



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

ANDRESSA ADNA CAVALCANTE MORAIS

**DEFINIÇÃO DE REGRA DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS COM
USO DE PREVISÕES CLIMÁTICAS SAZONAIS**

**Natal/RN
2020**

ANDRESSA ADNA CAVALCANTE MORAIS

**DEFINIÇÃO DE REGRA DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS COM
USO DE PREVISÕES CLIMÁTICAS SAZONAIS**

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.

Orientadora: Profa. Dra. Adelena Gonçalves Maia.

**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

Morais, Andressa Adna Cavalcante.

Definição de regra de operação de reservatórios com uso de previsões climáticas sazonais / Andressa Adna Cavalcante Moraes. - 2020.

48f.: il.

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

Orientadora: Dra. Adelena Gonçalves Maia.

1. Otimização - Dissertação. 2. Regras de operação - Dissertação. 3. Previsões de precipitação - Dissertação. 4. Escassez hídrica - Dissertação. 5. Regras de racionamento - Dissertação. I. Maia, Adelena Gonçalves. II. Título.

RN/UF/BCZM

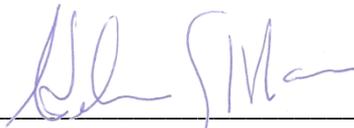
CDU 628

ANDRESSA ADNA CAVALCANTE MORAIS

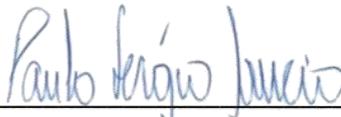
**DEFINIÇÃO DE REGRA DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS COM
USO DE PREVISÕES CLIMÁTICAS SAZONAIS**

Dissertação apresentado 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.

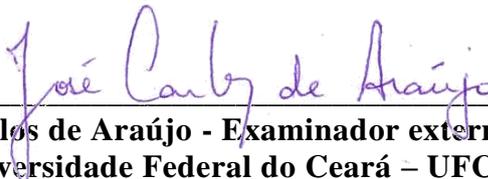
BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Adelena Gonçalves Maia – Orientadora
(Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN)



Prof. Dr. Paulo Sergio Lucio – Examinador externo ao programa
(Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN)



Prof. Dr. José Carlos de Araújo - Examinador externo à instituição
(Universidade Federal do Ceará – UFC)

Natal, 31 de julho de 2020.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, pela proteção e força em todos os momentos, sempre abençoando o meu caminho e as minhas escolhas.

À minha família, que me dá amor e incentivo nas minhas decisões; à minha mãe, especialmente, pela orientação na vida, pelos ensinamentos compartilhados e a compreensão nos momentos difíceis; e ao meu namorado, por seu apoio incondicional para o alcance desta conquista.

À minha orientadora, Adelena Gonçalves Maia, que acreditou em mim e norteou a nossa pesquisa; e aos demais professores que contribuíram para minha formação.

Aos professores José Carlos de Araújo e Paulo Sergio Lucio, membros da banca examinadora, por aceitarem o convite, se disponibilizando para contribuir com este trabalho.

À professora Vanessa Becker e ao secretário do PPGESA, Pedro Gustavo, pelo apoio e ajuda nos momentos de impasse.

Ao professor Paulo Eduardo Vieira Cunha, por me orientar no estágio à docência, uma experiência necessária e extremamente enriquecedora.

Aos meus colegas de trabalho da Câmara Municipal de Mossoró, pela compreensão, suporte e flexibilidade nos períodos que precisei me ausentar de minhas funções.

E às minhas amigas que me receberam e acolheram na cidade de Natal, pela união e parceria no período que convivemos.

RESUMO

As regiões semiáridas são caracterizadas por alta variabilidade temporal e espacial da precipitação, resultando em alta incerteza na sua estimativa. Este fato provoca um impacto dramático nas decisões adotadas para alocar recursos hídricos a centros de demanda, dificultando a gestão dos recursos hídricos. Em termos climáticos, a região Nordeste do Brasil é vulnerável aos extremos observados de variabilidade climática interanual, principalmente as secas, e cenários de mudanças climáticas indicam que a região será afetada pelo déficit de chuvas e aumento da aridez na segunda metade do século 21. A integração da previsão meteorológica no gerenciamento de um sistema hídrico pode melhorar substancialmente a segurança da operação. Diante disso, esta pesquisa verificou a adequabilidade do uso das previsões de precipitação na definição de uma regra de operação do reservatório Cruzeta, inserido no semiárido brasileiro. Cenários foram desenvolvidos por meio de algoritmo genético (AG) para otimizar as variáveis envolvidas na operação de racionamento com previsão (RP). Esta operação teve seus indicadores de desempenho comparados a outras quatro regras de operação: Política de operação padrão (standard operating policy - SOP), atual regra de racionamento do reservatório Cruzeta (A), racionamento sem previsões (R) e racionamento com previsão perfeita (RPP). Os resultados mostraram que os três cenários com racionamento otimizados em AG (R, RP e RPP) apresentaram resultados intermediários entre o consumismo de SOP e o conservadorismo de A. Seus resultados apresentam propostas de operações de reservatórios razoáveis, que aproveitam ao máximo a disponibilidade hídrica, sem deixar que o reservatório colapse. RP apresentou melhorias no atendimento às demandas com relação à regra R, inclusive nos períodos de falha, aproveitando com mais eficiência o volume de armazenamento. Ainda, quando se compara RP a RPP, percebe-se que a ideia central deste trabalho obteve resultados muito próximos da condição idealizada.

Palavras-chave: Otimização; regras de operação; previsões de precipitação; escassez hídrica; regras de racionamento.

ABSTRACT

Title: Definition of reservoir operation rule using seasonal weather forecasts

Semi-arid regions are characterized by high temporal and spatial variability of precipitation, resulting in high uncertainty in their estimation. This fact has a dramatic impact on the decisions taken to allocate water resources to demand centers, making it difficult to manage water resources. In climatic terms, the Brazilian Northeast is vulnerable to the observed extremes of interannual climate variability, mainly droughts, and climate change scenarios indicate that the region will be affected by rainfall deficit and increased aridity in the second half of 21st century. The integration of weather forecasting in the management of a hydrological system can substantially improve the safety of the operation. Therefore, this research verified the adequacy of the use of precipitation forecasts in the definition of an operating rule for the Cruzeta reservoir, inserted in the Brazilian semiarid region. Scenarios were developed using a genetic algorithm (GA) to optimize the variables involved in the hedging operation with forecast (FH). This operation had its performance indicators compared to other four operation rules: Standard operating policy (SOP), current hedging rule for the Cruzeta reservoir (C), hedging without predictions (R) and hedging with perfect forecast (PFR). The results showed that the three hedging scenarios optimized in GA (R, FR and PFR) presented intermediate results between the consumption of SOP and the conservatism of C. Their results present proposals for reasonable reservoir operations, which make the most of water availability, without letting the reservoir collapse. FR showed improvements in meeting the demands regarding the R rule, including in periods of failure, making more efficient use of storage volume. Still, when comparing FR to PFR, it is clear that the central idea of this work obtained results very close to the idealized condition.

Keywords: Optimization; operating rules; precipitation forecasts; water scarcity, hedging rules.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. ÁREA DE ESTUDO	13
2.1 Caracterização do reservatório	13
2.2 Previsões de precipitação	16
3. MÉTODOS	17
3.1 Algoritmo genético.....	17
3.2 Simulação do balanço hídrico	20
3.3 Cenários propostos	21
3.3.1 Cenários de definição	22
3.3.1.1 SOP1.....	23
3.3.1.2 Definição 1 - D1	24
3.3.1.3 Definição 2 - D2.....	25
3.3.2 Cenários de aplicação	27
3.3.2.1 SOP2.....	28
3.3.2.2 Regra de operação atual - A	28
3.3.2.3 Racionamento – R	29
3.3.2.4 Racionamento com previsão - RP	29
3.3.2.5 Racionamento com previsão perfeita - RPP.....	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
4.1 Cenários de definição	30
4.2 Cenários de aplicação.....	33
4.2.1 Atendimento as demandas	33
4.2.2 Variações de volumes	36
4.3 Análise dos dados das séries históricas e de previsão	39
4.3.1 Precipitação e vazão afluyente	39
4.3.2 Previsão e precipitação	40
4.4 Comparação entre os cenários.....	41
5. CONCLUSÕES.....	42
6. REFERÊNCIAS.....	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização do reservatório Cruzeta.....	13
Figura 2. Médias mensais de precipitação, evaporação e vazão afluente no reservatório.	14
Figura 3. Histórico de armazenamento do reservatório Cruzeta.	15
Figura 4. Previsão climática sazonal para junho-julho-agosto de 2020.	16
Figura 5. Arquitetura do AG de simulação-otimização.	19
Figura 6. Esquema simplificado de fluxo de água num reservatório.	20
Figura 7. Regra de operação padrão (SOP).	23
Figura 8. Ilustração esquemática da regra de operação com racionamento de dois estágios. .	24
Figura 9. Ilustração esquemática da regra de operação do cenário D2.	26
Figura 10. Fluxograma da simulação realizada no cenário D2.	27
Figura 11. Regra operativa do reservatório Cruzeta.....	29
Figura 12. Evolução volumétrica dos cenários de definição.	33
Figura 13. Atendimento médio mensal dos cenários de aplicação.....	36
Figura 14. Evolução volumétrica dos cenários de aplicação.....	37
Figura 15. Razão de volume perdido nos cenários de aplicação.....	37
Figura 16. Nível de armazenamento médio mensal dos cenários de aplicação.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Demandas (vazões de retirada) do açude Cruzeta.	13
Tabela 2. Precipitação acumulada no período (mm) – Estação CRUZETA.	17
Tabela 3. Limites da faixa normal de vazão afluente trimestral (m ³ /s) – CRUZETA.....	31
Tabela 4. Indicadores de desempenho dos cenários de definição.	32
Tabela 5. Indicadores de desempenho dos cenários de aplicação.	34
Tabela 6. Atendimento a demanda dos cenários de aplicação.....	35

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Síntese dos cenários de definição.....	22
Quadro 2. Síntese dos cenários de aplicação.	22
Quadro 3. Classificações incompatíveis entre precipitação e vazão afluente.	39
Quadro 4. Classificações incompatíveis entre previsão e precipitação.....	41

1. INTRODUÇÃO

À medida que a população mundial cresce, mais água será necessária para satisfazer as necessidades da população. Essa água pode ter um alto preço financeiro e ecológico (RAGAB; PRUDHOMME, 2002). Os problemas na gestão de recursos hídricos permanecem desafiadores hoje e ainda o serão no futuro. Além disso, esses problemas podem se tornar mais complicados com o desenvolvimento de setores, como a irrigação e a indústria. Os efeitos das mudanças climáticas podem adicionar complexidade a esses problemas (ALLAWI et al., 2019) e podem ser agravados pelas tendências de crescimento populacional, poluição, aumento da demanda por alimentos e água e as flutuações do mercado (GOI, 2016).

