis de serem otimizados, com exceção do Itans que consegue atender os usos prioritários quando considerado de Classe 3.

Na situação favorável, todos os reservatórios foram otimizados, com exceção da barragem Eng. Armando R. Gonçalves que não foi otimizado em nenhuma situação, pois, na situação favorável, independentemente dos racionamentos das vazões fornecidas a D2, as garantias de abastecimento a D1 sempre seriam de 99%, já na situação intermediária e desfavorável as garantias seriam reduzidas para 96% e 89%, respectivamente. Já para Passagem de Traíras, não foi necessário otimizar os Cenários 2 e 3, pois a Regra da Política de Operação Padrão (POP) já garante 99% do abastecimento a D1.

Nos reservatórios Cruzeta e Itans, os fornecimentos de água a D2 no período total foram praticamente os mesmos dos encontrados quando considerou somente a quantidade (Tabela 13 e Tabela 9). Já nos reservatórios Boqueirão de Parelhas e Marechal Dutra, verificou-se aumentos dos déficits hídricos totais no atendimento a D2.

Por outro lado, foi observado em Boqueirão de Parelhas e Cruzeta uma leve redução dos déficits do atendimento a D2 no período úmido, indicando que maiores volumes foram fornecidos no período úmido. Estes aumentos podem estar associados aos aportes de cargas provenientes da lixiviação dos solos no início das chuvas (Freitas *et al.*, 2011; Bezerra *et al.*, 2014.b), as quais elevam as concentrações de fósforo e por isso se prioriza maiores saídas de água. Alguns estudos mostram que essa saída de água pode remover nutrientes e permitir a troca do volume de água armazenado (Bezerra *et al.*, 2014b; Oliveira, 2019). Já no período seco, com a diminuição das entradas de água, é necessário diminuir as saídas de atendimento a D2 para que os níveis de água aumentem e seja possível atender as demandas prioritárias em aspectos quantitativos e qualitativos, de forma que os déficits são maiores.

Para o reservatório Itans e Marechal Dutra, vale lembrar que quando foi considerado somente a quantidade na otimização das regras dos cenários, foi verificado que os Cenários 2 e 3 poderiam atender as demandas nos períodos secos sendo equivalente ao Cenário 4 se não fossem as porcentagens de falhas impostas pelas regras de operação. Por isto, os mesmo apresentam uma redução no número de falhas no período seco quando se aumenta a garantia no atendimento de D1, indicando que não foi necessário aumentar os volumes de água nos períodos de estiagem para melhorar a qualidade da água.

De modo geral, assim como na otimização considerando apenas quantidade, verificou-se que à medida que maiores garantias são desejadas para abastecer D1, menores volumes de água são fornecidas a D2 no período total, a fim de aumentar os

níveis de água no reservatório e consequentemente, diluir as concentrações de fósforo para atender as demandas prioritárias com qualidade satisfatória.

Ao analisar o comportamento de $V1$, $V2$ e α_{21} na situação favorável de qualidade (Figuras 21, 22, 23, 24 e 25) observa-se uma semelhança em relação à otimização considerando apenas quantidade. No período úmido os racionamentos são maiores em relação ao período seco, o que resulta em maiores valores de $V1$ e $V2$.

No entanto, os valores de $V1$ e $V2$ variam de formas diferentes entre os dois tipos de otimização. Por exemplo, no período úmido em Boqueirão de Parelhas, Cruzeta e Itans houve maiores reduções dos valores de $V1$ e $V2$ resultando na diminuição da frequência do nível de água nas Zona 2 e 3 e, consequentemente, em menores racionamentos de D2 (Figura 21, 22 e 23), principalmente nos cenários 2 e 3 e no açude Itans. Já no reservatório Marechal Dutra o comportamento foi inverso, foi necessário aumentar os valores de $V1$ e $V2$ para aumentar os racionamentos de D2, diminuindo a frequência do nível de água na Zona 1 (Figura 24).

No período seco, os valores de $V1$ e $V2$ praticamente não mudam, assim como a porcentagem de tempo que o reservatório consegue atender completamente a demanda D2. No entanto, o racionamento aumenta levemente quando o reservatório se encontra na Zona 2, este aumento é mais visível nos reservatórios Boqueirão de Parelhas e Marechal Dutra. No Itans e em Cruzeta esses aumentos não existiram, inclusive ocorrendo reduções em alguns cenários.

Estes resultados mostram que em uma situação favorável de qualidade, a redução desse nutriente causada pela sedimentação e pelos atendimentos as demandas são suficientes para tornar as concentrações de fósforo adequadas, quando se tem baixo aporte. Não sendo necessárias grandes reduções nos atendimento das demandas.

Assim como ocorre na otimização considerando só quantidade, ao considerar qualidade na otimização, os valores de α_{21} reduz com o aumento da garantia, ou seja, se reduz o atendimento a D2 para priorizar o atendimento a D1. Este impacto é mais significativo no Itans, que atende 87% da demanda D2 no Cenário 2 na Zona 2 e passa a atender somente 23 % no Cenário 4. Já em Boqueirão de Parelhas o impacto do cenário no valor de α_{21} é mínimo, passando de 0,25 para 0,21.

Figura 21 - Valores de V_1 , V_2 e α_{21} otimizados em Boqueirão de Parelhas para o Cenário 2 (a), Cenário 3 (b) e Cenário 4 (c) considerando qualidade em condições favoráveis.

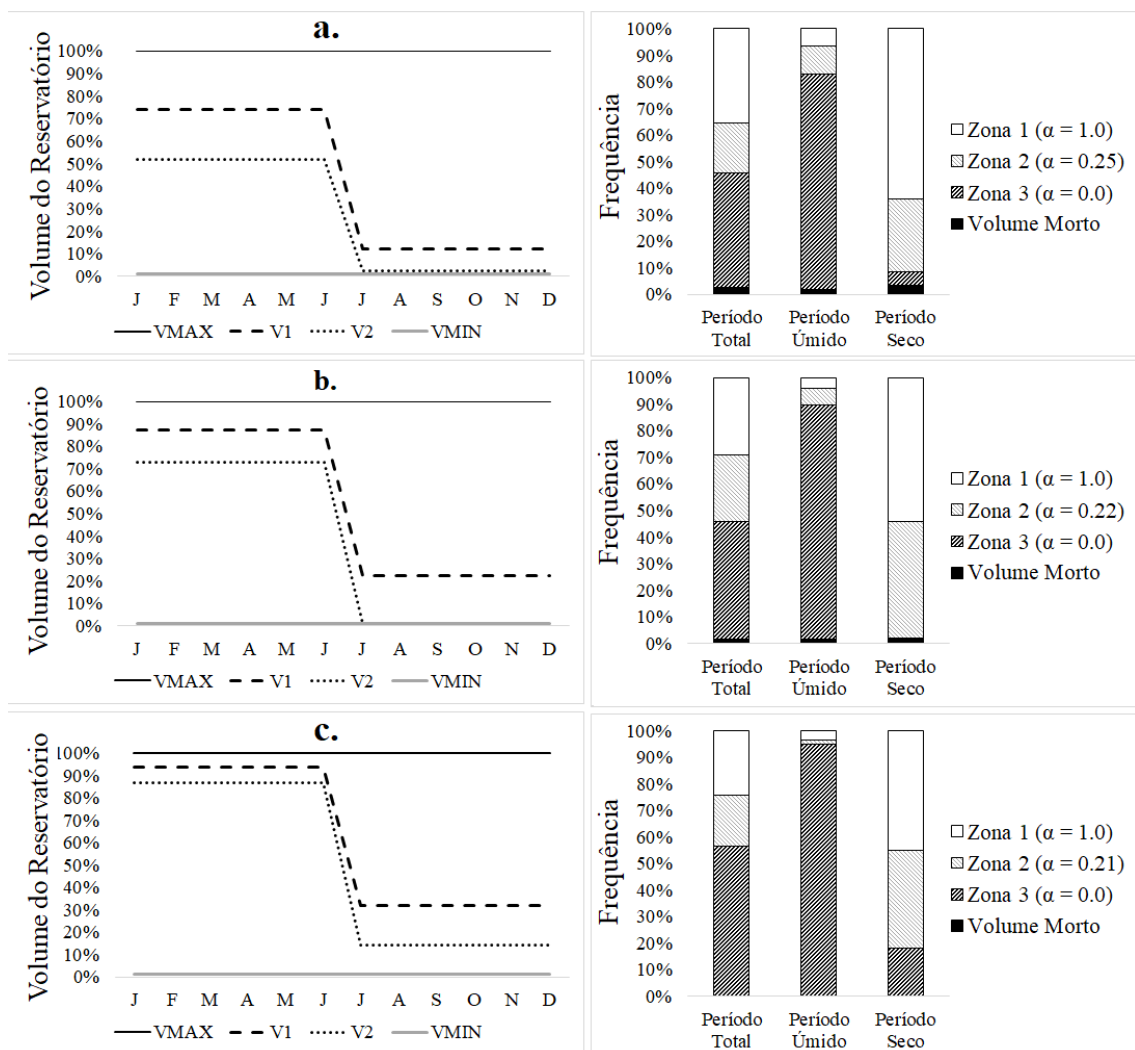


Figura 22 - Valores de V_1 , V_2 e α_{21} otimizados em Cruzeta para o Cenário 2 (a), Cenário 3 (b) e Cenário 4 (c) considerando qualidade em condições favoráveis.

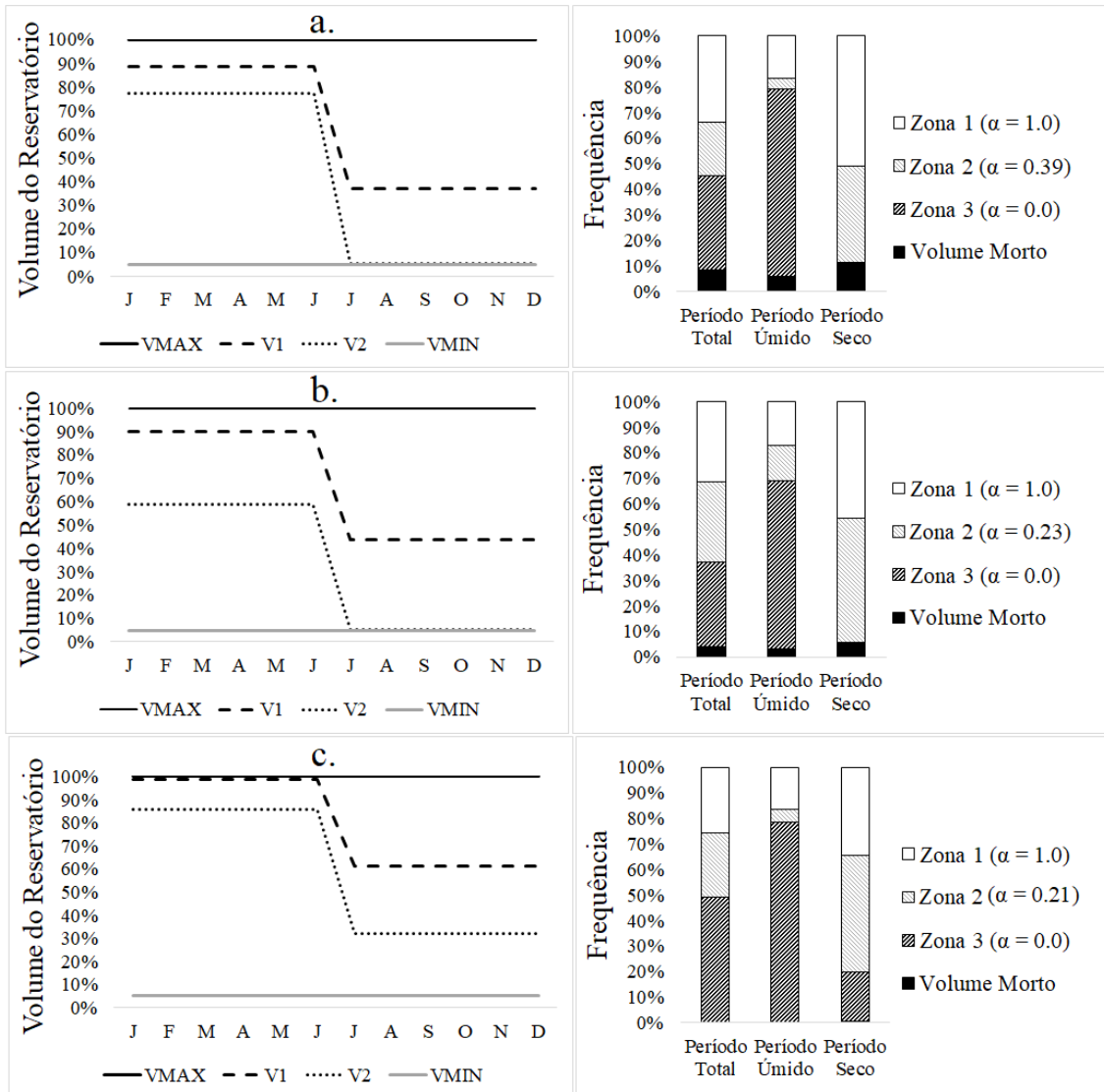


Figura 23 - Valores de V1, V2 e α_{21} otimizados em Itans para o Cenário 2 (a), Cenário 3 (b) e Cenário 4 (c) considerando qualidade em condições favoráveis.