A ocorrência de secas periódicas de grande intensidade no Nordeste, com impactos relevantes sobre sua população e os meios de vida, vem sendo registrada desde o século 16 e debatida desde o século 19 (GONDIM et al., 2017). A seca é uma conexão de várias esferas, incluindo a atmosfera, a hidrosfera, a biosfera e a antroposfera. Os efeitos das secas são extensos e podem envolver vários aspectos, como recursos hídricos, agricultura, pecuária, ecossistema ambiental, saúde pública e assim por diante. (GUO et al., 2018). Como um risco natural complexo, a seca é mais bem caracterizada por múltiplos parâmetros climatológicos e hidrológicos (MISHRA; SINGH, 2010).

A seca especialmente severa que aconteceu no semiárido nordestino entre 2012 e 2018, proporcionando uma janela de oportunidade para intensificar o debate sobre o atendimento das demandas, pois as diferentes partes interessadas (usuários de água, administração pública, sociedade civil e comunidades tradicionais) passaram por um processo substancial de aprendizado sobre a disponibilidade e confiabilidade recursos hídricos (KOCH et al., 2018). Por causa das perdas nas economias agrícola, pecuária, abastecimento de água e local devido à seca, o governo federal autorizou a liberação de recursos para os distritos afetados para mitigar esses impactos negativos (MARENGO et al., 2018).

A região do Semiárido Brasileiro ocupa uma área de 981 mil km², constituída de 1.135 municípios, e abriga quase 24 milhões de habitantes, ou seja, quase 12% da população do País. Cabe destacar que cerca de 10 milhões pertencem à zona rural (ANA, 2020). Embora a seca seja um fenômeno recorrente no nordeste brasileiro, percebe-se que o risco e a vulnerabilidade ainda são elevados, principalmente nas áreas rurais semiáridas. Há uma necessidade de ações nas quais as comunidades científicas e de tomadores de decisão possam trabalhar juntas em questões de seca, com foco na redução da vulnerabilidade e construção de resiliência (MARENGO et al., 2018).

Uma prática corrente para garantir a oferta de água na região é a construção de reservatórios ou açudes (como são denominados no Nordeste do Brasil), que possuem relevante papel na gestão de recursos hídricos em função da capacidade de estocar e atender aos diversos usos da água (MARENGO et al., 2018). As secas de 1825, 1827 e 1830 marcaram o início da açudagem no Nordeste semiárido como fonte de água para abastecimento humano e animal durante tais períodos (REBOUÇAS, 1997). Os reservatórios permitem um armazenamento temporal dos volumes de água, ou seja, acúmulo em tempos de abundância e liberação em períodos de seca ou alta demanda de água (KOCH et al., 2018). Os sistemas de barragens e reservatórios são os principais componentes no campo de recursos hídricos e o desenvolvimento de um modelo de otimização para operações de reservatórios é crucial (ALLAWI et al., 2019).

As regras de operação de reservatórios são relações para regular a liberação de água para atender a vários propósitos (BOLOURI-YAZDELI et al., 2014). Uma política operacional padrão (standard operating policy - SOP) é a mais simples e mais usada política de operação de reservatórios que libera, se possível, apenas a demanda requerida em cada período, e não preserva a água para necessidades futuras (RITTIMA, 2009). No entanto, a SOP nem sempre é a política ideal para a operação do reservatório, pois, por padrão, ele produz uma grande escassez nos períodos secos (CHIAMSATHIT; ADELOYE; SOUDHARAJAN, 2014).

Para que o racionamento seja útil, a economia de água deve ser feita durante os períodos de operação normal do reservatório, não quando a água já está em falta (CHIAMSATHIT; ADELOYE; SOUDHARAJAN, 2014). As curvas de regra do reservatório e as regras de racionamento fornecem diretrizes operacionais que podem ser seguidas para minimizar os impactos de uma seca quando os reservatórios estão baixando devido a entradas insuficientes (TU; HSU; YEH, 2003). Ainda podem oferecer estratégias de adaptação e mitigação eficazes e de baixo custo para as mudanças climáticas (ADELOYE; DAU, 2019).

As regiões semiáridas são caracterizadas por alta variabilidade temporal e espacial da precipitação, resultando em alta incerteza na sua estimativa (TRAMBAUER et al., 2013). De acordo com Marengo et al. (2018, apud Marengo e Bernasconi 2015, IPCC 2012, 2014, CGEE 2016), em termos climáticos, a região é vulnerável aos extremos observados de variabilidade climática interanual, principalmente as secas, e cenários de mudanças climáticas indicam que a região será afetada pelo déficit de chuvas e aumento da aridez na segunda metade do século 21. O alto nível de incerteza quanto aos influxos hidrológicos tem um impacto relevante nas decisões adotadas para alocar recursos hídricos a centros de demanda, dificultando o planejamento da gestão a longo prazo (PALLOTTINO; SECHI; ZUDDAS, 2005).

A integração da incerteza de previsão meteorológica em um modelo de gerenciamento de sistema hidrológico pode melhorar substancialmente a segurança da operação, especialmente quando as condições da água do sistema estão próximas de seus limites (KRAU et al., 2006). Isso permite uma melhor previsão e avaliação probabilística na tomada de decisões sobre recursos hídricos. No entanto, contar adequadamente com essa incerteza continua sendo um grande desafio (BLOCK et al., 2009). Modelos de previsão não necessariamente melhoram o gerenciamento do reservatório. Para que melhorias ocorram, o processo de gerenciamento (ou modelo) também deve usar informações de previsão de forma eficaz (YAO; GEORGAKAKOS, 2001).

Fan et al. (2016) e Peng et al. (2019) utilizaram previsões de precipitação para gerar previsões de vazões de entrada, pelo modelo chuva-vazão, de reservatórios geradores de energia elétrica no Brasil e na China, respectivamente. Ficchi et al. (2016) simularam o gerenciamento de um sistema de reservatórios na França para controle de inundações baseando seu funcionamento em curvas de regra, previsões determinísticas e previsões de conjunto. Seus resultados foram comparados com o funcionamento baseado em previsões perfeitas, que apresentam o desempenho no caso ideal em que as previsões meteorológicas não são afetadas por nenhum tipo de incerteza. O autor verificou que a operação com previsões de conjunto forneceu resultados quase tão bons quanto a operação com previsões perfeitas. Outro estudo de caso em um reservatório para abastecimento de água no Japão, feito por Nohara e Hori (2018), mostrou que os métodos de operação do reservatório, considerando as previsões hidrológicas do conjunto, geralmente mitigam os danos causados pela seca em comparação com os regimes de fluxo histórico sem levar em consideração as previsões.

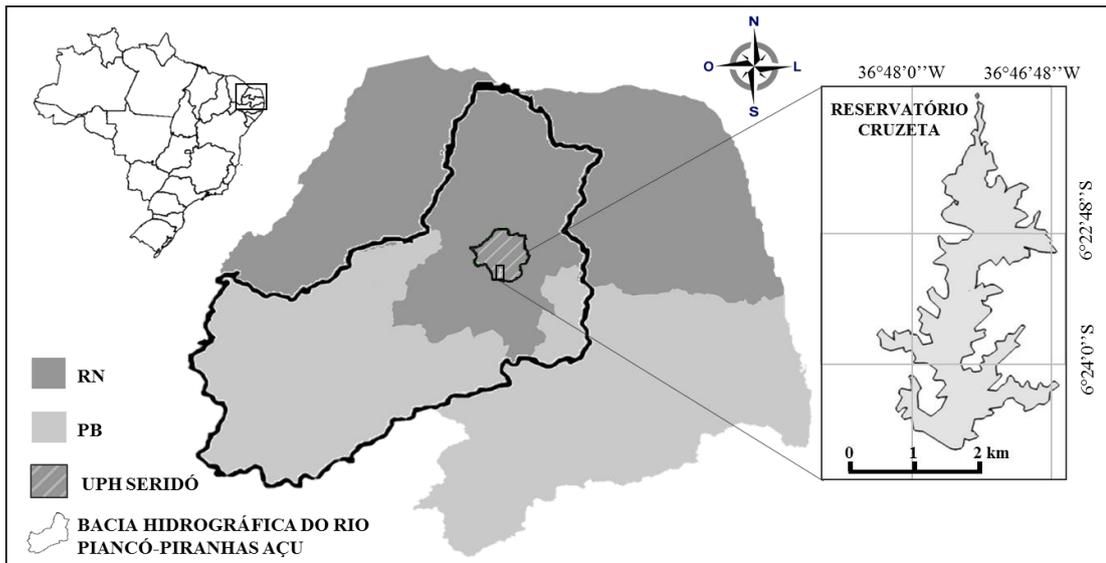
No Brasil, estão disponíveis as previsões climáticas de um modelo estatístico de previsão (LUCIO et al., 2010) que subsidiam o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) na geração de um Prognóstico Climático Sazonal para o trimestre seguinte. A previsão do modelo estatístico do INMET tem o mérito de apresentar bom desempenho, mesmo em regiões, como o Centro-Oeste e o Sudeste do Brasil, onde os modelos numéricos atualmente disponíveis apresentam baixos índices de destreza (INMET, 2019a).

Nesse contexto, este trabalho teve o objetivo de verificar a adequabilidade do uso das previsões de precipitação na definição de regra de operação de reservatórios. Foram comparadas as seguintes regras de operação: Política de Operação Padrão - SOP, regra de racionamento atual do reservatório, regras de racionamento otimizadas com e sem integração de previsões de precipitação e com integração de previsões perfeitas de precipitação.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (Figura 1) compreende o reservatório Cruzeta (Latitude 06° 24' 37,18"S Longitude 36° 47' 49,70"W), que está inserido no semiárido do Rio Grande do Norte, na bacia hidrográfica Piancó-Piranhas Açú, Unidade de Planejamento Hídrico (UPH) Seridó.

Figura 1. Localização do reservatório Cruzeta.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

2.1 Caracterização do reservatório

O nome do açude, construído em 1929, deve-se ao cruzamento dos rios Salgado, Quimporó e Riacho do Meio, afluentes do Rio Seridó, que hoje formam a bacia hidráulica do açude público municipal com bacia hidráulica de 616,11 ha. O reservatório é capaz de armazenar até 23,55 hm³ e seu volume morto é atingido no volume de 1,18 hm³, de acordo com o levantamento batimétrico realizado em 2010. Localizado no município de Cruzeta/RN, este reservatório consegue atender a uma vazão de 0,25 m³/s com 90% de garantia (ANA; MMA, 2016a) e atende demandas de irrigação, abastecimento humano, dessedentação animal (pecuária) e abastecimento industrial, apresentadas na Tabela 1.

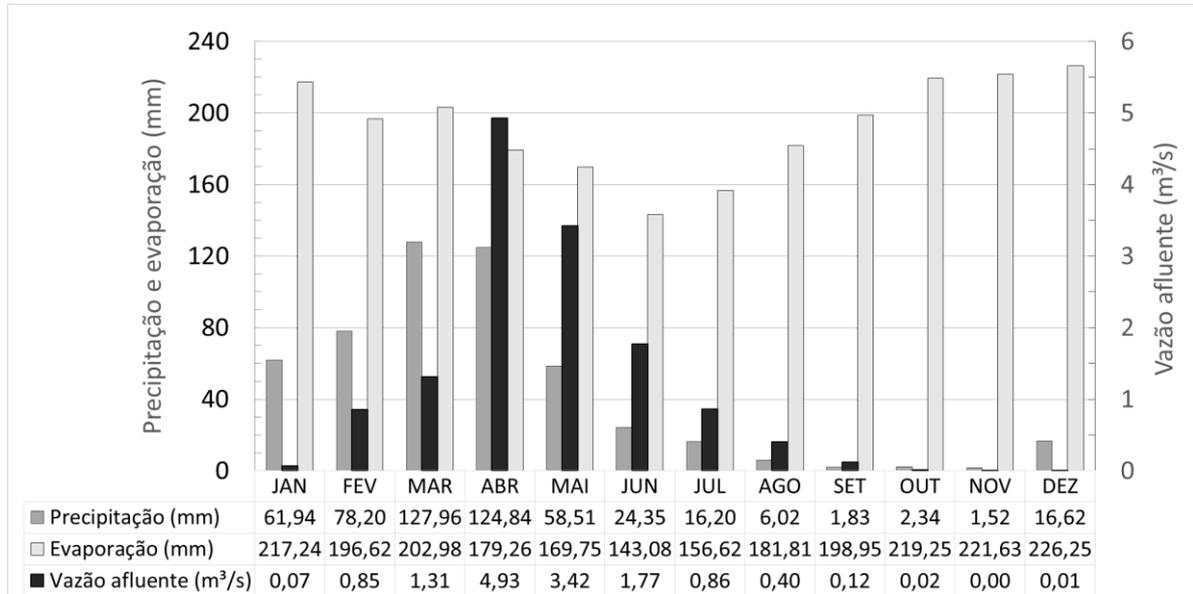
Tabela 1. Demandas (vazões de retirada) do açude Cruzeta.

Demandas prioritárias (m ³ /s)		Demandas não prioritárias (m ³ /s)		Demanda total (m ³ /s)
Abastecimento Humano	Pecuária	Irrigação	Industrial	
0,028	0,026	0,874	0,010	0,938

Fonte: ANA; MMA (2016a).

A Figura 2 apresenta as médias mensais de precipitação (dados fornecidos pela Empresa de Pesquisa Agropecuária do RN - EMPARN), evaporação e vazão afluente (ANA; MMA, 2016b) no reservatório.

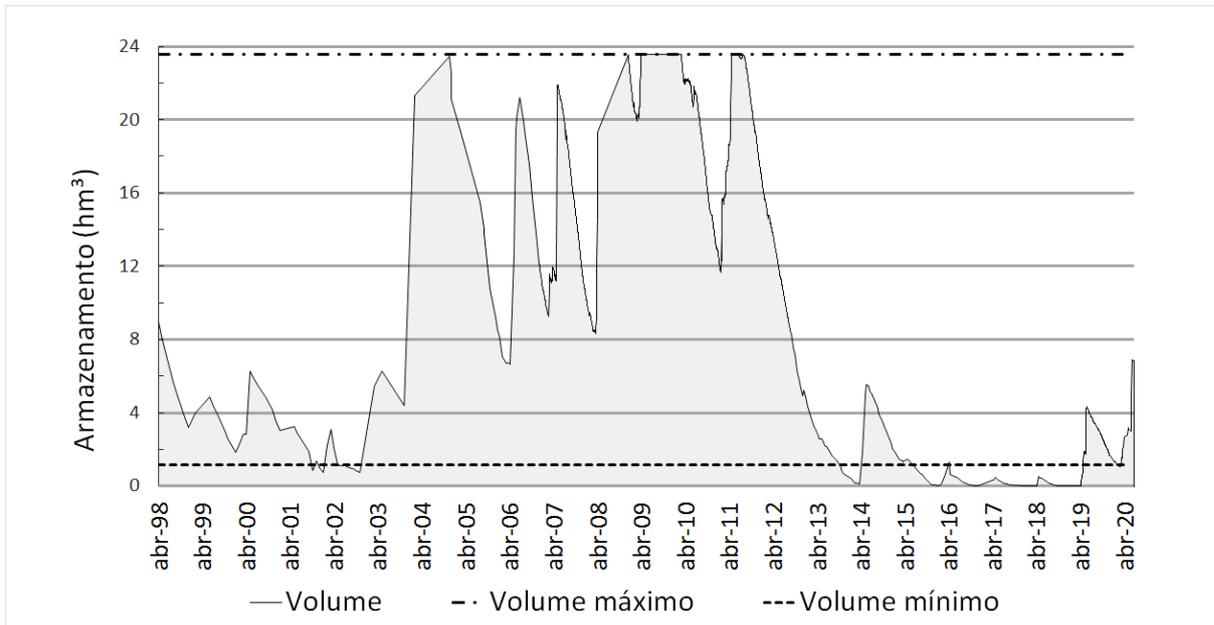
Figura 2. Médias mensais de precipitação, evaporação e vazão afluente no reservatório.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

As precipitações na bacia são concentradas de fevereiro a maio e caracterizam-se pela alta variabilidade interanual. A UPH Seridó apresenta valores médios mais baixos. No açude Cruzeta, chove em média 513mm/ano com máxima nos meses de março e abril. Ocorrem, também, altas taxas de evaporação, que acarretam perdas significativas das reservas de água, contribuindo assim para o déficit hídrico na bacia. A evaporação média Piché da bacia é de 2.338 mm/ano e as maiores taxas são observadas, de modo geral, no período de agosto a janeiro (ANA; MMA, 2016b). Quanto à vazão afluente média mensal do reservatório Cruzeta, percebe-se que a maior entrada de água acontece de março a junho, com máximas em abril e maio.

A UPH Seridó apresenta déficit em praticamente todos os seus reservatórios, de forma a se caracterizar como a mais crítica da bacia e, conseqüentemente, para a qual as ações estruturantes propostas deverão ser prioritariamente direcionadas (ANA; MMA, 2016a). Os dados de volume de armazenamento do reservatório Cruzeta (SEMARH, 2020) se apresentam na Figura 3.

Figura 3. Histórico de armazenamento do reservatório Cruzeta.

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Percebe-se que no período mais recente, de 2013 até 2018, o reservatório Cruzeta esteve vulnerável ao sofrer com período de estiagem prolongada. Em novembro de 2015, a cidade de Cruzeta, que tem pouco mais de 8 mil habitantes, estava sendo abastecida pelo açude local, que secou. A CAERN (Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte) vinha atendendo em esquema de rodízio, mas o baixo nível do manancial inviabilizou o abastecimento (G1RN, 2015), que então passou a acontecer por carros-pipa. Mesmo abaixo do volume morto, entre 2016 e 2018, houve uso do reservatório para abastecimento (AESBE, 2017; AGORARN, 2016; G1RN, 2018), até que o sistema reestabeleceu seu nível mínimo operacional a partir de abril de 2019 (AGORARN, 2019).

As informações obtidas evidenciam a dificuldade de atendimento das demandas impostas, assim como, a necessidade de contornar o grande déficit hídrico do período. O reservatório Cruzeta está localizado na cabeceira do sistema e não existem outros açudes importantes localizados a montante que poderiam contribuir para aumentar sua situação de conforto hídrico, através de transferências de água para jusante (ANA, 2017a).

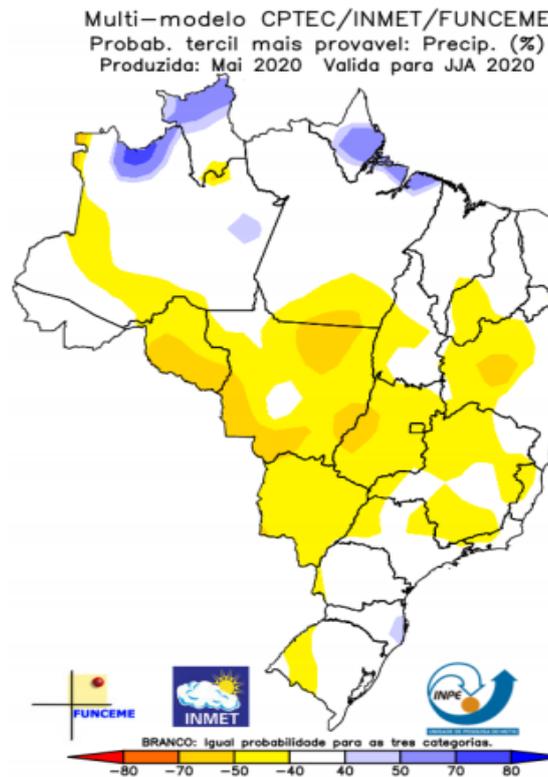
A seca prolongada em que o Semiárido se encontra desde o ano de 2012 ensejou mais uma série de iniciativas da ANA para enfrentamento dessa situação. Entre as iniciativas de planejamento, identificou-se a necessidade de aprofundar o conhecimento sobre a oferta, as demandas e as condições de operação dos reservatórios, e com isso estabelecer um melhor conhecimento sobre o atual balanço hídrico da região e o aprimoramento necessário na operação dos açudes (ANA, 2017b).

Para o reservatório estão disponíveis regras operativas, baseadas nas Curvas de Aversão ao Risco - CARs, visando ao atendimento da maior quantidade de demandas possível. Desta forma, tais regras indicarão a necessidade de operação dos reservatórios/sistemas com restrições ao atendimento das demandas, fornecendo subsídios ao órgão gestor para uma maior eficiência e racionalidade nos processos de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos no Semiárido (ANA, 2017b). A regra de racionamento definida para o reservatório Cruzeta está descrita no item 3.3.2.2 Regra de operação atual – A.

2.2 Previsões de precipitação

O INMET produz, mensalmente, previsões sazonais de precipitação total para todo o Brasil (Figura 4). Desde fevereiro de 2004, os prognósticos climáticos sazonais usualmente expressam as previsões de precipitação, geradas pelo conjunto Multi Modelo Nacional (CPTEC/INPE, INMET e FUNCEME), pelas probabilidades de que a chuva acumulada dos próximos três meses, em uma determinada região, se situe "abaixo da faixa normal", "na faixa normal", ou "acima da faixa normal". Mas, a partir de junho de 2011, os prognósticos passaram a contar também com uma classificação de igual probabilidade para as três categorias.

Figura 4. Previsão climática sazonal para junho-julho-agosto de 2020.



Fonte: (INMET, 2020).

Entende-se por faixa normal o tercil médio da distribuição climatológica da chuva acumulada no trimestre em foco, em uma dada localidade. A climatologia da faixa normal, que é referência para os prognósticos climáticos, da estação Cruzeta, código 82693, se encontra na Tabela 2. O período de referência para a climatologia é de 1981-2010, e as séries históricas foram reconstituídas por procedimentos de interpolação.