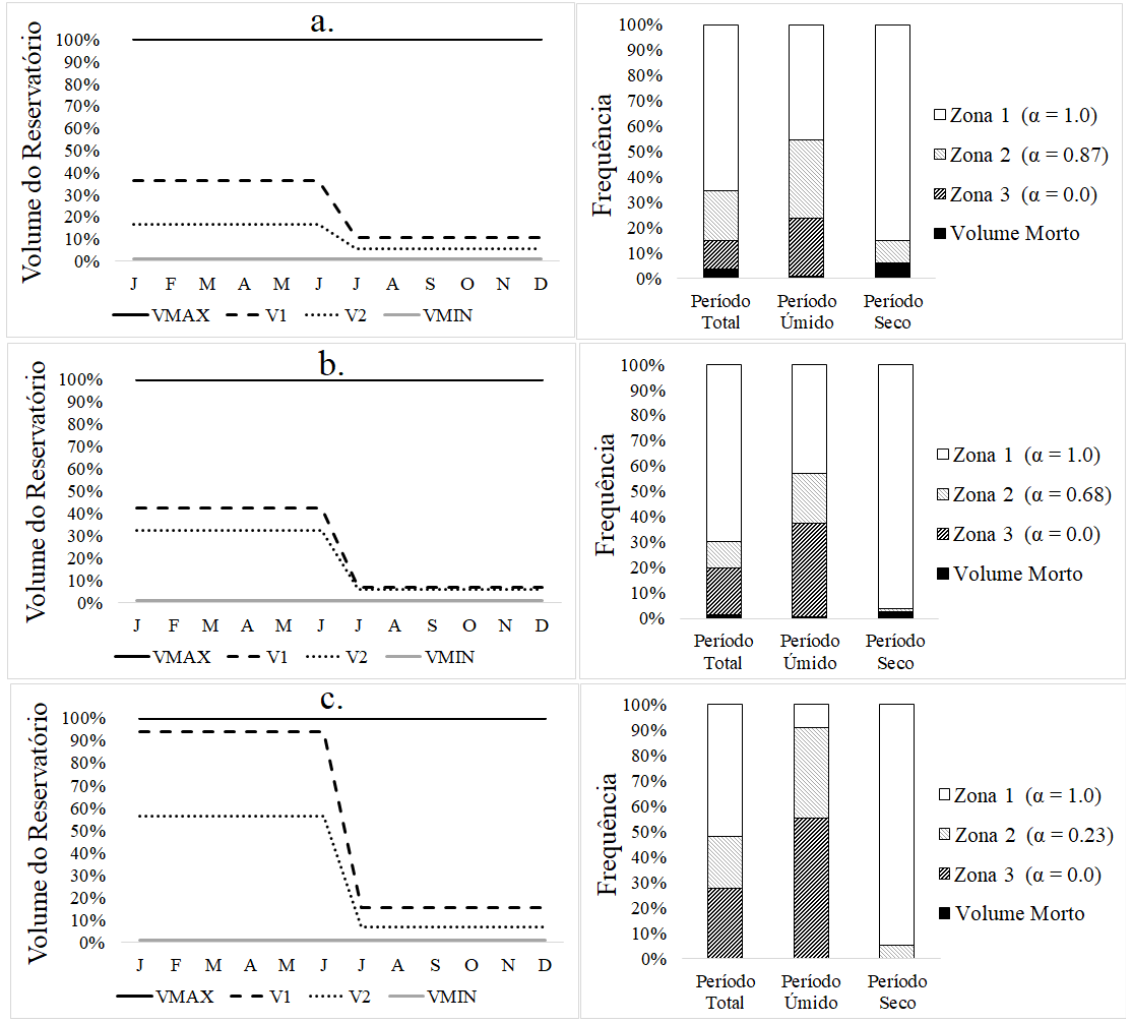


Figura 24 - Valores de V1, V2 e α_{21} otimizados em Marechal Dutra para o Cenário 2 (a), Cenário 3 (b) e Cenário 4 (c) considerando qualidade em condições favoráveis.

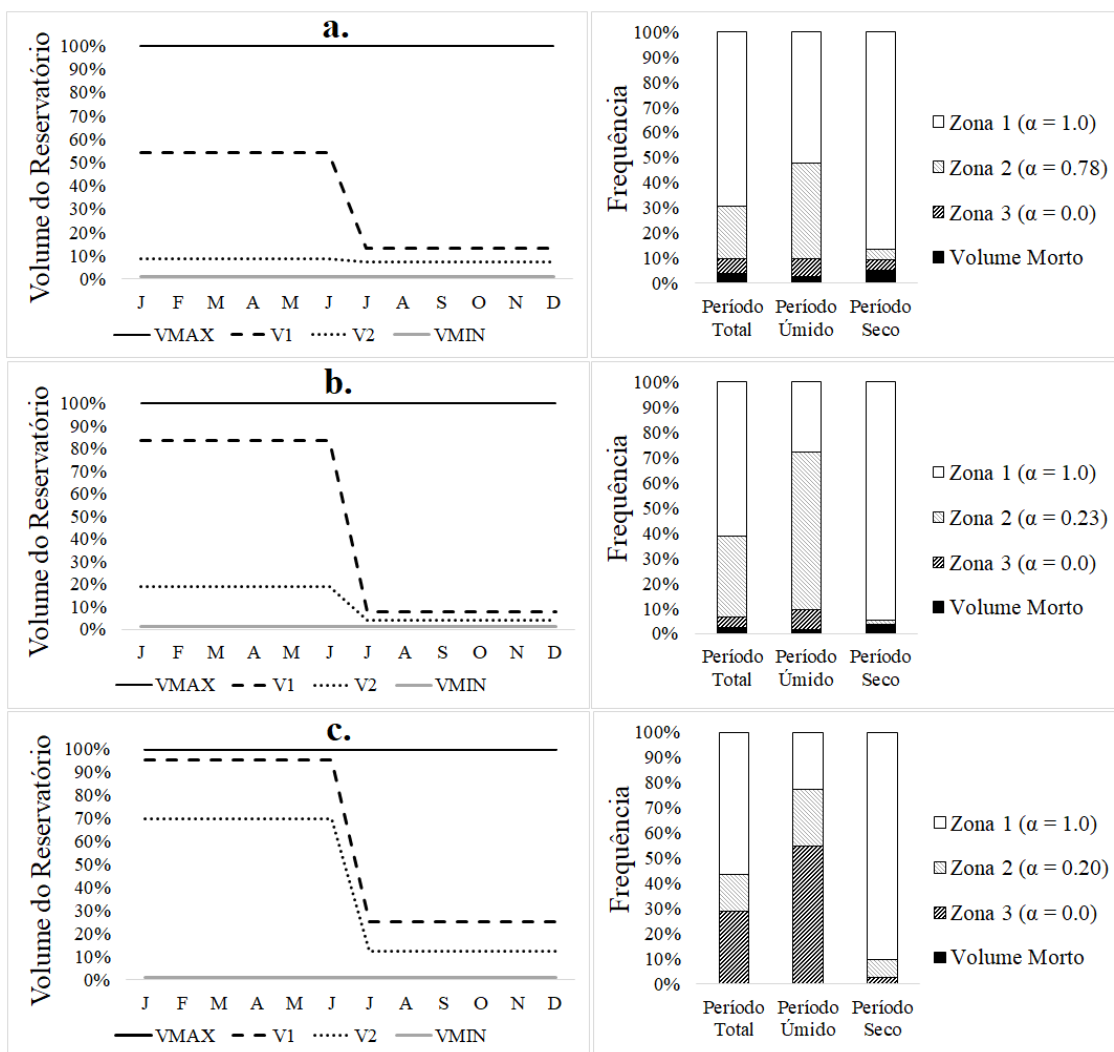
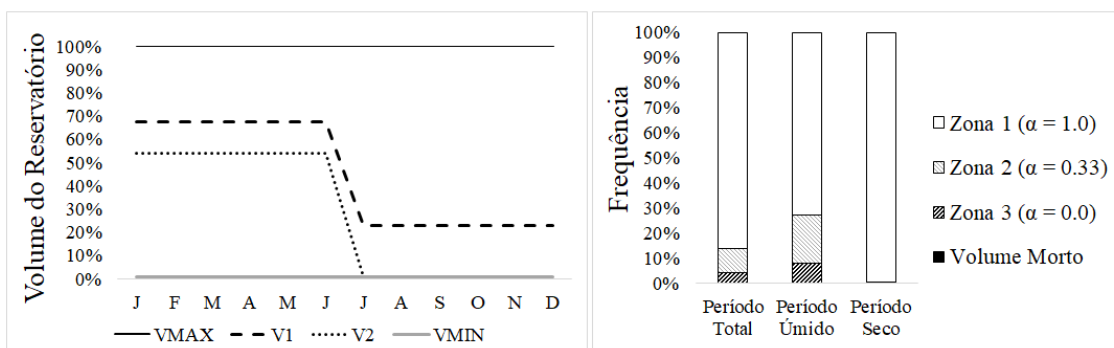


Figura 25 - Valores de V1, V2 e α_{21} otimizados em Passagem de Traíras para o Cenário 4 considerando qualidade em condições favoráveis.



Na situação intermediária, as cargas de entrada de fósforo nos reservatórios são elevadas assim como o fluxo é menor, com isto os déficits hídricos no atendimento das demandas não prioritárias são bem maiores. O desempenho dos reservatórios em relação aos atendimentos adequados para os usuários não prioritários é bastante prejudicado, fornecendo totalmente as vazões de D2 em menos de 20% do tempo em todos os reservatórios em cada cenário, com exceção de Itans no Cenário 2 e 3. Nos reservatórios Boqueirão de Parelhas, no Cenário 2, e Cruzeta, no Cenário 3, os usuários não prioritários ficam sem receber água por mais de 50% do tempo dos períodos secos.

Avaliando os valores de $V1$, $V2$ e α_{21} (Figuras 26, 27, 28 e 29) verifica-se que no período úmido os valores limites para início dos racionamentos estão próximos ao nível do volume máximo em todos os reservatórios, mostrando que no período úmido os usuários não prioritários somente receberão completamente a demanda quando houver vertimentos. No período seco os valores de $V1$ e $V2$ também se elevam, reduzindo a Zona 1 e ampliando as Zonas 2 e 3. Assim, verifica-se em todo período o aumento da frequência da posição do nível nas zonas com racionamentos. Além disso, os valores de α_{21} são reduzidos, indicando aumento de racionamento pela necessidade de manter os volumes de água elevados.

Ao considerar a qualidade na otimização, o motivo das porcentagens de falhas observadas em cada cenário de garantia pode ser exclusivamente por degradação da qualidade da água, logo, tendo quantidade de água suficientes para atender as demandas prioritárias em todo período mas existindo falhas quando a qualidade for imprópria. Essa situação foi visualizada ao considerar a situação intermediária de qualidade, em que se verifica a frequência da posição do nível da água sempre acima do volume morto (Figura 26, 27, 28 e 29).

Figura 26 - Valores de V1, V2 e α_{21} otimizados em Boqueirão de Parelhas para o Cenário 2 considerando qualidade em condições intermediárias e classificação Classe 3 para o corpo hídrico.

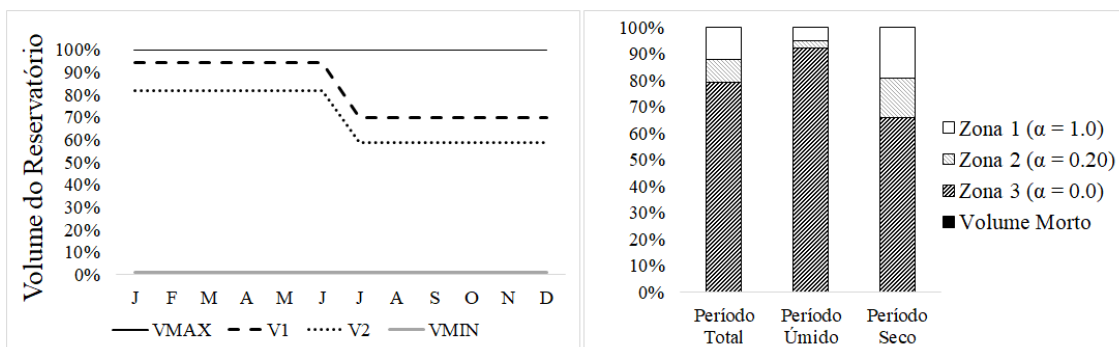


Figura 27 - Valores de V1, V2 e α_{21} otimizados em Cruzeta para o Cenário 2 (a) e Cenário 3 (b) considerando qualidade em condições Intermediárias.