Tabela 2. Precipitação acumulada no período (mm) – Estação CRUZETA.

TRIMESTR E	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN
	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV
Limite inferior	233,2	281,7	239,8	145,4	67,3	33,3	10,8	2,8	2,4	8,9	60,4	123,9
Média	310,8	371,6	340,0	233,9	114,6	59,2	29,1	16,1	13,5	34,7	106,8	195,0
Limite superior	353,7	422,1	389,9	269,6	132,0	68,1	31,9	15,1	12,8	35,6	122,8	224,8

Fonte: INMET (2019b).

Para que se possa expressar a informação do prognóstico em termos físicos (mm de chuva), é necessário que se conheçam os valores do limite inferior e do limite superior da faixa normal (percentis 33 e 67) para o trimestre em questão. Se a previsão da precipitação acumulada do trimestre estiver abaixo dos valores estipulados no limite inferior, diz-se que será abaixo da faixa normal; se apresentar valores desde o limite inferior até o limite superior, então se trata da faixa normal daquele trimestre; e se estiver acima dos valores estipulados no limite superior, diz-se que será acima da faixa normal. A Tabela 2 também apresenta a média de precipitação acumulada trimestral, que não é referência para classificação dos períodos, mas permite observar que o trimestre fev/mar/abr é, historicamente, o mais chuvoso com 371,6 mm, enquanto que set/out/nov é o mais seco, com 13,5mm.

3. MÉTODOS

Cenários de operação do reservatório foram desenvolvidos e aplicados, através de simulação-otimização por algoritmo genético, para simulação do balanço hídrico mensal, de maneira que fosse maximizada a eficiência do atendimento das demandas hídricas, durante o período de simulação.

3.1 Algoritmo genético

Algoritmo genético (AG) é um algoritmo de otimização de busca aleatória inspirado na evolução biológica que fornece um método robusto para procurar a solução ideal para

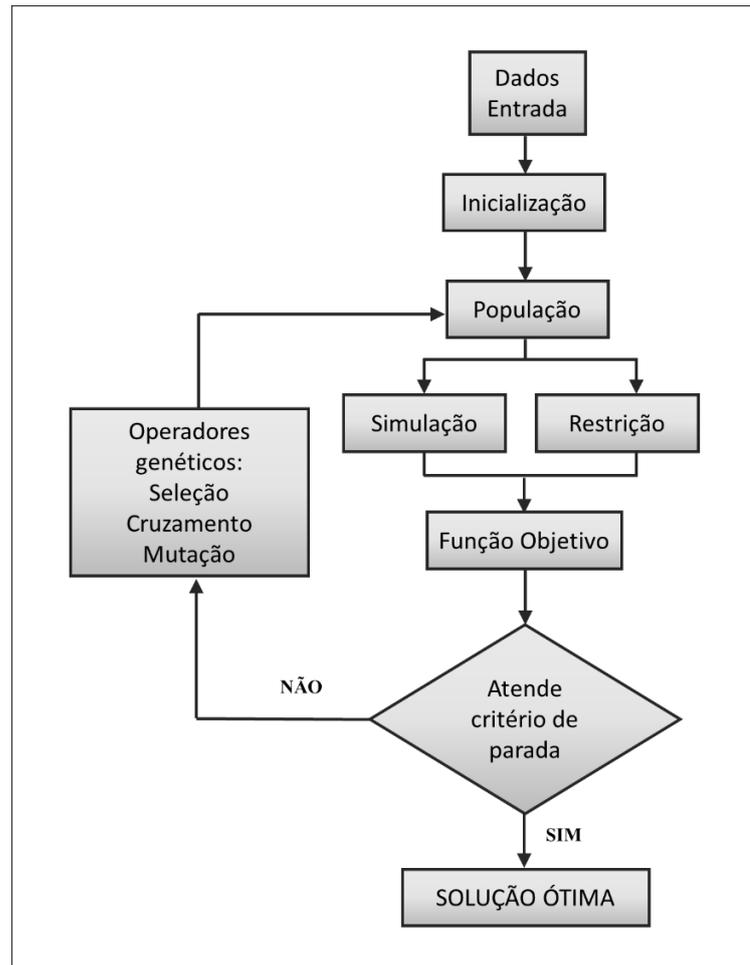
problemas complexos (MICHALEWICZ, 1992). Técnicas de computação evolutiva têm grande potencial para otimizar sistemas complexos (CHANG et al., 2010).

Os AG propõem uma metodologia de otimização dominante e foram estabelecidos popularmente no planejamento e gerenciamento de operações de reservatórios (ANAND; GOSAIN; KHOSA, 2018). Eles têm sido amplamente aplicados em estudos de operação de reservatórios para o desenvolvimento de curvas de regras ideais, políticas operacionais e de racionamento (ADELOYE; DAU, 2019). A capacidade de o AG ser combinado com um modelo de simulação foi vista como uma vantagem real para facilitar sua implementação entre os tomadores de decisão (WAF AE et al., 2016).

Olukanni et al. (2018) fizeram uso de AG para melhorar a eficiência em produção de energia elétrica de um reservatório na Nigéria. Outro reservatório no Iraque com o mesmo propósito foi estudo de caso de Al-Aqeeli, Lee e Abd Aziz (2016), que formularam um AG, baseado na simulação tradicional da operação do reservatório, e fizeram dois aprimoramentos, alterando os valores populacionais do AG, depois adicionaram a evaporação e a precipitação à equação do balanço hídrico. Anand, Gosain e Khosa (2018) aplicaram curvas de regra otimizadas por AG em dois reservatórios na Índia, buscando o equilíbrio entre objetivos conflitantes: minimizar o déficit no abastecimento de água e maximizar a geração de energia elétrica. Chen et al. (2016) e Chiamsathit, Adeloye e Soundharajan (2015) aprimoraram versões de diferentes programas de AG na China e Tailândia, respectivamente, para gerenciar o funcionamento de reservatórios com usos múltiplos, para atender em termos de quantidade e qualidade a diferentes demandas, como: abastecimento humano, irrigação, manutenção de fluxo para navegação, além de necessidades ecoambientais.

Nos cenários de definição do reservatório Cruzeta, as variáveis de decisão foram obtidas por um modelo de simulação-otimização, em AG (Figura 5).

Figura 5. Arquitetura do AG de simulação-otimização.



Fonte: Modificado de Chang et al. (2010).

Este processo foi utilizado por Chang et al. (2010) para obter uma estratégia ótima de operações de reservatório para auxiliar o processo de tomada de decisão. Para iniciar a otimização do AG, as soluções iniciais (ou cadeias) são geradas aleatoriamente. Três operações fundamentais estão envolvidas na manipulação das cadeias e na mudança para uma nova geração: seleção, cruzamento e mutação. A operação de seleção ajuda a identificar os melhores indivíduos, incluídas no processo de reprodução, para desenvolver a próxima geração de cadeias, por cruzamento ou mutação. O AG é normalmente repetido em várias soluções iniciais geradas aleatoriamente e a média das melhores soluções ou a melhor solução é tomada como solução final (ADELOYE; DAU, 2019).

De acordo com Chang et al. (2010), uma função de penalidade pode ser uma abordagem para lidar com restrições no algoritmo genético. O custo da penalidade é uma função projetada para penalizar soluções inviáveis.

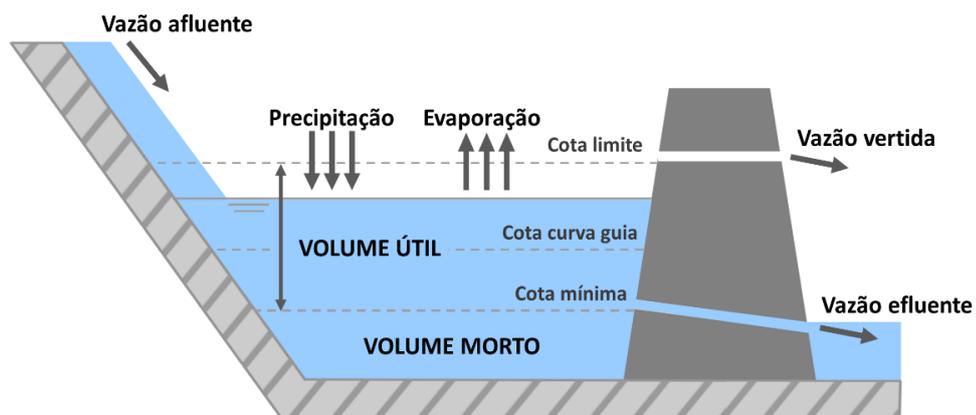
A otimização no nosso trabalho foi desenvolvida em linguagem R (R CORE TEAM, 2018) com uso do pacote “GA”, desenvolvido por Scrucca (2013). Os usuários podem facilmente definir sua própria função objetivo, dependendo do problema em questão. Vários operadores genéticos estão disponíveis e podem ser combinados para explorar as melhores configurações para a tarefa atual (SCRUCCA, 2013).

A inicialização do programa foi feita pela geração de uma população de possíveis variáveis de decisão. Foi assumido um tamanho populacional de 200 indivíduos para cada geração. Essas 200 respostas em potencial para a variável de decisão foram aplicadas ao processo de simulação do balanço hídrico, considerando as restrições de cada cenário (convertidas em penalidades), para otimizar a função de aptidão calculada (função fitness). Com a adequação de cada indivíduo, o processo de seleção, cruzamento e mutação foi aplicado para reproduzir indivíduos da próxima geração, com taxa de mutação de 0,05. O critério de parada adotado foi o máximo de 300 gerações/iterações.

3.2 Simulação do balanço hídrico

O reservatório é um sistema com hidrodinâmica própria, composta por entradas de vazão natural afluente e precipitação direta, assim como saídas por evaporação, vertimento e tomada de água (Figura 6). Portanto, o comportamento do volume de água no reservatório foi analisado utilizando modelagem balanço hídrico mensal do reservatório, associado às regras de operação determinadas dos diversos cenários.

Figura 6. Esquema simplificado de fluxo de água num reservatório.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

A formulação do balanço hídrico é expressa pela equação 1:

$$S_{tf} = S_t + Q_t + (P_t - E_t) \cdot A_{medt} - D'_t - Sp_t \quad (1)$$

Na qual S_{tf} é o volume armazenado no final do intervalo “ Δt ” (m^3); S_t é o volume armazenado no início do intervalo “ Δt ” (m^3); Q_t é o volume afluente natural de entrada no intervalo “ Δt ” (m^3), obtido pela série histórica; P_t é a precipitação média no intervalo “ Δt ” (m/mês); E_t é a evaporação média no intervalo “ Δt ” (m/mês); A_{medt} é a área média do reservatório no intervalo “ Δt ” (m^2); D'_t é o volume de água fornecido no intervalo “ Δt ” a uma demanda de referência D_t (m^3); e Sp_t é o volume de vertido do reservatório no intervalo “ Δt ” (m^3).

As limitações físicas e operacionais definem limites inferiores e superiores para liberação, armazenamento e volume vertido:

$$0 \leq D'_t \leq D_t \quad (2)$$

$$S_{min} \leq S_t \leq S_{max} \quad (3)$$

$$Sp_t \begin{cases} = 0 & \rightarrow \text{Se } S_{tf} < S_{m\acute{a}x} \\ = S_{tf} - S_{m\acute{a}x} & \rightarrow \text{Se } S_{tf} > S_{m\acute{a}x} \end{cases} \quad (4)$$

Na qual $S_{m\acute{i}n}$ é o volume armazenado na cota mínima, ou volume morto (m^3); e $S_{m\acute{a}x}$ é o volume máximo (m^3).

Para a realização das simulações, foram utilizados dados de características físicas do reservatório, como curva cota-área-volume (CAV), capacidades máxima e mínima de armazenamento (SEMARH, 2020). Também foram utilizados dados referentes ao balanço hídrico, como demandas pelo uso da água (ANA; MMA, 2016a), série histórica de precipitação disponibilizadas pela EMPARN, série de vazão afluente e evaporação média mensal (ANA; MMA, 2016b). Foram utilizadas as previsões de precipitação trimestral apresentadas pelo INMET (2020) nos Prognósticos Climáticos Sazonais.

3.3 Cenários propostos

Foram desenvolvidos dois cenários de definição e cinco cenários de aplicação para avaliar a eficiência da incorporação de previsões de precipitação à operação do reservatório. O Quadro 1 apresenta as variáveis definidas nos cenários de definição. Através destes cenários, buscou-se conhecer o melhor gerenciamento da operação do reservatório Cruzeta, a partir das condições hidrológicas registradas no período de 1964 a 2012, para utilizá-lo nos cenários de aplicação. Os cenários D1 e D2 definiram variáveis, e SOP_1 é um cenário auxiliar, simulado para uma análise preliminar das diferenças no atendimento das demandas dos três cenários apresentados.

Quadro 1. Síntese dos cenários de definição.

Cenários	Variáveis definidas	Período
SOP ₁ *	-	1964-2012 (588 meses)
D1	CR ₁ , CR ₂ , α_1 e α_2 .	
D2	α_{1C} , α_{1N} , α_{1S} , α_{2C} , α_{2N} e α_{2S} .	1964-2012 (585 meses)

*Cenário auxiliar sem racionamento para comparação dos resultados.

Fonte: Autor (2020).

O Quadro 2 apresenta os cinco cenários de aplicação desenvolvidos.

Quadro 2. Síntese dos cenários de aplicação.

Cenários	Regra de operação aplicada	Período
SOP ₂	Regra de operação padrão.	2004-2012 (100 meses)
A	Regra de operação atual do reservatório, indicada na Figura 11.	
R	Regra de racionamento com variáveis definidas em D1.	
RP	Regra de racionamento com previsão da precipitação, níveis de racionamento (CR ₁ e CR ₂) de D1 e coeficientes de D2.	
RPP	Regra de racionamento com previsão perfeita de precipitação, níveis de racionamento (CR ₁ e CR ₂) de D1 e coeficientes de D2.	

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Os cenários de aplicação simularam diferentes regras de operação no reservatório no período de junho de 2004 a setembro de 2012, totalizando 8 anos e 4 meses, ou 100 meses. Estes cenários avaliaram cenários sem racionamento, com racionamento proposto no PRH da bacia, racionamento otimizado em GA com e sem previsões de precipitações incorporadas e com a incorporação de previsões sem erros, para uma condição idealizada.

3.3.1 Cenários de definição

Os cenários de definição buscaram o gerenciamento ótimo do reservatório no maior período disponível, para que fosse possível simular as maiores variações historicamente

registradas e assim, os melhores resultados das variáveis para operações de racionamento fossem obtidos. Para avaliar preliminarmente a eficácia das otimizações, foram utilizados como indicadores de desempenho a confiabilidade volumétrica (Y_{total}) e a eficiência do atendimento a demanda prioritária (Y_{pri}), que avalia a eficiência de atendimento em volume de suprimento com relação a demanda total e a demanda prioritária, respectivamente.

$$Y_{total} = \frac{\sum_{t=1}^T D'_t}{\sum_{t=1}^T D_t} \quad (5)$$

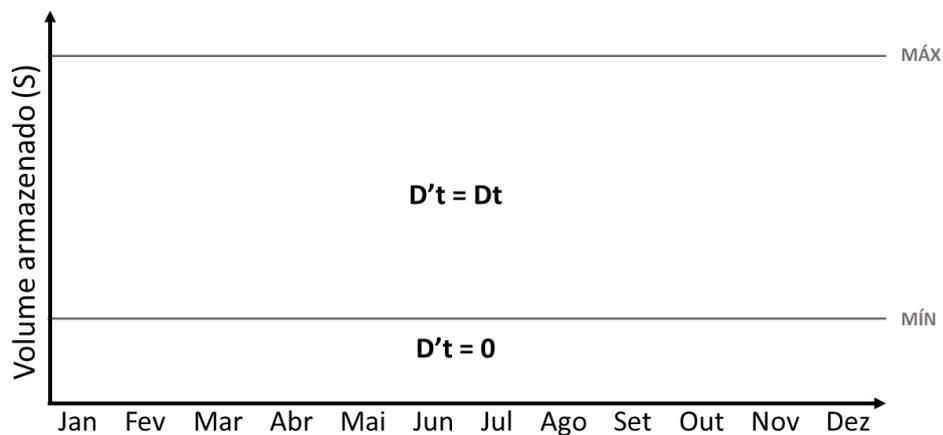
$$Y_{pri} = \frac{\sum_{t=1}^T D'_{pri}}{\sum_{t=1}^T D_{pri}} \quad (6)$$

Onde D'_t é o volume de água fornecido a demanda total a cada mês (m^3); D_t é a demanda total mensal (m^3); D'_{pri} é o volume de água fornecido a demanda prioritária a cada mês (m^3); e D_{pri} é a demanda prioritária mensal (m^3).

3.3.1.1 SOP₁

O cenário SOP₁ (do inglês Standard Operating Policy – SOP) simulou a Regra de Operação Padrão, que é a regra de operação mais simples e não faz nenhum racionamento. Segundo a SOP, a demanda deve ser satisfeita sempre que houver água suficiente, isto é, todo o armazenamento deve ser liberado para satisfazer as demandas o máximo possível (Figura 7).

Figura 7. Regra de operação padrão (SOP).

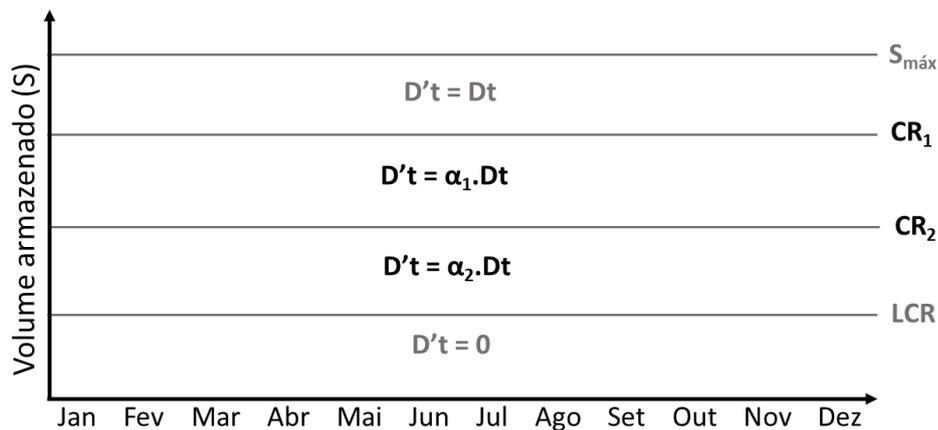


Fonte: Elaborado pela autora (2020).

3.3.1.2 Definição 1 - D1

No cenário D1, foram definidos níveis críticos de armazenamento e coeficientes de liberação de água pelas curvas de regra, que consiste em curvas que delimitam zonas de restrição no atendimento as demandas (Figura 8). A curva inferior (Low Rule Curve-LRC) define o nível de alerta para fins de conservação. O armazenamento máximo ($S_{m\acute{a}x}$) corresponde à máxima capacidade de acumulação do reservatório, a partir da qual inicia-se o vertimento. As curvas críticas CR_1 e CR_2 definem valores de armazenamento, que são gatilhos para o racionamento na proporção associada. Percebe-se que o racionamento é feito em dois estágios e os fatores de racionamento no suprimento as demanda, α_1 e α_2 , atendem à condição $0 \leq \alpha_2 \leq \alpha_1 \leq 1$ (CHIAMSATHIT; ADELOYE; SOUDHARAJAN, 2014).

Figura 8. Ilustração esquemática da regra de operação com racionamento de dois estágios.



Fonte: Modificado de Chiamsathit et al. (2014).

Este cenário teve o propósito de encontrar os volumes de armazenamento, abaixo dos quais seria ideal reduzir o atendimento as demandas. Este passo se fez importante porque reduziu o número de variáveis a serem otimizadas no cenário D2, ainda, seus resultados foram utilizados no cenário de aplicação R. Neste processo, quatro variáveis foram otimizadas: os volumes de gatilho de racionamento (CR_1 anual e CR_2 anual) e os coeficientes de liberação de demanda (α_1 e α_2). O volume morto do reservatório foi definido como volume da curva inferior (LRC). Este cenário esteve sujeito as restrições R1 e R2:

$$R1: LRC \leq CR_2 \leq CR_1 \leq S_{m\acute{a}x}$$

$$R2: 0 \leq \alpha_2 \leq \alpha_1 \leq 1$$

Na simulação-otimização da operação do reservatório realizada pelo AG, foram configuradas as suas finalidades e limitações. A função objetivo buscou maximizar a eficiência do atendimento a demanda prioritária (Y_{pri}), respeitando as restrições (penalties):

$$Y_{pri} (D1) = \frac{\sum_{t=1}^T D'_{pri}}{\sum_{t=1}^T D_{pri}} - \text{Penalty1} - c. \text{Penalty2} \quad (7)$$

$$\text{Penalty1} = \max (\vec{g}, 0) \quad (8)$$

$$\text{Penalty2} = \max ((\alpha_2 - \alpha_1), 0) \quad (9)$$

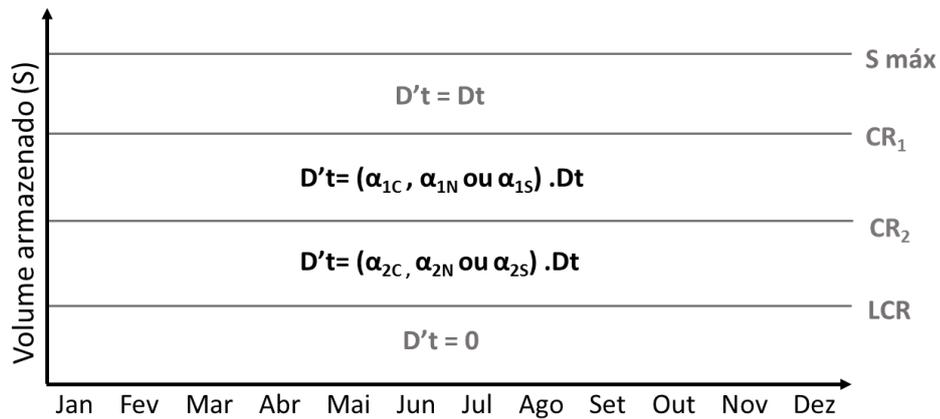
Onde \vec{g} é o vetor da diferença entre CR_2 e CR_1 em cada mês, “c” é uma ponderação aplicada para considerar as diferentes faixas entre os valores alfa e os valores CR.