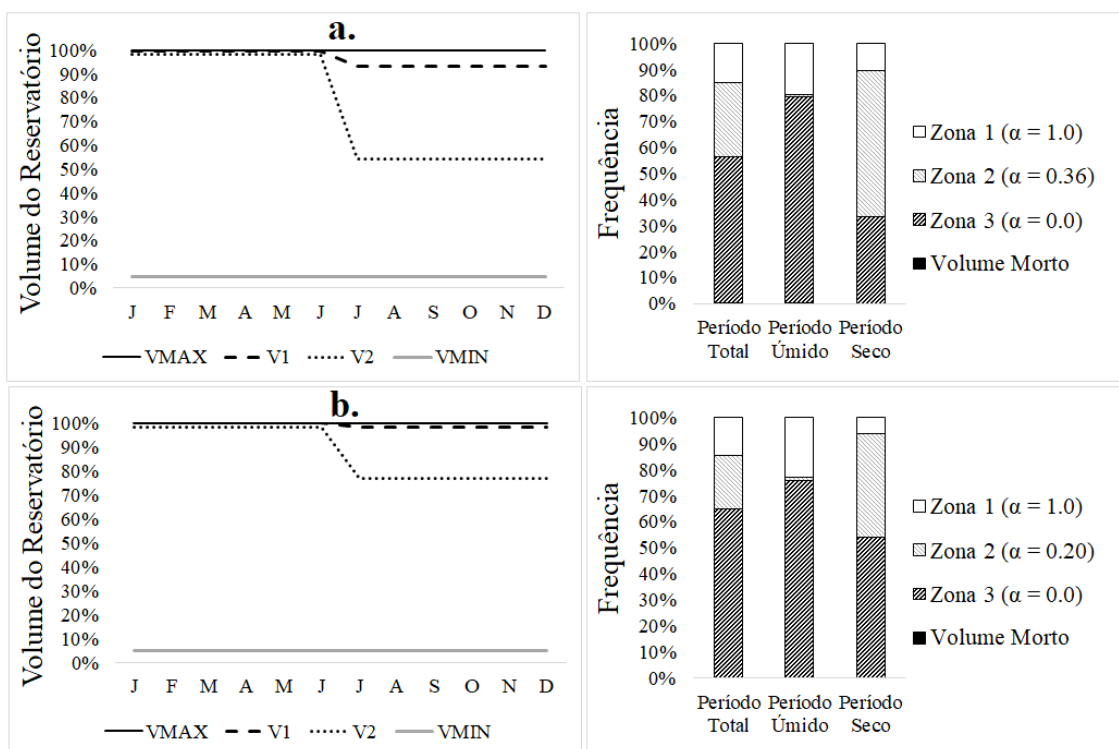


Figura 28 - Valores de V1, V2 e α_{21} otimizados em Itans para o Cenário 2 (a), Cenário 3 (b) e Cenário 4 (c) considerando qualidade em condições Intermediárias.

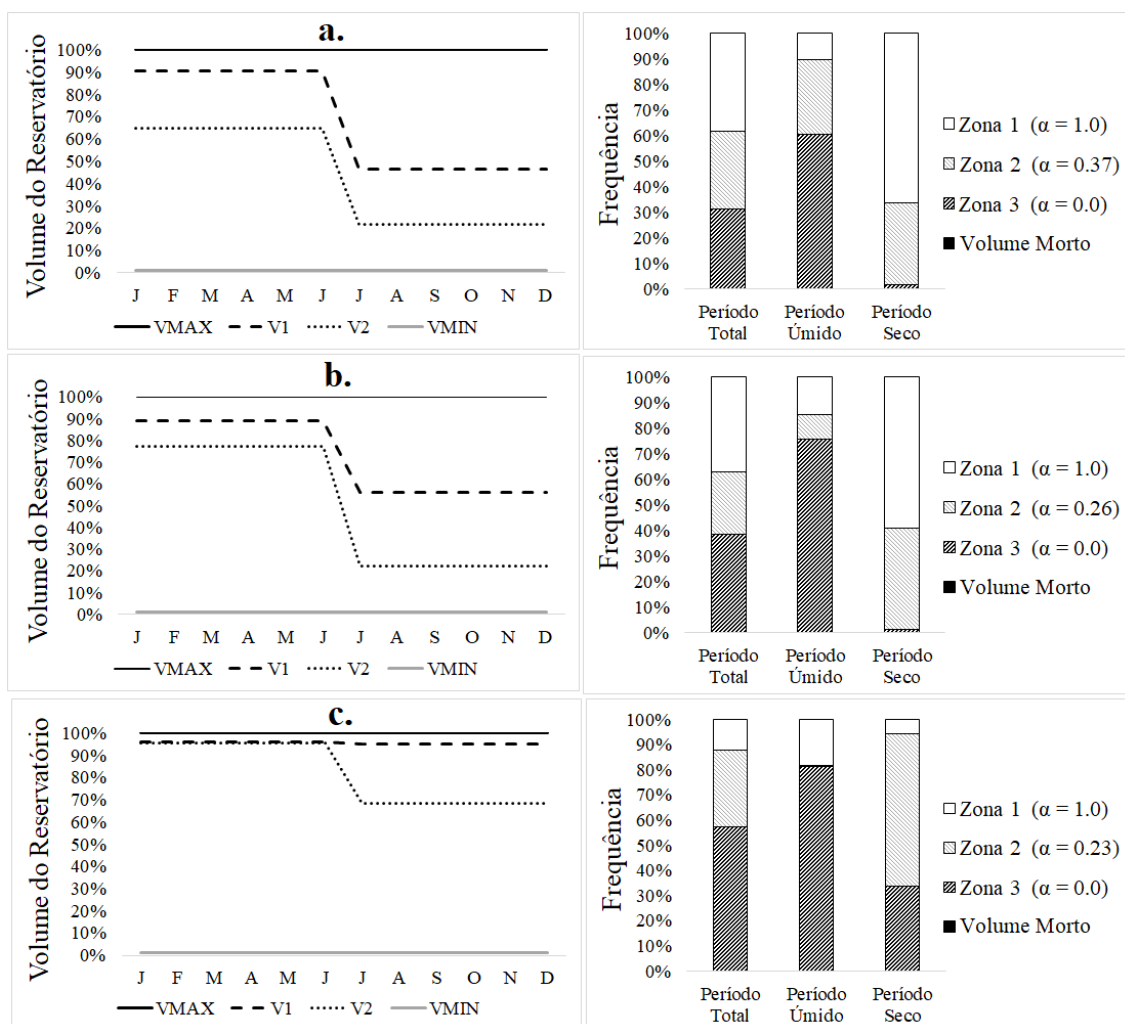
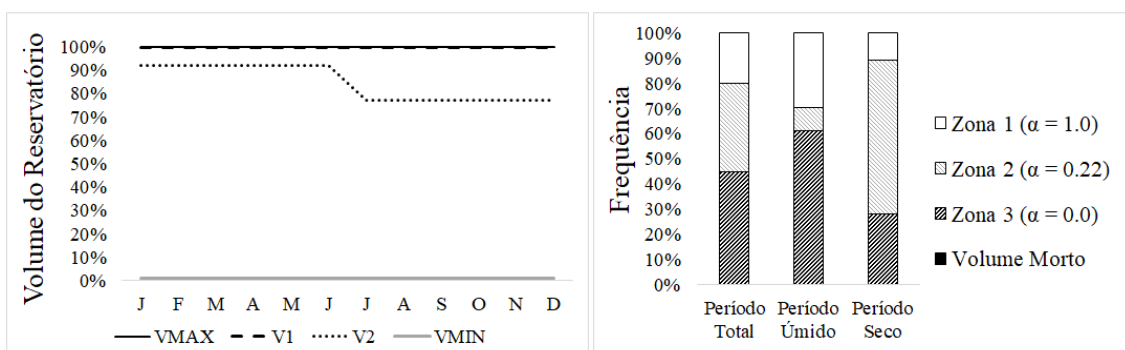


Figura 29 - Valores de V1, V2 e α_{21} otimizados em Marechal Dutra para o Cenário 2 considerando qualidade em condições Intermediárias e classificação Classe 3 para o corpo hídrico.



Desta forma, nota-se que ao contrário da situação favorável de qualidade, na situação intermediária para reduzir o número de falhas por causa das elevadas concentrações de fósforo foi necessário impor altos racionamentos de D2 o que pode inviabilizar os atendimentos e ocasionar em prejuízos socioeconômicos. Esse tipo de racionamento, necessário para o reservatório voltar para as condições estáveis de qualidade, foi também observado no estudo de Bozzorg Haddad *et al.*, (2014) para a resolução de conflitos entre abastecimento humano e irrigação em situações de poluição abrupta. Portanto, fica evidente que para amenizar os danos econômicos na região, provocados pelos racionamentos nas demandas não prioritárias, é necessário reduzir as concentrações de fósforo nos reservatórios.

Como as matas ciliares nas margens dos reservatórios estão bastante degradadas devido a ocupações de solo, inclusive, de atividades potenciais a produção de fósforo, como a agricultura e pecuária (Oliveira, 2012; Ferreira, 2015; Melo, 2019), o zoneamento de atividades realizadas próximos aos mananciais e a manutenção da zona ripária proposto por alguns estudos (Nielsen *et al.*, 2014; Reich e Lake, 2015) podem reduzir ou interromper as entradas de cargas de nutrientes nos reservatórios (Yu *et al.*, 2020). Rocha (2014) afirma que tais medidas são mais eficientes do que às melhorias das tecnologias utilizadas no tratamento de água, pois estas requerem maiores investimentos.

Outra possível fonte de nutrientes são os esgotos domésticos provenientes das áreas urbanas, os quais podem ser tratados adequadamente para reduzir as entradas de nutrientes nos reservatórios (Yu *et al.*, 2020). No entanto, Ferreira (2015) observou em Cruzeta que as cargas difusas provenientes da Pecuária são superiores em relação às encontradas na área urbana, além disso Morais Neto (2018) observou que as áreas urbanas das bacias desses reservatórios são desprezíveis, não obtendo relações significativas com a qualidade da água.

Além da redução das cargas afluentes de fósforo, outras medidas podem ser adotadas para reduzir as concentrações de fósforo nos reservatórios, como o aumento da sua sedimentação ou dragagem dos sedimentos. Estudos relataram reduções das concentrações de fósforo após adição de coagulantes e floculantes em reservatórios e lagos do semiárido (Van Oosterhout e Lüring, 2010; Araújo *et al.*, 2016; Silva, 2017; Araújo *et al.*, 2018). Já Gao *et al.*, (2019) relatam que a redução das cargas externas de nutrientes são mais eficientes na melhora da qualidade da água em relação à dragagem dos sedimentos.

Avaliando os períodos de não atendimentos contínuos (Tabela 14), verifica-se que ao considerar a qualidade na otimização, essas durações são maiores quando comparados com a otimização considerando somente quantidade (Tabela 11). Verifica-se também que em todos os reservatórios, à medida que se aumentam as garantias de atendimento, menores são os intervalos máximos sem atendimento para os usuários prioritários (D1). No entanto, assim como observado na otimização considerando somente quantidade, os intervalos contínuos sem atendimento a D2 não apresentam um padrão.

Tabela 14 - Intervalos sem atendimentos e número de falhas para D1 e D2 considerando qualidade na otimização das regras de operação na situação favorável.

Reservatório	Cenário	Intervalo máximo sem atendimento (meses)		Nº Falhas total (%)	Nº Falhas no período seco (%)	Períodos secos
		D1	D2			sem atender por ≥ 3 meses
Boqueirão de Parelhas	1	45	45	47%	23%	41%
	2	19	21	63%	16%	9%
	3	9	10	69%	20%	3%
	4	0	33	74%	25%	18%
Cruzeta	1	23	23	46%	24%	55%
	2	13	18	64%	19%	9%
	3	7	11	66%	21%	4%
	4	0	44	72%	27%	18%
Itans	1	40	40	22%	10%	18%
	2	28	29	36%	6%	3%
	3	26	29	33%	2%	2%
	4	0	6	49%	2%	0%
Marechal Dutra	1	28	28	14%	6%	10%
	2	18	27	31%	5%	8%
	3	11	17	43%	2%	4%
	4	0	18	47%	4%	1%
Passagem de Traíras	1	5	5	1%	0%	0%
	4	0	5	17%	0%	0%

Com relação ao número de falhas, observa-se aumentos em relação a otimização considerando apenas quantidade, no entanto reservatório Itans, o número de falhas é menor. Vale lembrar que ao considerar somente a quantidade, o reservatório Itans nos Cenários 2 e 3, se não fossem as porcentagens de falhas impostas pelas regras de operação, era possível fornecer 100% de água a D1. Com isso, ao considerar a qualidade na otimização, a redução do número de falhas do reservatório Itans no Cenário 2 e 3 é justificada pelo aumento dos fornecimentos de água a D2, uma vez que, agora, o principal motivo das falhas é o critério de qualidade.

No reservatório Cruzeta os déficits hídricos totais ao considerar a qualidade na situação favorável são semelhantes (Tabela 13), com isso, os aumentos da porcentagem de falhas se devem principalmente às elevadas concentrações de fósforo. Já nos reservatórios Boqueirão de Parelhas e Marechal Dutra, verificou-se aumentos dos déficits hídricos totais no atendimento a D2, mostrando que, nesse caso, o aumento do número de falhas não foi somente por questões de qualidade.

Entre os cenários com racionamentos nas regras de operação, observa-se que optar pela garantia de 100% de atendimento aos usuários prioritários resulta nas maiores quantidades de períodos secos com 03 (três) ou mais meses sem atendimento a D2 nos reservatórios Boqueirão de Parelhas e Cruzeta. O que não é visto nos demais reservatórios, em que o Cenário 4 apresenta as menores porcentagens, não havendo, praticamente, períodos secos com três ou mais meses sem atendimentos adequados (Tabela 14).

Na situação intermediária de qualidade, o número de meses consecutivos sem atendimento das demandas apresenta basicamente o mesmo comportamento do apresentado na situação favorável, no entanto, apresenta valores bastante elevados, principalmente para D2. Por exemplo, em Boqueirão de Parelhas o intervalo máximo sem atendimento a D2 é de mais de 10 (dez) anos, mesmo considerando o reservatório como Classe 3. Nos demais reservatórios, apesar de não apresentarem durações como as de Boqueirão de Parelhas, as mesmas ainda são elevadas, sendo superiores a 4 (quatro) anos. Até mesmo os usos prioritários seriam prejudicados, pois ficariam sem receber água por mais de um ano e seis meses na maioria dos reservatórios (Tabela 15).

Tabela 15 - Intervalos sem atendimentos e número de falhas para D1 e D2 considerando qualidade na otimização das regras de operação na situação intermediária.

Reservatório	Cenário	Intervalo máximo sem atendimento (meses)		Nº Falhas total (%)	Nº Falhas no período seco (%)	Períodos secos
		D1	D2			sem atender por ≥ 3 meses
Boqueirão de Parelhas	1*	93	97	74%	36%	76%
	2*	22	237	87%	39%	63%
Cruzeta	1	58	58	56%	28%	62%
	2	29	55	84%	40%	23%
	3	17	55	85%	43%	33%
Itans	1	140	140	44%	22%	42%
	2	22	34	61%	14%	7%
	3	20	23	63%	18%	1%
	4*	0	46	88%	43%	29%
Marechal	1*	69	69	52%	25%	55%
Dutra	2*	22	41	80%	39%	23%

*Cenários otimizados classificando o reservatório como Classe 3.

O número de falhas para os usuários não prioritários e a quantidade de períodos secos sem atender por 3 (três) ou mais meses também aumentaram ao considerar a situação intermediária de qualidade. O número de falhas foi superior a 80% após otimizar as regras de operação para atender aos cenários de garantias, com exceção somente dos Cenários 2 e 3 no reservatório Itans que são maiores de 60%. Logo, comparando a situação favorável e intermediária, nesta última os números de falhas para D2 aumentaram em no mínimo 20%, existindo aumentos inclusive no período seco.

O reservatório Itans, como foi o único possível de se otimizar no Cenário 4, é o único capaz de atender com garantia de 100% os usuários prioritários. No entanto, em relação a situação favorável, há aumentos da duração máxima sem atender os usuários não prioritários em mais de 3 (três) anos e da porcentagem de falhas no período seco em mais de 40%.

Desta forma, observa-se que na situação intermediária de qualidade, apesar das regras de operação otimizadas resultarem mais ganhos em relação a POP, essa melhora não é satisfatória, apresentando resultados bastante inferiores em relação aos encontrados na situação favorável. Logo, apenas racionar as vazões fornecidas a D2, bem como diminuir a restrição da qualidade em alguns reservatórios, considerando-os como Classe 3, não trouxe resultados aceitáveis. Por tanto, é necessário também reduzir as concentrações de fósforo do reservatório para ser possível atender aos usuários sem prejuízos significativos.

Os resultados mostraram que foi possível otimizar as regras de operação através dos parâmetros V1, V2 e α_{21} para que a qualidade da água do reservatório atendesse aos padrões permitidos pela legislação e que os usos prioritários fossem atendidos nas garantias desejadas. No entanto, considerando que a otimização minimizou a variação das concentrações de fósforo em relação ao valor permitido pela Resolução Conama nº 357/2005, ou seja, procurou manter a concentração de fósforo no reservatório (C_{OBS}) próximo da permitida (C_{PER}), se analisou as concentrações de fósforo nos reservatórios no período simulado (Figuras 30, 31, 32, 33 e 34).

Observa-se que na aplicação da regra POP, em todos os reservatórios, as concentrações de fósforo são elevadas, ficando acima da concentração permitida em média 17% do tempo na situação favorável e 59% na situação intermediária, ou seja, existindo uma diferença de 42% entre as situações. Esses valores são reduzidos consideravelmente quando se otimiza as regras de operação considerando apenas a quantidade, resultando em maiores reduções de falhas por qualidade nos reservatórios, principalmente em Boqueirão de Parelhas e Cruzeta na ordem de 20%. Inclusive, os picos de concentrações máximas de fósforo também são reduzidos, principalmente em Boqueirão de Parelhas, onde houve redução de 1,6 mg/L para 0,4 mg/L na situação favorável (Figuras 30.a1 e 30.a2) e de 8mg/L para 3mg/L na situação intermediária (Figuras 30.b1 e 30.b2). Mostrando que a simples otimização quantitativa já traz ganhos para a qualidade da água nos reservatórios.

Contudo, essa otimização ainda não é suficiente para garantir o abastecimento com qualidade adequada para os usos prioritários em 90% do tempo, sendo, por tanto, necessário otimizar considerando a qualidade. Neste caso, a ocorrência de concentrações acima da permitida é sempre de 10%, de forma que na situação intermediária de qualidade tem um maior impacto (38%) e na situação favorável a diferença é pequena (4%).

As concentrações máximas de fósforo encontradas neste trabalho são inferiores às concentrações observadas em outros estudos na maioria dos reservatório, mesmo no caso da aplicação da POP, principalmente na situação favorável. Por exemplo, em Cruzeta, a máxima concentração foi de aproximadamente 0,15 mg/L, no entanto, Freitas *et al.* (2011), Bezerra *et al.*, (2014b), Ferreira (2015) e Cavalcante *et al.* (2018) relataram concentrações de fósforo acima de 0,25 mg/L, inclusive, Cavalcante *et al.* (2018) observaram concentrações máximas de 3,00 mg/L e mínimas de 0,17 mg/L entre os anos de 2015 e 2016, no período com volumes armazenados escassos devido à seca prolongada desde 2012.

Em Itans, o Programa Água Azul (2019) relatou concentrações máximas de 0,8 mg/L, acima da concentração máxima verificada na situação favorável (Figura 32.a1). Em Marechal Dutra, Calvalcante *et al.* (2018) encontraram concentração máxima de fósforo equivalente a 1,8 mg/L durante a seca prolongada nos anos de 2015 e 2016, acima do valor máximo de 0,7 mg/L encontrado neste trabalho na aplicação da POP. Enquanto que o Programa Água Azul (2019) e Bezerra *et al.* (2014b) observaram valores máximos inferiores, de 0,6 mg/L e de 0,22 mg/L, respectivamente.

Já em Passagem de Traíras, Medeiros (2016) observou concentração de fósforo mínima de 0,20mg/L e máximo de 0,55mg/L, enquanto que o Programa Água Azul (2019) encontrou mínimo 0,03 mg/L e máxima de 1,65 mg/L. Neste trabalho, a concentração de fósforo máxima nas condições favoráveis foi igual a 0,80 mg/L, mas na maior parte do tempo as concentrações foram praticamente nulas (Figura 34.a1), já na situação intermediária apesar do aumento da concentração máxima para aproximadamente 14 mg/L, as concentrações estão entre 0,03 – 0,20 mg/L, na maior parte do tempo (Figura 34.b1).

Desta forma, observa-se na maioria dos reservatórios que as condições favoráveis da cargas afluentes e de fluxos de fósforo podem não representar adequadamente a realidade do balanço de fósforo no interior do reservatório, mostrando que as condições intermediárias adotadas nesse trabalho são possivelmente as mais prováveis.

Figura 30 - Variação das concentrações de fósforo nas condições favoráveis (a) e intermediárias (b) com o uso da POP (1) e da Curva Guia Baseada em Zonas otimizada

considerando somente quantidade (2) e quantidade e qualidade no Cenário 2 (3) no reservatório Boqueirão de Parelhas.

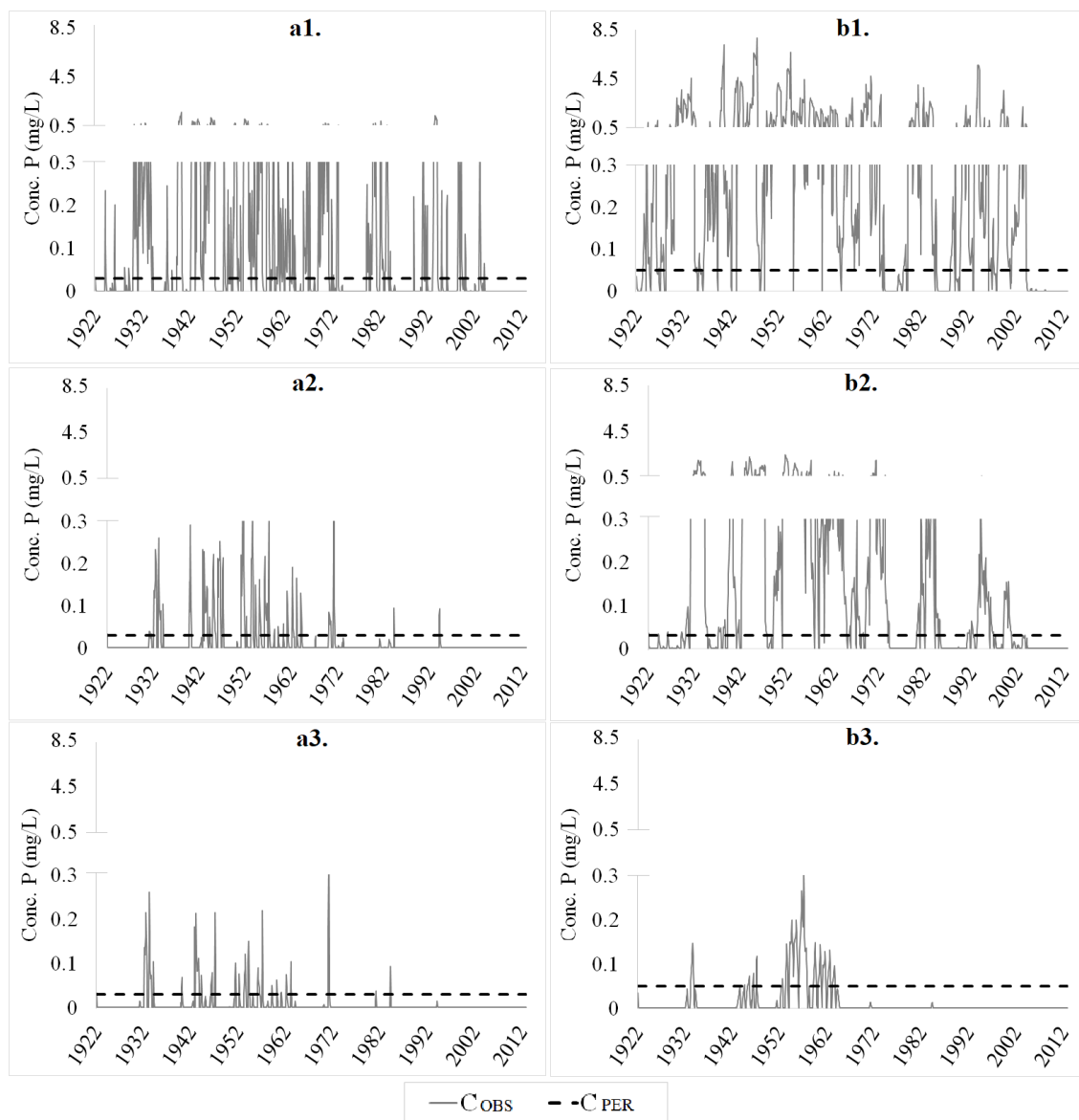


Figura 31 - Variação das concentrações de fósforo nas condições favoráveis (a) e intermediárias (b) com o uso da POP (1) e da Curva Guia Baseada em Zonas otimizada

considerando somente quantidade (2) e quantidade e qualidade no Cenário 2 (3) no reservatório Cruzeta.

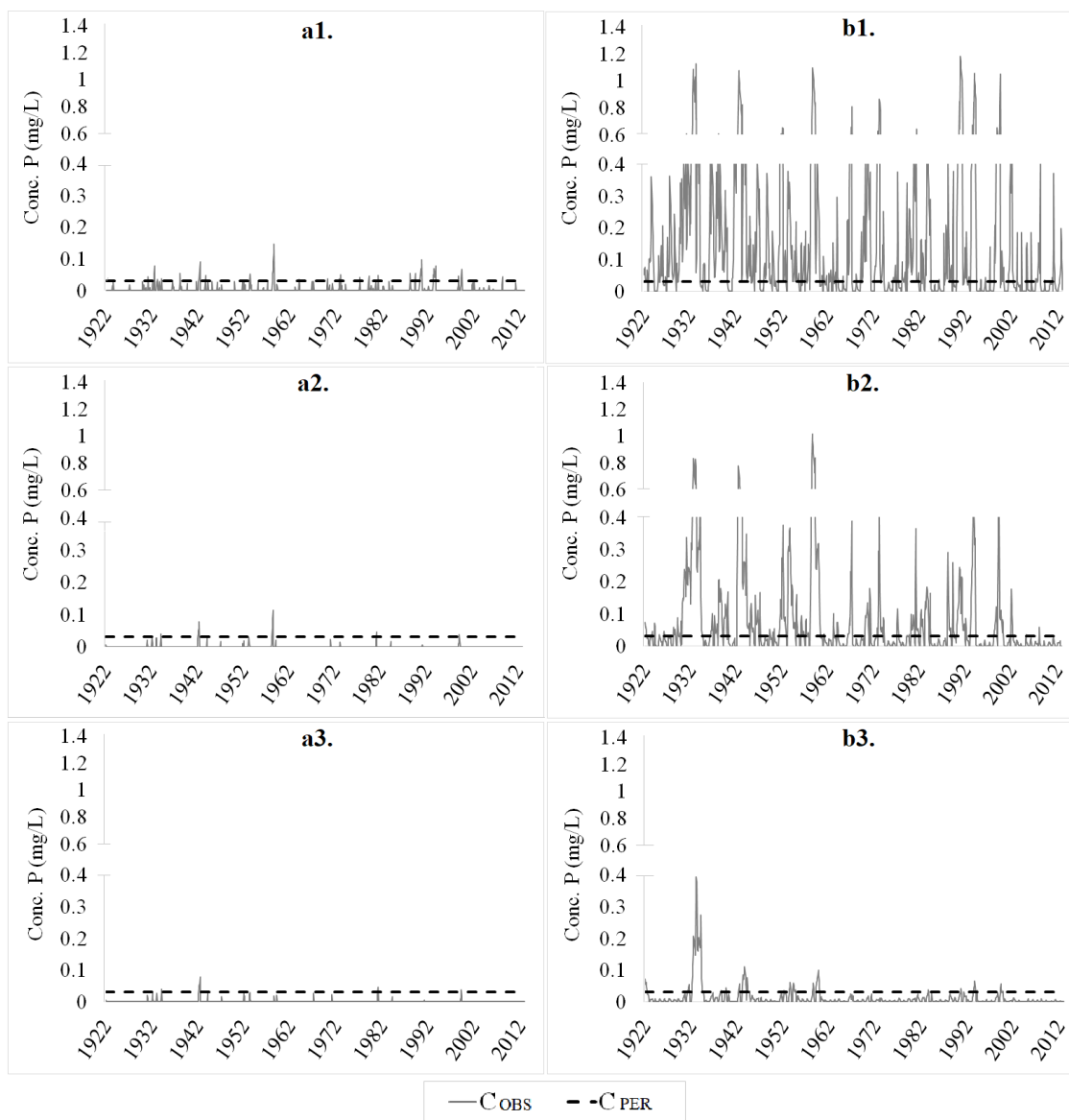


Figura 32 - Variação das concentrações de fósforo nas condições favoráveis (a) e intermediárias (b) com o uso da POP (1) e da Curva Guia Baseada em Zonas otimizada

considerando somente quantidade (2) e quantidade e qualidade no Cenário 2 (3) no reservatório Itans.