3.3.1.3 Definição 2 - D2

O propósito do cenário D2 foi encontrar coeficientes de liberação de demanda que se adequassem também à entrada de vazão afluente futura, além do nível de armazenamento (S). Optou-se por trabalhar com dados de vazão, ao invés dos dados de precipitação, para a caracterização da entrada de água futura no reservatório. Isto porque em simulações prévias de análise de sensibilidade dos modelos de balanço hídrico de reservatórios do semiárido, observou-se que os dados de atendimento das demandas são muito mais sensíveis aos dados de vazão do que aos dados de precipitação. Como existem incoerências nos dados de vazão e precipitação (Figura 2), quanto à determinação da umidade do trimestre, para alguns períodos, buscou-se determinar os coeficientes de liberação com base nos dados que fossem mais representativos da umidade do trimestre, os dados de vazão.

Os resultados de D2 foram utilizados nos cenários de aplicação RP e RPP. Neste processo de racionamento em dois estágios, α_1 e α_2 foram subcategorizados para as condições em que trimestre seguinte fosse chuvoso (c), normal (n) ou seco (s), dando origem a seis parâmetros: α_{1C} , α_{1N} , α_{1S} , α_{2C} , α_{2N} e α_{2S} (Figura 9).

Figura 9. Ilustração esquemática da regra de operação do cenário D2.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Como CR_1 e CR_2 foram obtidos em D1 e o volume morto do reservatório foi definido como LRC, a otimização das variáveis esteve sujeita apenas a restrição R1:

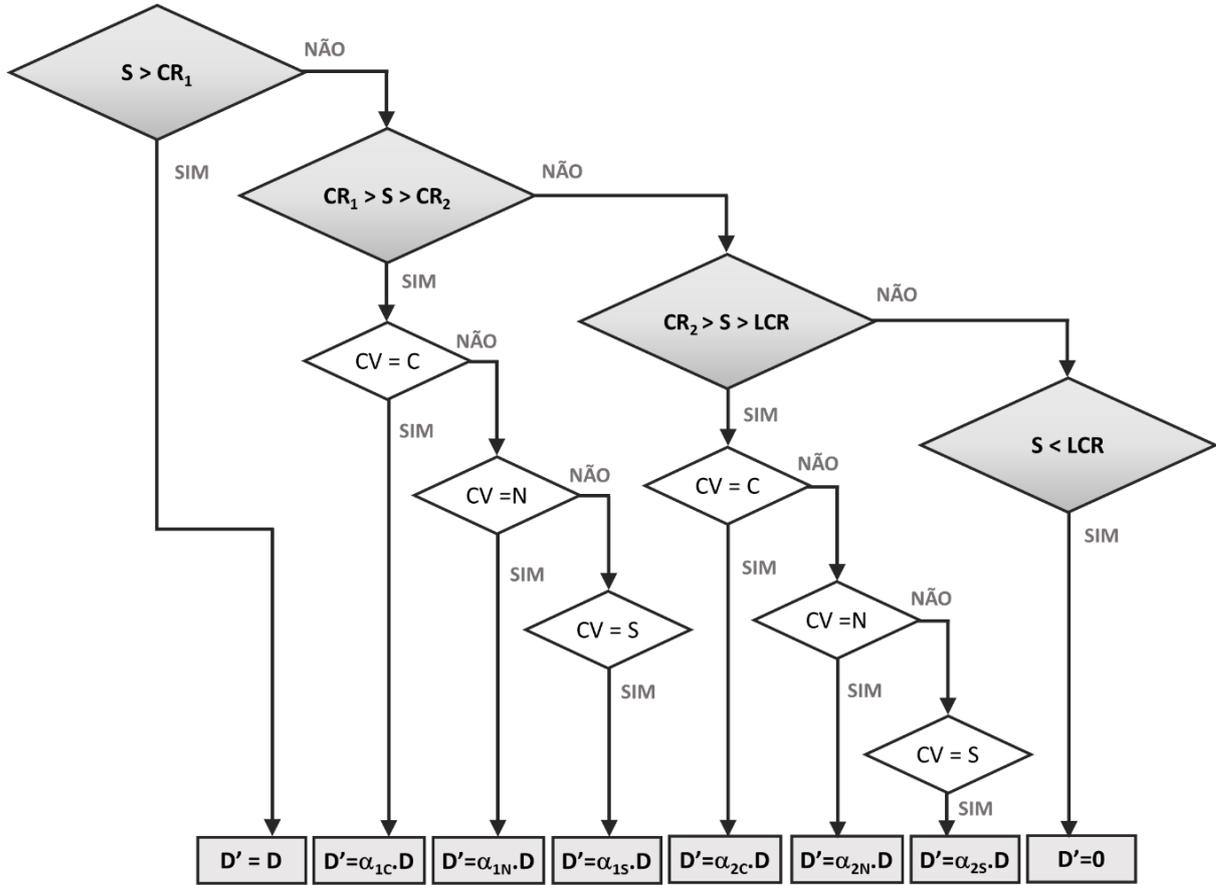
$$R1: 0 \leq \alpha_{2S} \leq \alpha_{2N} \leq \alpha_{2C} \leq \alpha_{1S} \leq \alpha_{1N} \leq \alpha_{1C} \leq 1$$

Para realizar esta simulação-otimização, foi necessário:

- Fazer a sequência ordenada dos dados da série de vazão afluyente trimestral, para encontrar os valores dos tercís 33 e 67, limitantes dos períodos seco, normal e chuvoso;
- Comparar as vazões afluentes acumuladas em cada trimestre com os tercís e então classificar os trimestres como seco, normal ou chuvoso se sua classificação for, respectivamente, tercíl inferior, tercíl médio ou tercíl superior; e
- Programar o AG para simular-otimizar este cenário no período estipulado e, assim, encontrar os valores ótimos dos coeficientes.

A Figura 10 apresenta a simulação realizada em cada mês para determinação do atendimento às demandas. A primeira etapa consiste em verificar em qual nível de armazenamento (S) o reservatório se encontra a cada mês, em seguida, verifica-se a classificação da vazão afluyente (CV) do trimestre seguinte, para então determinar o atendimento à demanda realizado no mês (D'), atribuindo o respectivo coeficiente de liberação da demanda, se for o caso.

Figura 10. Fluxograma da simulação realizada no cenário D2.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A função objetivo do cenário D2 buscou maximizar a eficiência do atendimento a demanda prioritária (Y_{pri}), respeitando as restrições (penalties):

$$Y_{pri}(D2) = \frac{\sum_{t=1}^T D'_{pri}}{\sum_{t=1}^T D_{pri}} - c \cdot (\text{Penalty1} + \text{Penalty2} + \text{Penalty3} + \text{Penalty4} + \text{Penalty5}) \quad (10)$$

$$\text{Penalty1} = \max((\alpha_{2S} - \alpha_{2N}), 0) \quad (11)$$

$$\text{Penalty2} = \max((\alpha_{2N} - \alpha_{2C}), 0) \quad (12)$$

$$\text{Penalty3} = \max((\alpha_{2C} - \alpha_{1S}), 0) \quad (13)$$

$$\text{Penalty4} = \max((\alpha_{1S} - \alpha_{1N}), 0) \quad (14)$$

$$\text{Penalty5} = \max((\alpha_{1N} - \alpha_{1C}), 0) \quad (15)$$

3.3.2 Cenários de aplicação

Para investigar a eficácia das regras de operação, foram utilizados como indicadores de desempenho, além de Y_{total} e Y_{pri} (descritas nas Equações 5 e 6, respectivamente), a

eficiência de atendimento nos períodos de falha (Y_{falha}), que mostra a taxa global de atendimento nos períodos que não houve atendimento pleno e a resiliência (r), que avalia a rapidez com que o cenário se recupera de falhas.

$$Y_{falha} = \frac{\sum_{t=1}^T D'_f}{\sum_{t=1}^T D_f} \quad (16)$$

$$r = \frac{F_s}{F} \quad (17)$$

Em que D'_f é o volume de água fornecido nos meses que houve falhas de atendimento (m^3); e D_f é a demanda mensal dos meses com falha (m^3); F é o número total de meses com falhas de atendimento e F_s é o número de meses em que houve falhas seguidos de meses de atendimento pleno as demandas.

3.3.2.1 SOP₂

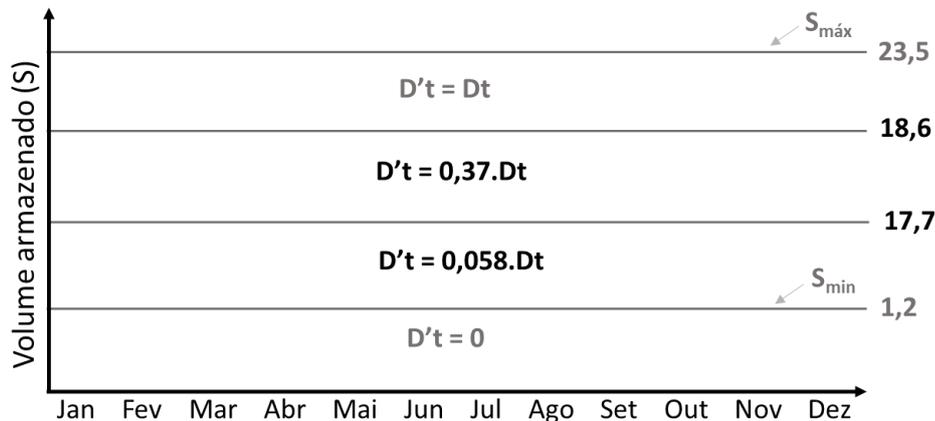
O cenário SOP₂, assim como o cenário SOP₁, utilizou a Regra de Operação Padrão (Figura 7). Estes cenários se diferenciam pelo período de simulação.

3.3.2.2 Regra de operação atual - A

Este cenário simulou o funcionamento da operação efetuada no reservatório Cruzeta, com racionamento em dois estágios, faixas de racionamento constantes em todos os meses do ano, na qual minimamente a demanda prioritária é atendida quando há volume acima do mínimo operacional. A Figura 11 apresenta a regra de operação vigente no reservatório Cruzeta (ANA, 2017a), por curva de aversão ao risco para a situação de afluência nula, que é a realidade na maior parte do ano para esta localidade, com chuvas concentradas em poucos meses do ano. Pode-se observar quais demandas são atendidas em função da cota d'água no reservatório.