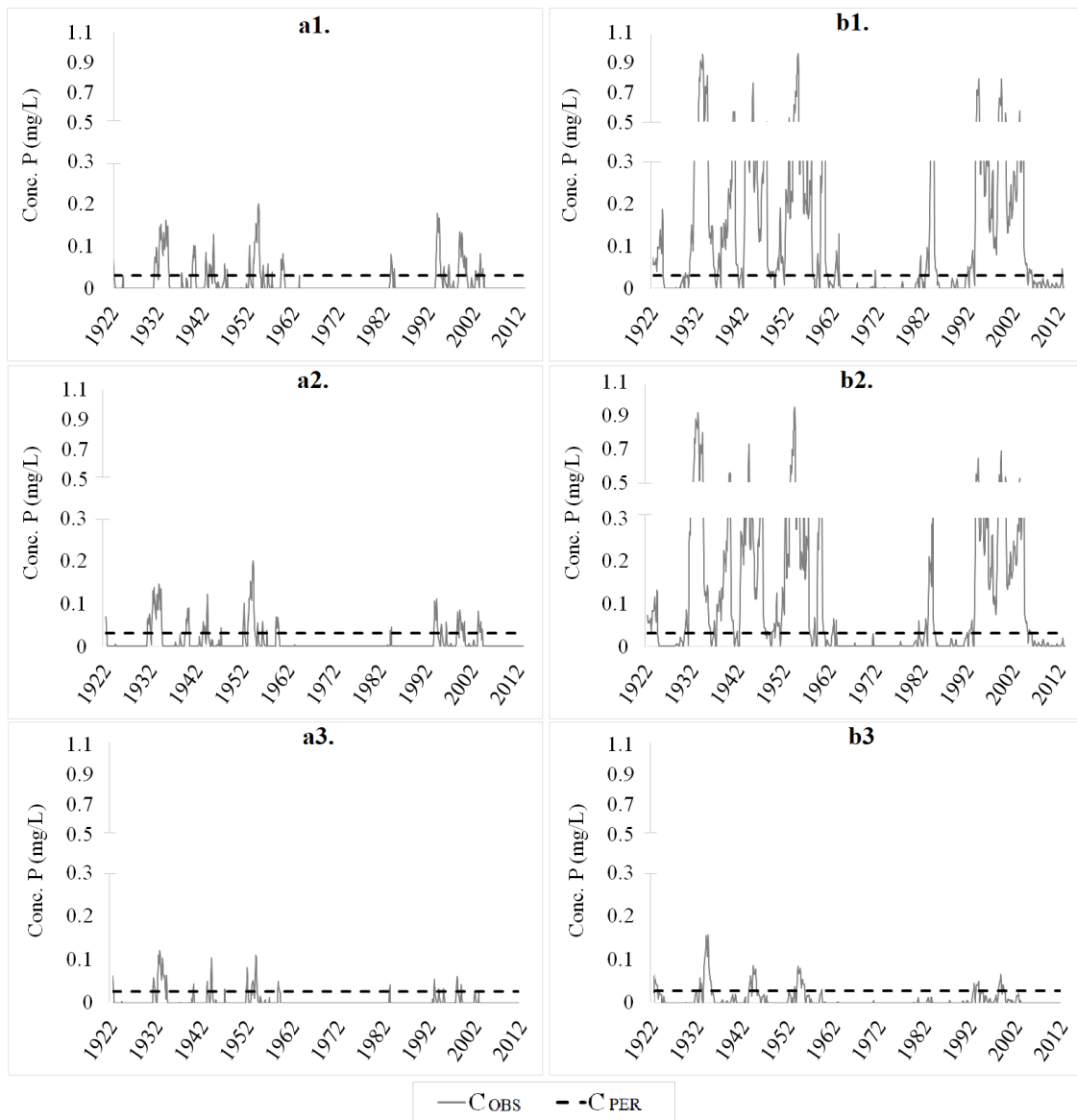


Figura 33 - Variação das concentrações de fósforo nas condições favoráveis (a) e intermediárias (b) com o uso da POP (1) e da Curva Guia Baseada em Zonas otimizada considerando quantidade e qualidade no Cenário 2 (2) no reservatório Marechal Dutra.

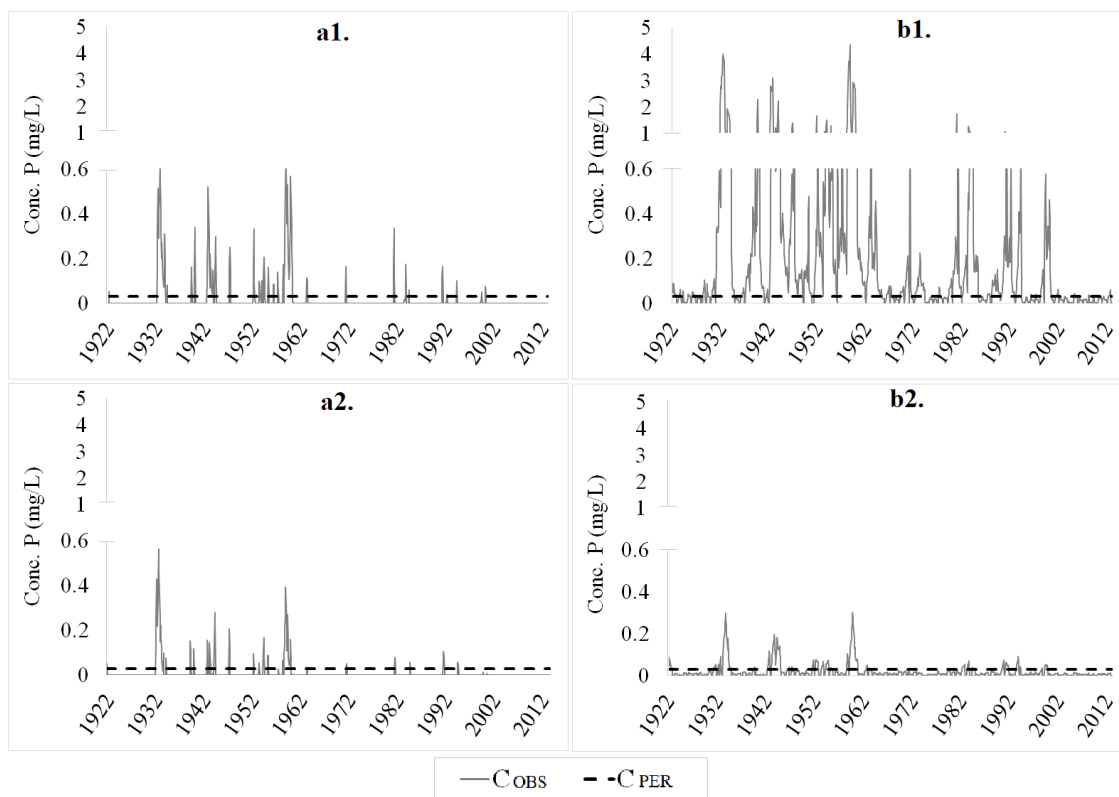
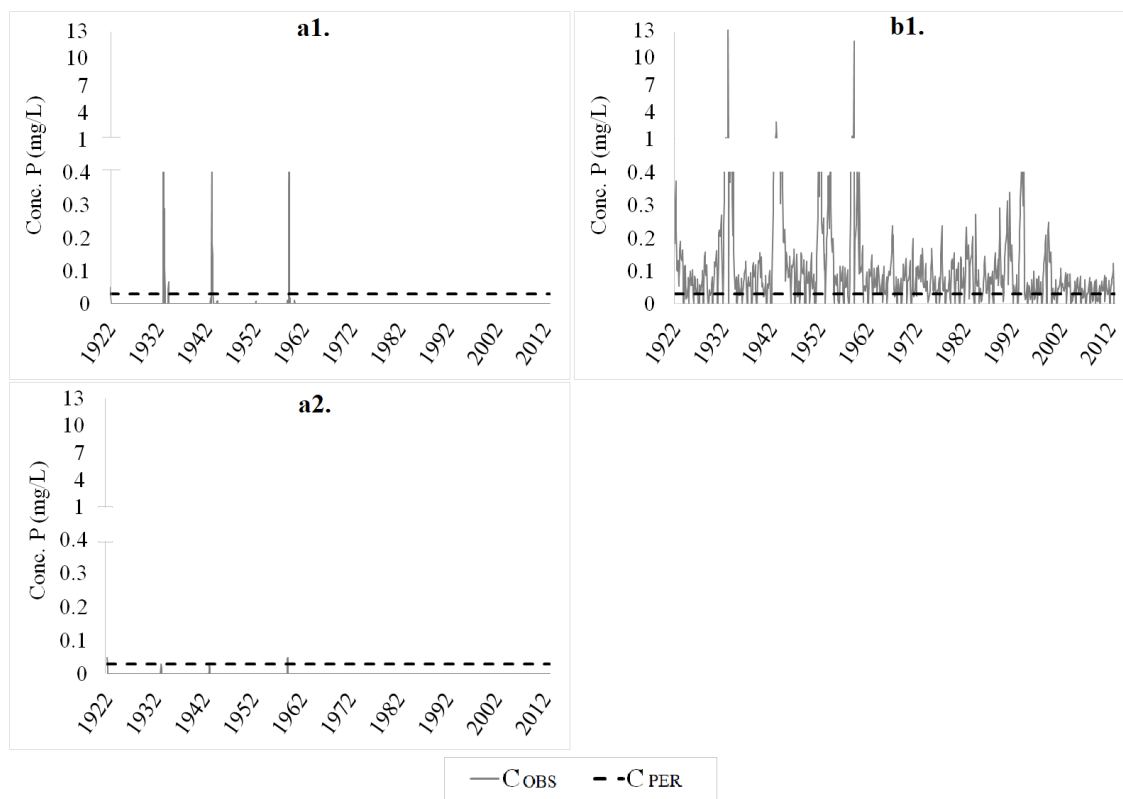


Figura 34 - Variação das concentrações de fósforo nas condições favoráveis (a) e intermediárias (b) com o uso da POP (1) e da Curva Guia Baseada em Zonas otimizada

considerando quantidade e qualidade no Cenário 4 (2) no reservatório Passagem de Traíras.



Com base nesses resultados observa-se na maioria dos reservatórios que se as condições de carga afluyente e fluxo forem favoráveis, racionar fornecimentos de água a fim de elevar os volumes armazenados é suficiente para adequar a qualidade da água aos usuários prioritários sem prejudicar os não prioritários. No entanto, foi verificado que secas prolongadas, como a de 2012 a 2016, aumentam as concentrações de nutrientes (Miranda, 2014), logo, mesmo que a situação favorável prevaleça nos reservatórios, os gestores dos recursos hídricos devem tomar ações preventivas para que essa situação não piore durante os períodos de longas estiagens.

Já em condições intermediárias de foi visto que o aumento dos racionamentos necessários para manter as concentrações de fósforo nos padrões adequados, causam déficits hídricos elevados aos usuários não prioritários, devendo-se tomar medidas de controle e recuperação dos mananciais como já citado anteriormente, inclusive para evitar a ocorrência da situação desfavorável das concentrações de fósforo, a qual não deve ser descartada.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos mostraram que diante das características da região semiárida que apresenta longos períodos de estiagem associados a altas taxas de evaporação e aumento das demandas, a Regra da Política de Operação Padrão (POP) não é capaz de atender as demandas nas garantias desejadas. A aplicação da regra da Curva Guia baseada em Zonas com coeficientes de racionamento apresentou melhor desempenho.

A otimização diferenciando os limites das Zonas entre o período úmido e seco e minimizando os déficits hídricos no período seco, foi o que apresentou o melhor desempenho em todos os cenários estudados.

A otimização das regras de operação considerando apenas a simulação da quantidade de água permitiu atender as demandas prioritárias (D1) nas garantias desejadas, no entanto, impõe déficits hídricos maiores as demandas não prioritárias (D2). Contudo, os déficits hídricos para D2 nos períodos secos reduziram quando comparados aos da regra POP.

As maiores restrições de atendimento a D2, foram visualizadas principalmente nos períodos úmidos, logo se elevam os volumes armazenados no reservatório e, conseqüentemente, se aumentam as perdas de água por evaporação e extravasamentos. O reservatório Cruzeta foi o mais afetado, enquanto que Boqueirão de Parelhas e Marechal Dutra resultaram nos menores aumentos dessas perdas.

As regras de operação otimizadas considerando apenas a quantidade não foram capazes de manter as concentrações de fósforo nos reservatórios dentro dos padrões aceitáveis. Em média foram observados aumentos das falhas devido a qualidade imprópria na ordem de 45% nos reservatórios, sendo os menores vistos na Eng. Armando R. Gonçalves e Itans e os maiores em Cruzeta e Passagem de Traíras. O aumento das falhas dependeu dos valores das duas variáveis utilizadas (carga afluenta e fluxo de fósforo). Quanto maior for a carga e menor o fluxo, maiores serão os períodos de tempo que o reservatório apresenta concentrações acima do limite da Classe 2.

Ao se otimizar as regras de operação dos reservatórios considerando qualidade, verificou-se que em condições desfavoráveis de carga e fluxo, ou seja, com elevadas cargas de fósforo afluenta aos reservatórios e baixo fluxo de sedimentação do fósforo da coluna d'água para o sedimento, não foi possível atender as garantias desejadas a D1 em nenhum reservatório devido as elevadas concentrações de fósforo. Sendo assim, nestas condições, os reservatórios não conseguem atender as demandas prioritárias e manter as concentrações de fósforo nos níveis aceitáveis, mesmo quando se considerou Classe 3.

Na situação intermediária foi possível atender aos critérios de otimização em determinados reservatórios, como em Boqueirão de Parelhas e Marechal Dutra que foram possíveis garantir até 90% de atendimento a D1, Cruzeta que foi capaz de garantir até 95% de atendimento a D1 e Itans que conseguiu garantir até 100% de atendimento a D1. Nesta situação, foram vistos aumentos significativos dos déficits hídricos e dos números de falhas para D2, pois foi necessário maiores volumes armazenados no período úmido a fim de evitar elevadas concentrações de fósforo. Além disso, os intervalos máximos sem atendimento adequado a D1 foram elevados.

Na situação favorável foi possível otimizar as regras de operação para atender as garantias de abastecimento a D1 em todos os cenários, obtendo resultados mais satisfatórios em relação a aplicação da POP, como também fornecimentos de água a D2, durante as estiagens, equivalentes aos encontrados nas regras otimizadas considerando apenas quantidade de água. Nestas condições como a operação do reservatório não causa grandes variações nos volumes armazenados, conseqüentemente, não intensifica as perdas por vertimentos e evaporação em relação a otimização considerando apenas quantidade.

Por fim, verificou-se que minimizar a escassez hídrica e reduzir as concentrações de fósforo presentes na coluna d'água pode ser objetivos antagônicos, nem sempre possíveis de serem otimizados. No caso de cargas de fósforo afluentes elevadas, apenas reduzir os fornecimentos de água para os usuários pode não ser suficiente para garantir a qualidade adequada, além de aumentar as perdas por evaporação e vertimento, devendo-se, por tanto, investir em ações para reduzi-las, tais como tratamento de águas residuárias, recuperação, proteção e conservação de matas ciliares e, até mesmo, técnicas para aumentar a sedimentação de fósforo.

5. REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Águas – ANA. 2010. Termos de referência para a elaboração do plano de recursos hídricos da bacia do rio piranhas-açu. ANA, 2010
- Agência Nacional de Águas – ANA. 2016. Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Piancó Piranhas-Açu. Resumo Executivo. ANA, 2016
- Agência Nacional de Águas -ANA. 2016. Dados da Bacia do Rio Piancó Piranhas-Açu. Relatório Técnico. Disponível em: <<ftp://ftpana.ana.gov.br>> Acesso em: 18/02/2019.

- Ahmad, I.; Zhang, F.; Liu, J.; Anjum, M. N.; Zaman, M.; Tayyab, M.; Waseem, M.; Farid, H. U. 2018. "A linear bi-level multi-objective program for optimal allocation of water resources". *PLoS ONE* 13(2).
- Ahmad, A.; El-Shafie, A.; Razali, S. F. M.; Mohamad, Z. S. 2014. "Reservoir optimization in water resources: A review". *Water Resources Management* 28: 3391-3405
- Ahmad, M. D.; Giordano, M. 2010. "The karkheh river basin: The food basket of iran under pressure". *Water International* 35(5): 522-544
- Ahmadi, M.; Bozorg-Haddad, O.; Marin˜o, M. A. 2014. "Extraction of flexible multi-objective real-time reservoir operation rules." *Water Resour Manag* 28(1):131–147.
- Ahmadianfar, I.; Adib, A.; Taghian, M. 2017. "Optimization of multi-reservoir operation with a new hedging rule: application of fuzzy set theory and NSGA-II". *Applied Water Science* 7: 3075-3086
- Alahdin, S.; Ghafouri, H. R.; Haghighi, A. 2019. "Multi-Reservoir System Operation in Drought Periods with Balancing Multiple Groups of Objectives." *KSCE Journal of Civil Engineering* 23(2): 914-922
- Alvalá, R. C. S.; Cunha, A. P. M. A.; Brito, S. S. B.; Seluchi, M. E.; Marengo, J. A.; Moraes, O. L.L.; Carvalho, M. A. 2017. "Drought Monitoring in the Brazilian Semiarid Region." *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*.
- Araújo, F.; Becker, V.; Attayde, J. L. 2016. "Shallow Lake Restoration and Water Quality Management by the Combined Effects of Polyaluminium Chloride Addition and Benthivorous Fish Removal: A Field Mesocosm Experiment." *Hydrobiologia* 778: 243-252.
- Araújo, F.; Dos Santos, H. R.; Becker, V.; Attayde, J. L. 2018. "The Use of Polyaluminium Chloride as a Restoration Measure to Improve Water Quality in Tropical Shallow Lakes." *Acta Limnologica Brasiliensia* 30.
- Azari, A.; Hamzeh, S.; Naderi, S. 2018. "Multi-Objective Optimization of the Reservoir System Operation by Using the Hedging Policy." *Water Resources Management* 32: 2061-2078.
- Babel, M. S.; Das Gupta, A.; Nayak, D. K. 2005. "A model for optimal allocation of water to competing demands". *Water Resources Management* 19: 693-712.
- Barbosa, J. E. D. L.; Medeiros, E. S. F.; Brasil J.; Cordeiro, R. S.; Crispim, C. B.; Da Silva, G. H. G. 2012. "Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology and management." *Acta Limnol Bras* 24(1): 103-118.

- Barbosa, L. Z. 2012. "Técnicas de otimização baseadas no paradigma de enxames de partículas e sua aplicação ao projeto de equipamentos eletromagnéticos. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas. São Paulo.
- Barbosa, I. B. R.; Cirilo, J. A. 2015. "Contribuição Média de Fósforo Em Reservatório de Abastecimento de Água – Parte 1." *Engenharia Sanitaria e Ambiental* 20(1): 39-46.
- Barros, M. T. L.; Zambon, R. C.; Barbosa, P. S. F.; Yeh, W. W. G. 2008. "Planning and Operation of Large-Scale Water Distribution Systems with Preemptive Priorities". *Journal of Water Resources Planning and Management* 134: 247-256.
- Bayazit, M.; Ünal, N. E. 1990. "Effects of hedging on reservoir performance". *Water Resources Research* 26(4): 713-719.
- Bezerra, A. F. M.; Mattos, A.; Becker, V. 2011. "Balanço de massa de fósforo e a eutrofização em reservatórios do semiárido do Rio Grande do Norte - Brasil." *XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Maceió.
- Bezerra, L. A. V.; Paulino, W. D.; Garcez, D. S.; Becker, H.; Sánchez-Botero, I. 2014a. "Limnological characteristics of a reservoir in semiarid Northeastern Brazil subject to intensive tilapia farming (*Oreochromis niloticus* Linnaeus , 1758)". *Acta Limnologica Brasiliensia* 26(1): 47-59.
- Bezerra, A.; Becker, V.; Mattos, A. 2014b. "Balanço de Massa de Fósforo Total e o Estado Trófico Em Reservatórios Do Semiárido Brasileiro." *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 19(2): 67-76.
- Bhatia, N.; Srivastav, R.; Srinivasan, K. 2018. "Season-Dependent Hedging Policies for Reservoir Operation-a Comparison Study." *Water (Switzerland)* 10(10): 1311.
- Braga, G. G.; Becker, V.; De Oliveira, J. N. P.; De Mendonça Jr., J. R.; Bezerra, A. F. M.; Torres, L. M.; Galvão A. M. F.; Mattos, A. 2015. "Influence of extended drought on water quality in tropical reservoirs in a semiarid region". *Acta Limnologica Brasiliensia* 27(1): 15-23.
- 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: 26. nov. 2018.
- Bouvy, M.; Nascimento, S. N.; Molica, R. J. R.; Ferreira, A.; Huszar, V.; Azevedo, S. M.

- F. O. 2003. "Limnological features in Tapacura reservoir (northeast Brazil) during a severe drought." *Hydrobiologia* 493: 115-130.
- Cabral, S. L.; Souza Filho, F. A.; Campos, J. N. B.; Silveira, C. S.; Lemos, W. E. D. 2013. "Determinação do volume de espera do reservatório Castanhão-CE utilizando series sazonais de vazões." *Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*.
- Campos, J. N. B.; Studart, T. M. C.; Martinz, D. D. G.; Nascimento, L. S. V. 2003. "Contribuições ao debate sobre as eficiências de pequenos e grandes reservatórios." *Rev. Brasileira de Recursos Hídricos* 8(2):31-38.
- Castelletti, A.; Pianosi, F.; Quach, X.; Soncini-Sessa, R. 2012. "Assessing Water Reservoirs Management and Development in Northern Vietnam." *Hydrology and Earth System Sciences* 16: 189-199.
- Cavalcante, H.; Araújo, F.; Becker, V. 2018. "Phosphorus dynamics in the water of tropical semiarid reservoirs in a prolonged drought period". *Acta Limnologica Brasiliensia* 30: e105.
- Cecchi, G.; Munfo, M.; Baiocco, F.; Andreani, P.; Mancini, L. 2007. "Estimating River Pollution from Diffuse Sources in the Viterbo Province Using the Potential Non-Point Pollution Index." *Annali dell'Istituto Superiore di Sanita* 43(3): 295-301.
- Chang, L. C.; Chang, F. J. 2009. "Multi-objective evolutionary algorithm for operating parallel reservoir system". *Journal of Hydrology*, 377(1-2):12-20.
- Chang, J.; Guo, A.; Wang, Y.; Ha, Y.; Zhang, R.; Xue, L.; Tu, Ziqian. 2019. "Reservoir Operations to Mitigate Drought Effects With a Hedging Policy Triggered by the Drought Prevention Limiting Water Level." *Water Resources Research* 55: 904-922.
- Chang, F.; Wang, Y.; Tsai, W. 2016. "Modelling Intelligent Water Resource Allocation for multi-users." *Water Resource Management*. 30:1395-1413
- Chaves, P.; Kojiri, T. 2007. "Deriving reservoir operational strategies considering water quantity and quality objectives by stochastic fuzzy neural networks". *Advances in Water Resources* 30: 1329:1341.
- Chaves, P.; Tsukatani, T.; Kojiri, T. 2004. "Operation of storage reservoir for water quality by using optimization and artificial intelligence techniques". In *Mathematics and Computers in Simulation* 67: 419-432.
- Chaves, P.; Kojiri, T.; Yamashiki, Y. 2003. "Optimization of storage reservoir considering water quantity and quality". *Hydrological Processes* 17: 2769-2793.
- Chaves, P.; Kojiri, T. 2003. "Multi-objective storage reservoir operation under

- uncertainty”. *Disaster Prevention Research Institute Annuals* 45.
- Chellappa, N. T.; Câmara, F. R. A.; Rocha, O. 2009. “Phytoplankton community: indicator of water quality in the Armando Ribeiro Gonçalves Reservoir and Pataxó Channel, Rio Grande do Norte, Brazil”. *Brazilian Journal of Biology* 69(2): 241-251.
- Correia, C. A.; Studart, T. M. C.; Campos, J. N. B. 2012. "Resolução de conflitos em bacias compartilhadas: análise da ferramenta construção de consenso do Global Water Partnership (GWP) aplicada à Bacia do Rio Poti." *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 17(4):183-195.
- Da 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* 778: 75-89.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 2005. "Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea - Diagnóstico do município de Cruzeta." Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios - PRODEEM. Recife.
- Curi, W. F.; Celeste, A. B.; Curi, R. C.; Rodrigues, A. C. L. 2011. "Um modelo de outorga para bacias controladas por reservatórios: 1 - desenvolvimento do modelo que contempla demandas múltiplas e variáveis mensalmente." *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 16(4):73-82.
- Deb, K.; Pratap, A.; Agarwal, S.; Meyarivan, T. (2002) “A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II”. *IEEE T Evolut Comput* 6(2):182–197.
- Demertzi, K. A.; Papamichail, D. M.; Georgiu, P. E.; Karamouzis, D. N.; Aschonitis, V. G. 2014. “Assessment of rural and highly seasonal tourist activity plus drought effects on reservoir operation in a semi-arid region of Greece using the WEAP model”. *Water International* 39(1): 23-34.
- Dhar, A.; Datta, B. 2008. “Optimal operation of reservoirs for downstream water quality control using linked simulation optimization”. *Hydrological Processes* 22: 842-853.
- Ding, S., Han, C.; Wang, Y.; Yao, L.; Wang, Y.; Xu, D.; Sun, Q.; Williams, P.N.; Zhang, C. 2015. “In situ, high-resolution imaging of labile phosphorus in sediments of a large eutrophic lake”. *Water Research* 74: 100-109.
- Draper, A. J.; Lund, J. R. 2004. “Optimal Hedging and Carryover Storage Value”. *Journal of Water Resources Planning and Management* 130: 83-87.
- Doig, L. E.; Norht, R. L.; Hudson, J. J.; Hewlett, C.; Lindenschmidt, K. E.; Liber, K. 2017. “Phosphorus Release from Sediments in a River-Valley Reservoir in the