Quando o volume de armazenamento se encontra a partir de 18,6 hm³, há atendimento à demanda total existente. Quando o nível se encontra abaixo de 18,6 hm³, mas igual ou acima de 17,7hm³, realiza-se o primeiro estágio de racionamento na liberação de água, atendendo às demandas restritivas, que consiste em atender totalmente à demanda dos usos prioritários e parcialmente à demanda dos usos não prioritários, correspondendo a 37% das demandas totais. O atendimento às demandas restritivas visa ao atendimento das demandas prioritárias e das demandas de abastecimento industrial em sua totalidade, restringindo-se o atendimento das demandas de irrigação apenas às culturas perenes (ANA, 2017b).

Figura 11. Regra operativa do reservatório Cruzeta.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Finalmente quando o nível se encontra abaixo de 17,7hm³, mas igual ou acima de 1,2 hm³ (volume morto ou mínimo operacional), o segundo estágio de racionamento realiza atendimento somente à demanda dos usos prioritários, correspondendo a 5,8% das demandas totais.

3.3.2.3 Racionamento – R

No cenário R, a regra de operação com racionamento foi simulada. Os valores obtidos no cenário D1 (CR₁ anual, CR₂ anual, α_1 e α_2) foram aplicados. Este cenário teve o objetivo de realizar uma simulação com racionamento, mas sem a incorporação de previsões de precipitação, e assim, comparar o desempenho das aplicações realizadas.

3.3.2.4 Racionamento com previsão - RP

No cenário RP, foi aplicada a regra de operação do reservatório com racionamento em função do volume armazenado e também da previsão de precipitação (P). Os valores das variáveis encontradas nos cenários de definição foram aplicados aqui, conforme a previsão sazonal do INMET. Para isto, se fez necessário:

- Classificar, para todos os meses de simulação, a partir dos prognósticos climáticos emitidos pelo INMET, a previsão para o trimestre seguinte (tercil mais provável indicado ou classificar como tercil médio, quando apontada igual probabilidade para as três categorias);
- Programar o AG para simular o cenário utilizando os coeficientes de liberação de água, obtidos no cenário D2, correspondentes a P e ao volume armazenado (com faixas de

acionamento delimitadas por CR_1 e CR_2 , obtidos no cenário D1). Dessa forma, nos meses em que o volume armazenado do reservatório esteve compreendido nas faixas de racionamento, foram liberadas as frações de demanda correspondentes à condição seca (α_{1S} e α_{2S}), normal (α_{1N} e α_{2N}), ou chuvosa (α_{1C} e α_{2C}), se a classificação de P fosse, respectivamente, no tercil inferior, médio ou superior.

3.3.2.5 Racionamento com previsão perfeita - RPP

No cenário RPP, foi aplicada a regra de operação do reservatório com racionamento em função do volume armazenado e da previsão perfeita (PP). O termo previsão perfeita se refere à condição na qual a previsão pudesse acertar perfeitamente a classificação de precipitação acumulada trimestral, verificando a máxima eficiência da operação não afetada por incertezas.

Para isto, se fez necessário:

- Classificar, para todos os meses de simulação, as precipitações dos trimestres seguintes de acordo com a referência de tercis do INMET (Tabela 2) e encontrar a PP;
- Programar o AG para simular o cenário utilizando os coeficientes de liberação de água, obtidos no cenário D2, correspondentes a PP e ao volume armazenado (com faixas de racionamento delimitadas por CR_1 e CR_2 , obtidos no cenário D1). Dessa forma, nos meses em que o volume armazenado do reservatório esteve compreendido nas faixas de racionamento, foram liberadas as frações de demanda correspondentes à condição seca (α_{1S} e α_{2S}), normal (α_{1N} e α_{2N}), ou chuvosa (α_{1C} e α_{2C}), se a PP fosse classificada, respectivamente, como tercil inferior, médio ou superior.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Cenários de definição

A simulação-otimização D1 encontrou 138 soluções ótimas para os valores de CR_1 , CR_2 , α_1 e α_2 , nas quais a demanda prioritária foi plenamente atendida. Para selecionar uma dentre as 138 soluções, foi calculada a mediana dos valores CRs, e então encontrados os valores alfas correspondentes. Com isso, a solução ótima de D1 selecionada é apresentada a seguir:

- $CR_1 = 18,64 \text{ hm}^3$
- $CR_2 = 14,86 \text{ hm}^3$
- $\alpha_1 = 0,375$
- $\alpha_2 = 0,159$

Então, este racionamento em dois estágios atende a 37,5% da demanda quando o nível de armazenamento está entre 18,64 hm³ e 14,86 hm³, e 15,9% da demanda quando o nível de armazenamento está entre 14,86 hm³ e o volume morto, 1,18 hm³.

Para obtenção dos resultados do cenário D2, foi realizada a sequência ordenada dos dados da série de 100 anos de vazão afluente de Cruzeta, acumulada por trimestre, e foram obtidos os valores dos tercís, apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Limites da faixa normal de vazão afluente trimestral (m³/s) – CRUZETA.

TRIMESTR E	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN
	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV
Limite inferior	0,45	1,72	3,13	3,60	2,78	1,48	0,60	0,15	0,00	0,00	0,00	0,04
Limite superior	1,40	3,86	6,22	6,99	5,49	3,33	1,57	0,56	0,12	0,00	0,04	0,28

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Os percentis 33 de cada trimestre constituem o limite inferior da faixa normal e os percentis 67 de cada trimestre constitui o limite superior da faixa normal. Ressalta-se que em set/out/nov, out/nov/dez e nov/dez/jan, como o limite inferior da faixa normal é igual a 0,00, os trimestres não foram classificados como secos.

A partir desta referência para classificação dos trimestres, analisados em D2 como chuvosos, normais ou secos, foi possível determinar na simulação-otimização, quais os valores ótimos dos coeficientes de atendimento a demanda pré-determinados. Assim, 160 soluções ótimas foram encontradas, nas quais a demanda prioritária foi plenamente atendida. Para selecionar uma dentre as 160 soluções, foram comparados seus atendimentos a demanda total. A solução ótima de D2, que ofereceu o maior atendimento as demandas totais, é apresentada a seguir:

- $\alpha_{1C} = 0,886$
- $\alpha_{1N} = 0,623$
- $\alpha_{1S} = 0,490$
- $\alpha_{2C} = 0,314$
- $\alpha_{2N} = 0,165$
- $\alpha_{2S} = 0,123$

Desta forma, quando o volume armazenado esteve entre CR_1 e CR_2 , foram atendidos 88,6%, 62,3% ou 49,0% da demanda, quando a vazão afluyente trimestral foi classificada como característica de um período chuvoso, normal ou seco, respectivamente. Assim como quando o volume armazenado esteve entre CR_2 e LRC, foram atendidos 31,4%, 16,5% e 12,3% para a respectiva classificação mencionada.

Observa-se que o coeficiente α_1 (de D_1) apresenta valor menor que os três coeficientes otimizados em D_2 , para a mesma faixa de racionamento. Já o coeficiente α_2 (de D_1) é menor que dois dos três coeficientes obtidos em D_2 , para a mesma faixa de racionamento. Então, para faixas de armazenamento iguais, com limites em CR_1 e CR_2 , o cenário D_2 disponibiliza mais água para as demandas que D_1 , excetuando o coeficiente α_{2S} . Ainda, é relevante observar que os menores coeficientes obtidos em D_1 e D_2 , que são α_2 e α_{2S} , atendem além da demanda prioritária, que corresponde a 5,8% das demandas totais.

Os indicadores de desempenho de D_1 e D_2 são comparados aos do SOP_1 na Tabela 4. Quando ao atendimento as demandas totais, observa-se que SOP_1 atendeu mais que D_1 e D_2 . Em contrapartida, SOP_1 não atendeu plenamente a demanda prioritária no período simulado, já D_1 e D_2 foram otimizados para minimizar estes déficits. Observa-se também, em Y_{total} , que D_2 atendeu mais as demandas que D_1 , porque seus coeficientes de liberação de água são maiores que os de D_1 , em sua maioria.

Tabela 4. Indicadores de desempenho dos cenários de definição.

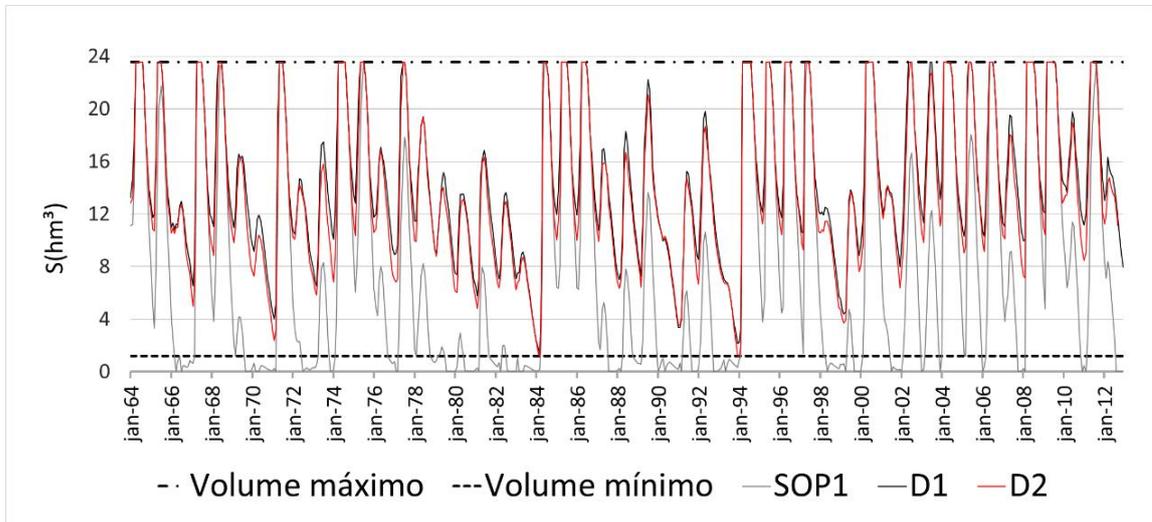
Indicadores de desempenho	Cenários de definição		
	SOP_1	D_1	D_2
Y_{total}	0,67	0,49	0,53
Y_{pri}	0,68	1,00	1,00

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A Figura 12 apresenta o comportamento do nível de água no reservatório nos cenários SOP_1 , D_1 e D_2 , ao longo do período simulado. Observa-se que em SOP_1 , o reservatório ficou abaixo do volume morto em 23 períodos ao longo dos 49 anos simulados, sendo o intervalo mais longo de crise, com 21 meses consecutivos abaixo do volume morto, o período de julho de 1982 a março de 1984. Enquanto que D_1 não atingiu este limite e D_2 atingiu por dois períodos, em março de 1984 e de dezembro de 1993 a janeiro de 1994, não chegando a ser inferior ao mesmo, porque estes cenários foram otimizados para a garantia do atendimento da

demanda prioritária em todo o período, que só acontece quando o nível de armazenamento está compreendido no volume útil.