- Northern Great Plains of North America.” *Hydrobiologia* 787: 323-339.
- Doll, P; Hauschild, M. 2002. “Model-based scenarios of water use in two semi-arid Brazilian states”. *Regional Environmental Change* 27(3): 310-320.
- Efstratiadis, A.; Hadjibiros, K. 2011. “Can an environment-friendly management policy improve the overall performance of an artificial lake? Analysis of a multipurpose dam in Greece”. *Environmental Science and Policy* 14:1151-1162.
- Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte. 2016. Monitoramento Pluviométrico. Disponível em: < <http://emparn.rn.gov.br> > Acesso em: 28/02/2019.
- Ferreira, R. S. 2015. "Qualidade da água de um reservatório e do solo da zona ripária sob diferentes usos na região semiárida do Rio Grande do Norte." *Dissertação (Mestrado) - Universidade do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Sanitária*. Natal.
- Figueirêdo, M. C. B.; Vieira, V. P. P. B.; Mota, F. S. B. 2006. "Avaliação do risco de eutrofização em reservatórios da Bacia do Acaraú, Ceará, Brasil." *Rev. Tecnol. Fortaleza* 27(2):179-189.
- Freitas, S. C.; Chaves, H. M. 2014. "Estimativa da pegada hídrica cinza relativa ao fósforo da bacia hidrográfica do Ribeirão Piripau (DF/GO)." *Rev. Brasileira de Recursos Hídricos* 19(3):141-149.
- 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 Australis* 15(3): 655-665.
- Gao, X.; Zhang, S.; Sun, B.; Li, N.; Liu, Y.; Wang, Y. 2019. “Assessing the Effects of Restoration Measures on Water Quality in a Large Shallow Reservoir.” *Sustainability (Switzerland)* 11(19):5347.
- Gondim, R. B. 2018. "Avaliação do impacto do reúso de águas na alocação hídrica dos reservatórios estratégicos da Bacia do Rio Acaraú, Ceará." *Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ceará. Departamento de Engenharia Agrícola*. Fortaleza.
- Guo, X.; Hu, T.; Zeng, X.; Li, X. 2013. “Extension of Parametric Rule with the Hedging Rule for Managing Multireservoir System during Droughts”. *Journal of Water Resources Planning and Management* 139(2).
- Guo, X.; Hu, T.; Zhang, T.; Lv, Y. 2012. “Bilevel model for multi-reservoir operating policy in inter-basin water transfer-supply project”. *Journal Hydrology* 424-425:252-263.
- Bozorg Haddad, O.; Beygi, S.; Mariño, M. A. 2014. “Reservoir Water Allocation under

- Abrupt Pollution Condition”. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 142(1).
- Huang, C.; Zhao, J.; Wang, Z.; Shang, W. 2016. “Optimal Hedging Rules for Two-Objective Reservoir Operation: Balancing Water Supply and Environmental Flow.” *Journal of Water Resources Planning and Management* 142(12).
- 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: 07. fev. 2020.
- Jeppesen, E.; Brucet, S.; Naselli-Flores, L.; Papastergiadou, E.; Stefanidis, K.; Nöges, T.; Nöges, P.; Attayde, J. L.; Zohary, T.; Coppens, J.; Bucak, T.; Menezes, F., R.; Freitas, F. R. S.; Kernan, M.; Soondergard, M.; Becklioglu, 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: 201-227.
- Ji, Y.; Lei, X.; Cai, S.; Wang, X. 2016. “Hedging rules for water supply reservoir based on the model of simulation and optimization”. *Water (Switzerland)* 8(6): 249.
- Kang, L.; Zhang, S.; Ding, Y.; He, X. 2016. “Extraction and preference ordering of multireservoir water supply rules in dry years”. *Water (Switzerland)* 8(1):28.
- Karamouz, M.; Moridi, A.; Fayyazi, H. M. 2008. “Dealing with conflict over water quality and quantity allocation: A case study.” *Int. Journal Scientia Iranica* 15(1):34-49.
- Karamouz, M.; Araghinejad, S. 2008. “Drought mitigation through long-term operation of reservoirs: Case study”. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-Asce* 134:471-478.
- Karamouz, M.; Ahmadi, A.; Moridi, A. 2009. “Probabilistic reservoir operation using Bayesian stochastic model and support vector machine”. *Advances in Water Resources* 32:1588-1600.
- Kerachian, R.; Karamouz, M. 2007. “A stochastic conflict resolution model for water quality management in reservoir-river systems”. *Advances in Water Resources* 30:866-882.
- Kerachian, R.; Karamouz, M. 2006. “Optimal reservoir operation considering the water quality issues: A stochastic conflict resolution approach”. *Water Resources Research* 42.
- Klemeš, V. 1977. “Value of information in reservoir optimization”. *Water Resources*

Research 13(5):837-850.

- Krol, M.; Jaeger, A.; Bronstert, A.; Güntner, A. 2006. "Integrated modelling of climate, water, soil, agricultural and socio-economic processes: A general introduction of the methodology and some exemplary results from the semi-arid north-east of Brazil". *Journal of Hydrology* 328:417-431.
- Kumar, K.; Kasthuriangan, S. 2018. "Generalized Linear Two-Point Hedging Rule for Water Supply Reservoir Operation." *Journal of Water Resources Planning and Management* 144(9).
- Labadie, J. W. 2004. "Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review". *Journal of Water Resources Planning and Management* 130:93-111.
- Lacerda, L. D.; Santos, J. A.; Marins, R.; Da Silva, F. F. 2018. "Limnology of the largest multi-use artificial reservoir in NE Brazil: The Castanhão Reservoir, Ceará State". *Annals of the Brazilian Academy of Sciences* 90(2):2073-2096.
- Lima, R. N. S.; Ribeiro, C. B. M.; Barbosa, C. C. F.; Rotunno Filho, O. C. 2016. "Estudo Da Poluição Pontual e Difusa Na Bacia de Contribuição Do Reservatório Da Usina Hidrelétrica de Funil Utilizando Modelagem Espacialmente Distribuída Em Sistema de Informação Geográfica." *Engenharia Sanitaria e Ambiental* 21(1):139-150.
- Lima, C. A. G.; Curi, W. F.; Curi, R. C. 2007. "Marco regulatório para a gestão do sistema Curema-Açu e as disponibilidades hídricas do reservatório Curema-Mãe D'Água." *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 12(4): 73-86.
- Lima, H. V. C.; Lanna, A. E. L. 2005. "Modelos para Operação de Sistemas de Reservatórios: Atualização do Estado da Arte". *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 10(3):5-22.
- Liu, D.; Guo, S.; Shao, Q.; Jiang, Y.; Chen, X. 2014. "Optimal Allocation of Water Quantity and Waste Load in the Northwest Pearl River Delta, China." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 28:1525-1542.
- Lopes, A. V.; Freitas, M. A. S. 2007. "A alocação de água como instrumento de gestão de recursos hídricos experiências brasileiras." *Revista de Gestão de Água da America Latina* 4(1):5-28.
- Londe, L. R.; Novo, E. M. L. M.; Barbosa, C.; Araujo, C. A. S. 2016. "Water residence time affecting phytoplankton blooms: study case in Ibatinga Reservoir (São Paulo, Brazil) using Landsat/TM images." *Brazilian Journal of Biology* 76(3):664-672.
- Loucks, D. P.; van Beek, E. 2005. "Water Resources Systems Planning And Management. An Introduction to Methods, Models and Applications". *United Nations Educational,*

- Maass, A.; Hufschmidt, M. M.; Dorfman, H. A.; Jr. Thomas, S. A.; Marglin, Fair, G. M. 1962. *Design of water-resource systems*, Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Machado, E. C. M. N.; Galvão, C. O.; Souza Filho, F. A. 2012. "Alocação qualitativa de águas em bacias hidrográficas: metodologia multiobjetivo inserida no contexto da gestão dos recursos hídricos." *Rev. Brasileira de Recursos Hídricos* 17(2):213-227.
- Matsueda, L. C. O. 2015. "Análise e otimização do problema de roteamento de veículos com muitos objetivos e janelas de tempo flexíveis". *Dissertação (Mestrado)* - Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Biológicas. Ouro Preto.
- Medeiros, C. E. B. F. S. 2016. "Os impactos do uso e ocupação e vento de seca extrema na qualidade da água e do solo de um manacial tropical do semiárido." *Dissertação (Mestrado)* - Universidade do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Sanitária. Natal.
- Medeiros, L. C.; Mattos, A.; Lüring, 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* 49:293-307.
- De Melo, J. F. G. 2019. "Uso e ocupação em zonas ripárias e sua implicação na qualidade do solo e da água de ecossistemas aquáticos." *Dissertação (Mestrado)* - Universidade do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Sanitária. Natal.
- Men, B.; Wu, Z.; Liu, H.; Li, Y.; Zhao, Y. 2019a. "Research on Hedging Rules Based on Water Supply Priority and Benefit Loss Ofwater Shortage-A Case Study of Tianjin, China." *Water (Switzerland)* 11(4):778-791.
- Men, B.; Wu, Z.; Li, Y.; Liu, H. 2019b. "Reservoir Operation Policy Based on Joint Hedging Rules." *Water (Switzerland)* 11(3):419-434.
- Meneses, B. M.; Reis, R.; Vale, M. J.; Saraiva, R. 2015. "Land Use and Land Cover Changes in Zêzere Watershed (Portugal) - Water Quality Implications." *Science of the Total Environment* 527:439-447.
- Miranda, K. R. 2014. "Influência do uso e ocupação de solo na qualidade da água de um reservatório mesotrófico na região semiárida tropical." *Dissertação (Mestrado)* - Universidade do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós

Graduação em Engenharia Sanitária. Natal.

- Moghaddasi, M.; Araghinejad, S.; Morid, M. 2010. "Long-Term Operation of Irrigation Dams Considering Variable Demands: Case Study of Zayandeh-rud Reservoir, Iran". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 136(5):309-316.
- Moghaddasi, M.; Araghinejad, S.; Morid, S. 2013. "Water Management of Irrigation Dams Considering Climate Variation: Case Study of Zayandeh-rud Reservoir, Iran". *Water Resources Management* 27:1651-1660.
- De Moraes Neto, J. V. 2018. "Áreas de solo exposto intensificam o processo de eutrofização no semiárido brasileiro." *Dissertação (Mestrado) - Universidade do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Sanitária*. Natal.
- Mosley, L. M. 2015. "Drought impacts on the water quality of freshwater systems; review and integration. *Earth Science Rev.*
- Morales-Marín, L. A.; Wheeler, H. S.; Lindenschmidt, K. E. 2017. "Assessment of nutrient loadings of a large multipurpose prairie reservoir". *Journal of hydrology* 550:166-185.
- Neelakantan, T. R.; Pundarikanthan, N. V. 1999. "Hedging rule optimisation for water supply reservoirs system". *Water Resources Management* 13:409-426.
- Neelakantan, T. R.; Pundarikanthan, N. V. 2000. "Neural Network-Based Simulation-Optimization Model for Reservoir Operation". *Journal of Water Resources Planning and Management* 126:57-64.
- Ni, Z.; Wang, S. 2015. "Historical accumulation and environmental risk of nitrogen and phosphorus in sediments of Erhai Lake, Southwest China". *Ecological Engineering* 79:42-53.
- Nielsen, A.; Trolle, D.; Bjerring, R.; Sondergaard, M.; Olesen, J. E.; Janse, J. H.; Moou, W. M.; Jeppesen, E. 2014. "Effects of Climate and Nutrient Load on the Water Quality of Shallow Lakes Assessed through Ensemble Runs by PCLake." *Ecological Applications* 24(8):1926-1944.
- Nikoo, M. R.; Kerachian, R.; Karimi, A.; Azadnia, A. A.; Jafarzadegan, K. 2014. "Optimal water and waste load allocation in reservoir-river systems: A case study". *Environmental Earth Sciences* 71:4127-4142.
- Nunes, T. H. C.; Galvão, C. O.; Rêgo, J. C. 2016. "Rule curve for seasonal increasing of water concessions in reservoirs with low regularized discharges." *Rev. Brasileira de Recursos Hídricos* 21(3):493-501.

- De Oliveira, C. J. S. 2019. "Capacidade de carga de fósforo de seis reservatórios da região semiárida brasileira." *Dissertação (Mestrado) - Universidade do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental*. Natal.
- De Oliveira, J. N. P. 2012. "A influência da poluição difusa e do regime hidrológico peculiar do semiárido na qualidade da água de um reservatório tropical." *Dissertação (Mestrado) - Universidade do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Sanitária*. Natal.
- Oliveira, R.; Loucks, D. P. 1997. "Operating rules for multireservoir systems". *Water Resources Research* 33(4):839-852.
- Panosso, R.; Costa, I. A. S.; De Souza, N. R.; Attayde, J. L.; Cunha, S. R. S.; Gomes, F. C. F. 2007. "Cianobactérias e cianotoxinas em reservatórios do estado do rio grande do norte e o potencial controle das florações pela tilápia do nilo (*Oreochromis Niloticus*).". *Oecologia Brasiliensis* 11(3):433-449.
- Pinheiro, L. S.; Rocha, Y. M. G.; Sansana, M. P. 2013. "Quantificação de exportação de fósforo numa bacia do semiárido cearense." *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*. Foz do Iguaçu. Brasil.
- Pinheiro, M. I. T. 2002. "Tipologia de conflitos de usos das águas: Estudos de casos no estado do ceará." *Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos). Universidade Federal do Ceará*. Fortaleza.
- Pinheiro, M. I. T.; Campos, J. N. B.; Studart, T. M. C. 2011. "Conflitos por água e alocação negociada: o caso do vale dos Carás no Ceará." *Revista de Administração Pública* 45(6):1655-72.
- Programa Água Azul. Monitoramento das águas superficiais. Disponível em: <http://programaaguaazul.ct.ufrn.br/relatorios/aguas_superficiais/> Acesso em: 28 de jan de 2019.
- R Core Team. 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rangel, L. M.; Silva, L. H. S.; Rosa, P.; Roland, F.; Huszar, V. L. M. 2012. "Phytoplankton biomass is mainly controlled by hydrology and phosphorus concentrations in tropical hydroelectric reservoirs." *Hydrobiologia* 693:13-28.
- Raje, D.; Mujumdar, P. P. 2010. "Reservoir performance under uncertainty in hydrologic impacts of climate change". *Advances in Water Resources* 33:312-326.

- Rani, D.; Moreira, M. M. 2010. "Simulation-optimization modeling: A survey and potential application in reservoir systems operation". *Water Resources Management* 24:1107-1138.
- Reich, P.; Lake, P. S. 2015. "Extreme Hydrological Events and the Ecological Restoration of Flowing Waters." *Freshwater Biology* 60(12):2639-2652.
- Roa-García, M. C. 2014. "Equity, efficiency and sustainability in water allocation in the andes: Trade-offs in a full world". *Water Alternatives* 7(2):298-319.
- Da Rocha Junior, C. A. N.; Da 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 Limnologica Brasiliensia* 30.
- Da Rocha Junior, C.A.N. 2018. "Efeitos da variação de volume e disponibilidade de luz sobre a dinâmica temporal da biomassa fitoplanctônica em um reservatório tropical semiárido." *Dissertação (Mestrado) - Universidade do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Sanitária*. Natal.
- Rodrigues, A. C. L.; Celeste, A. B.; Curi, W. F.; Curi, R. C.; Barbosa, R. L. 2011. "Um modelo de outorga para bacias controladas por reservatórios: 2 - Aplicação do modelo na bacia hidrográfica do Rio Piancó - PB." *Rev. Brasileira de Recursos Hídricos* 16(4):83-94.
- Salas, H. J.; Martino, P. 1991. "A simplified phosphorus trophic state model for warm-water tropical lakes". *Water Research* 25(3):341-350.
- Santos, J. A.; Marins, R. V.; Aguiar, J. E.; Chalar, G.; Silva, F. A. T. F.; Lacerda, L. D. 2017. "Hydrochemistry and trophic state change in a large reservoir in the Brazilian northeast region under intense drought conditions". *Journal of Limnology* 76(1): 41-51.
- Schindler, David W. 2012. "The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes". *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 279: 4322-4333.
- Shiau, J. T.; Hung, Y. N.; Sie, H. E. 2018. "Effects of Hedging Factors and Fuzziness on Shortage Characteristics During Droughts." *Water Resources Management* 32: 1913-1929.
- Shiau, J. T.; Lee, H. C. 2005. "Derivation of optimal hedging rules for a water-supply reservoir through compromise programming". *Water Resources Management* 19: 111-132.
- Shiau, J. T. 2009. "Optimization of reservoir hedging rules using multiobjective genetic algorithm." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 135:5(355), 355–363.

- Shiau, J. T.. 2011. "Analytical optimal hedging with explicit incorporation of reservoir release and carryover storage targets". *Water Resources Research* 135: 355-363.
- Shih, J. S.; ReVelle, C. (1994). "Water-supply operations during drought: Continuous hedging rule." *J. Water Resour. Plann. Manage* 120(5): 613–629.
- Shih, J. S.; ReVelle, C. (1995). "Water supply operations during drought: A discrete hedging rule." *Eur. J. Oper. Res.* 82(1): 163–175.
- Shirangi, E.; Kerachian, R.; Bajestan, M. S. 2008. "A simplified model for reservoir operation considering the water quality issues: Application of the Young conflict resolution theory". *Environmental Monitoring and Assessment* 146: 77-89.
- Shokri, A.; Bozorg Haddad, O; Mariño, M. A. 2014. "Multi-Objective Quantity-Quality Reservoir Operation in Sudden Pollution". *Water Resources Management* 28: 567-586.
- Silva, D. H. X. 2017. "Controle do fósforo em reservatório eutrofizado no semiárido: experimento em microescala com a técnica 'flock&lock'." *Monografia (Graduação) - Universidade do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Curso de Engenharia Ambiental*. Natal.
- Da Silva, P. G. C. 2019. "Comportamento da relação evaporação-vertimento-liberação de água pelos reservatórios sob diferentes regras de operação." *Dissertação (Mestrado) - Universidade do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental*. Natal.
- Da Silva, S. M. O.; Souza Filho, F. A.; Aquino, S. H. S. 2017. "Avaliação do risco da alocação de água em período de escassez hídrica: o caso do Sistema Jaguaribe-Metropolitano". *Engenharia Sanitaria e Ambiental* 22(4):749-760.
- Soltani, F.; Kerachian, R.; Shirangi, E. 2010. "Developing operating rules for reservoirs considering the water quality issues: Application of ANFIS-based surrogate models". *Expert Systems with Applications* 37:6639-6645.
- Søndergaard, M.; Bjerring, R.; Jeppesen, E. 2013. "Persistent internal phosphorus loading during summer in shallow eutrophic lakes". *Hydrobiologia* 710: 95-107.
- De Souza, T. C. N. 2010. "Algoritmo evolucionário para a distribuição de produtos de petróleo por redes de produtos." *Dissertação (Mestrado) - Universidade do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós Graduação em Sistemas e Computação*. Natal.
- Srinivas, N.; Deb, K. 1994. "Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms". *Evol. Comput.* 2(3):221–248

- Srinivasan, K.; Kumar, K. 2018. "Multi-Objective Simulation-Optimization Model for Long-term Reservoir Operation using Piecewise Linear Hedging Rule". *Water Resources Management* 32:1901-1911.
- Srinivasan, K.; Philipose, M. C. 1996. "Evaluation and selection of hedging policies using stochastic reservoir simulation". *Water Resources Management* 10:163-188.
- Srinivasan, K.; Philipose, M. C. 1998. "Effect of Hedging on Over-Year Reservoir Performance". *Water Resources Management* 12: 95-120.
- Stedinger, J. R. 1984. "The Performance of LDR Models for Preliminary Design and Reservoir Operation". *Water Resources Research* 20(2): 215-224.
- Sun, X.; Ma, C.; Lian, J. 2018. "Optimal Operation of Danjiangkou Reservoir Using Improved Hedging Model and Considering the Effects of Historical Decisions." *Journal of Water Resources Planning and Management* 144(1).
- Taghian, M.; Rosbjerg, D; Haghighi, A.; Madsen, H. 2014. "Optimization of Conventional Rule Curves Coupled with Hedging Rules for Reservoir Operation". *Journal of Water Resources Planning and Management* 140(5): 693-698.
- Tahiri, A.; Ladeveze, D.; Chiron, P.; Archimede, B.; Lhuissier, L. 2018. "Reservoir Management Using a Network Flow Optimization Model Considering Quadratic Convex Cost Functions on Arcs". *Water Resources Management* 32:3505-3518.
- Tan, Qiao-feng; Wang, X; Wang, H.; Wang, C.; Lei, X.; Xiong, Y.; Zhang, W. 2017. "Derivation of optimal joint operating rules for multi-purpose multi-reservoir water-supply system". *Journal of Hydrology* 551:253-264.
- Tribuna do Norte (2019). "RN está a 2.160 dias em situação de emergência pela seca". Disponível em: < <http://www.tribunadonorte.com.br/noticia/rn-esta-ha-2-160-dias-em-situacao-a-o-de-emergencia-pela-seca/458989> > Acesso em 10 de Mar de 2020.
- Tu, M. Y.; Hsu, N. S.; Tsai, F. T. C.; Yeh, W. W. G. 2008. "Optimization of hedging rules for reservoir operations." *Journal of Water Resources Planning and Management* 134:3-13.
- Tu, M-Y.; Hsu, N-S.; Yeh, W. W. G. 2003. "Optimization of Reservoir Management and Operation with Hedging Rules". *Journal of Water Resources Planning and Management* 129:86-97.
- Van Oel, P. R.; Krol, M. S.; Hoekstra, A. Y. 2012. "Application of multi-agent simulation to evaluate the influence of reservoir operation strategies on the distribution of water availability in the semi-arid Jaguaribe basin, Brazil". *Physics and Chemistry of the Earth* 47:173-181.

- Van Oosterhoud, F.; Lürling, M. 2010. "Effects of the novel 'Flock & Lock' lake restoration technique on Daphnia in Lake Rauwbraken (The Netherlands)". *Journal of Plankton Research* 33(2):255-263.
- De Vasconcelos, V. H. F. 2011. "Emissões naturais e antrópicas de nitrogênio e fósforo para os principais açúdes da bacia hidrográfica do Rio Seridó, RN." *Dissertação (Mestrado) - Universidade do Rio Grande do Norte. Centro de Biociências. Programa de Pós Graduação em Ecologia*. Natal.
- Viana, L. G. 2016. "Dinâmica de variáveis limnológicas em reservatório durante período de estiagem prolongada, semiárido Brasileiro". *Dissertação - Mestrado em Ciências e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal da Paraíba*.
- Vianna Jr., W. P.; Lanna, A. E., 2002. "Simulação e Otimização da Operação de um Sistema de Reservatórios: Bacia do Rio Curu". *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 7(3):63-83.
- Vieira, V. P. P. B. 1996. "Recursos hídricos e o desenvolvimento sustentável do semi-árido nordestino." *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 1(1): 89-107.
- Vieira, V. P. P. B. 2002. "Sustentabilidade do semi-árido brasileiro: Desafios e perspectivas." *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 7(4):105-112.
- Vieira, V. P. P. B. 2003. "Desafios da gestão integrada de recursos hídricos no semi-árido." *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 8(2):7-17.
- Wang, S.; Qian, X.; Han, B-P.; Luo, L-C. Hamilton, D. P. 2012. "Effects of local climate and hydrological conditions on the thermal regime of a reservoir at Tropic of Cancer, in southern China". *Water Research* 46:2591-2604.
- Wang, J.; Hu, T.; Zeng, X.; Yasir, M. 2017. "Storage targets optimization embedded with analytical hedging rule for reservoir water supply operation". *Water Science & Technology: Water Supply* 18(2):622-629.
- Wang, Q.; Zhou, H.; Liang, G.; Xu, H. 2015. "Optimal Operation of Bidirectional Inter-Basin Water Transfer-Supply System". *Water Resources Management* 29:3037-3054.
- Waters, S.; Webster-Brown, J. G. 2016. "The use of a mass balance phosphorus budget for informing nutrient management in shallow coastal lakes." *Journal Of Hydro-Environment Research* 10:32-49.
- Welch, E.B.; Cooke, G. D. 2005. "Internal phosphorus loading in shallow lakes: Importance and control". *Lake Reservoir Management* 21(2): 209-217.
- Xu, Bin; Zhong, P-A; Huang, Q.; Wang, J.; Yu, Z.; Zhang, J. 2017. "Optimal Hedging

- Rules for Water Supply Reservoir Operations under Forecast Uncertainty and Conditional Value-at-Risk Criterion.” *Water (Switzerland)* 9:568-585.
- Xu, E.; Zhang, H. 2018. “A Model for Integrated Spatial Land Use Characteristics Linking to Surface Nutrient Concentration.” *International Journal of Digital Earth* 11(10):1064-1084.
- Xu, Z.; Cai, X.; Yin, X.; Su, M.; Wu, Y.; Yang, Z. 2019. “Is Water Shortage Risk Decreased at the Expense of Deteriorating Water Quality in a Large Water Supply Reservoir?” *Water Research* 165.
- Yilmaz, G. B.; Sivri, N. 2014. “estimation of nutrient loads in ergene basin through gis.” *Fresenius Environmental Bulletin* 23(12): 3212-3221.
- You, J. Y.; Cai, X. 2008. “Hedging rule for reservoir operations: 1. A theoretical analysis”. *Water Resources Research* 44.
- Yu, C.; Li, Z.; Xu, Z.; Yang, Z. 2020. “Lake Recovery from Eutrophication: Quantitative Response of Trophic States to Anthropogenic Influences.” *Ecological Engineering* 143.
- Zamani, R.; Akhond-Ali, A. M.; Ahmadianfar, I.; Elagib, N. A. 2017. “Optimal Reservoir Operation under Climate Change Based on a Probabilistic Approach”. *Journal of Hydrologic Engineering* 22(10).
- Zhang, J.; Wang, X.; Liu, P.; Li, Z.; Gong, W.; Duan, Q.; Wang, H. 2017. “Assessing the Weighted Multi-Objective Adaptive Surrogate Model Optimization to Derive Large-Scale Reservoir Operating Rules with Sensitivity Analysis.” *Journal of Hydrology* 544: 613-627.
- Zhang, L.; Wang, Z.; Chai, J.; Fu, Y.; Wei, C.; Wang, Y. 2019. “Temporal and Spatial Changes of Non-Point Source N and p and Its Decoupling from Agricultural Development in Water Source Area of Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project.” *Sustainability (Switzerland)* 11(3):895-918.
- Zhang, W.; Wang, Y.; Peng, H.; Li, Y.; Tang, J.; Wu, B. K. 2010. “A coupled water quantity-quality model for water allocation analysis”. *Water Resources Management* 24: 485-511.
- Zhao, J.; Cai, X.; Wang, Z. 2011. “Optimality conditions for a two-stage reservoir operation problem”. *Water Resources Research* 47.
- Zohary, T.; Ostrovsky, I. 2011. "Ecological impacts of excessive water level fluctuations in stratified freshwater lakes." *Inl Waters* 1:47-59.