Figura 12. Evolução volumétrica dos cenários de definição.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

4.2 Cenários de aplicação

Os cinco cenários de aplicação, simulados no período de 100 meses, apresentam seus resultados detalhados quanto à liberação de água para as demandas e ao comportamento volumétrico do reservatório.

4.2.1 Atendimento as demandas

A partir da Tabela 5, observou-se que, assim como nos cenários de definição, o SOP_2 apresentou a maior liberação de água para as demandas totais, mas não atendeu plenamente a demanda prioritária. Os demais cenários atenderam plenamente a demanda prioritária e apresentaram ganhos em Y_{total} com as regras de operação propostas. O cenário A, regra de racionamento atual do reservatório, teve o menor atendimento às demandas totais (52%). Em seguida R, com 59%, que consistiu em regra de racionamento sem uso de previsão de precipitação. Com 61%, RP apresentou ganhos pela incorporação das previsões de precipitação a tomada de decisão. O cenário RPP, com 62% de atendimento as demandas totais, foi o cenário com melhor desempenho, por ter incorporado previsões de precipitação sem erros atrelados. Pode-se observar que de A a RPP há um ganho de 10% nos atendimentos totais, e que RP fica apenas 1% abaixo de RPP.

Tabela 5. Indicadores de desempenho dos cenários de aplicação.

Indicadores de desempenho	Cenários de aplicação				
	SOP ₂	A	R	RP	RPP
<i>Ytotal</i>	0,83	0,52	0,59	0,61	0,62
<i>Ypri</i>	0,84	1,00	1,00	1,00	1,00
<i>Yfalha</i>	0,123	0,079	0,256	0,321	0,323
<i>r</i>	0,21	0,15	0,14	0,12	0,12

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Quanto ao atendimento nos períodos de falha, aqueles nos quais não foi possível atender 100% das demandas totais, *Yfalha* mostra que A apresentou a menor liberação de água, seguido de SOP₂, R, RP e RPP, nesta sequência. O cenário A, apesar de sempre atender a demanda prioritária, realiza um racionamento muito conservador com seus coeficientes, a ponto de SOP₂, no total, atender mais que A nos meses de falha, mesmo com meses de $D' = 0$. Também é possível observar que as propostas de racionamento otimizadas por AG melhoram esta eficiência, em especial RP, que se aproximou muito de RPP (situação idealizada), e atendem mais de 32% das demandas totais.

A resiliência dos cenários mostra uma sequência decrescente de SOP₂ a RPP, porque este indicador considera como falha qualquer atendimento que não seja integral. SOP₂ é o mais resiliente, porque oferece água as demandas sem fazer reservas para o futuro, portanto, apesar do sistema entrar em crise diversas vezes, quando ele se recupera, atende o valor integral da demanda assim que é possível, computando mais episódios de recuperação que os demais cenários. O contrário acontece nos demais cenários, os episódios de escassez são convertidos em períodos mais longos de racionamento, e por isso há menos recuperação nos períodos de falha.

Na Tabela 6, pode-se analisar em detalhes os atendimentos realizados pelos cenários. De fato, SOP₂ atendeu integralmente as demandas em mais meses do que os demais cenários, com 81%, mas não fez nenhum atendimento em 16 meses. Este cenário teve cinco períodos de falha, chegando a ficar cinco meses consecutivos com $D'=0$, do período de outubro de 2007 a fevereiro de 2008. Nos três meses que houve atendimento parcial, D' variou de 60% a 99% da demanda total, pois era a quantidade que o reservatório podia dispor nos meses em questão.

Tabela 6. Atendimento a demanda dos cenários de aplicação.

Atendimento a demanda	Cenários de aplicação				
	SOP ₂	A	R	RP	RPP
Integral	0,81	0,48	0,44	0,43	0,43
Parcial	0,03	0,52	0,56	0,57	0,57
Não houve	0,16	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

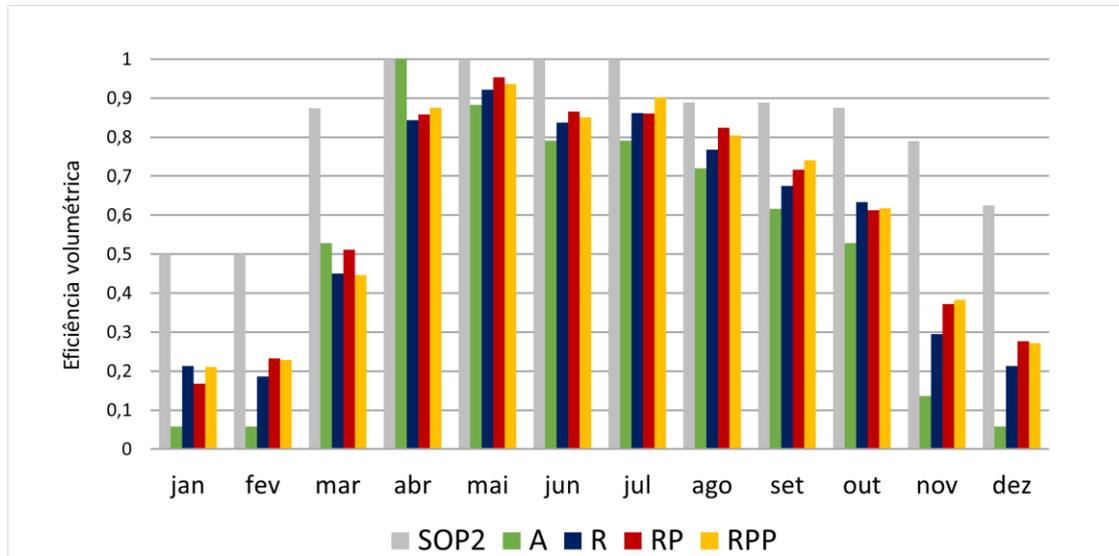
Ao contrário de SOP₂, os demais cenários não apresentaram situação de $D^* = 0$. O cenário A atendeu as demandas integralmente mais vezes do que os cenários otimizados em AG, porque seus limites de faixa de armazenamento são diferentes, o limite da primeira faixa (18,6 hm³) é muito próximo a CR₁ (18,64 hm³), mas o limite da segunda faixa é superior, com 17,7 hm³ comparado à CR₂, com valor de 14,86 hm³. Desta forma, em A, o reservatório entra na segunda faixa de racionamento mais cedo e preserva mais água por atender somente a demanda prioritária quando o nível está abaixo de 17,7hm³. Assim, ele recupera seu nível limite de atendimento pleno mais rapidamente. A entrou em período de falha, por nove vezes, sendo o maior período consecutivo de atendimento parcial de junho de 2004 a março de 2005, totalizando 10 meses em que somente a demanda prioritária foi atendida.

O cenário R realizou atendimentos a demanda integral 4% a menos que A, e 1% a mais que RP e RPP, porque os CRs dos cenários otimizados foram constantes, mas os coeficientes α de RP e RPP, advindos de D2, são, em sua maioria, maiores que os de R. Como R, ao longo da simulação, liberou menos suprimento que RP e RPP (Tabela 5), seu armazenamento conseguiu atingir o nível de CR₁ em 1 mês a mais. Quanto ao atendimento parcial, R passou por nove períodos de falhas, ficando 10 meses consecutivos com α variando de 0,16 a 0,38; RP e RPP passaram por oito períodos de falhas cada, chegando permanecer em falha por 11 meses consecutivos, de novembro de 2011 a setembro de 2012, com atendimento de RP variando de 0,12 a 0,62 e de RPP variando de 0,12 a 0,49.

Ainda com relação aos atendimentos às demandas, a Figura 13 apresenta o atendimento médio mensal dos cenários. O cenário A apresenta, em 10 dos 12 meses, as menores médias mensais, mas em abril teve média de 100%; e o cenário SOP₂ apresenta as maiores médias mensais de atendimento, atendendo plenamente as demandas de abril a julho. A estes fatos atribuem-se o caráter conservador de A, que na sua segunda faixa de racionamento atende apenas a demanda prioritária, e o caráter consumidor de SOP₂ que entrega suprimento até que

o reservatório atinja o volume mínimo. Em sete dos 12 meses, R atendeu menos que RP ou RPP, pelos seus coeficientes α de valores menores.

Figura 13. Eficiência volumétrica mensal dos cenários de aplicação.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

É possível observar que, mesmo com as diferentes operações realizadas pelos cenários, há uma tendência de aumento e diminuições no atendimento comum a todos eles, na qual no semestre de abril a setembro foram realizadas as maiores médias de atendimento.

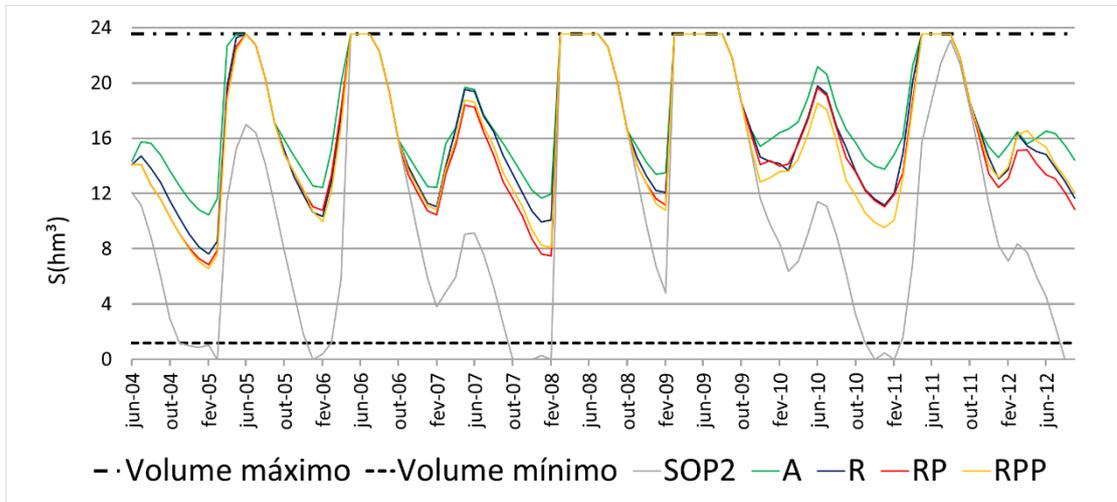
4.2.2 Variações de volumes

A Figura 14 apresenta o comportamento do nível de água no reservatório (S) nos cenários de aplicação, ao longo do período simulado. Observa-se que em SOP₂, o reservatório ficou abaixo do volume morto em cinco períodos ao longo dos 100 meses simulados, sendo o intervalo mais longo de crise, com cinco meses consecutivos abaixo do volume morto, o período de outubro de 2007 a fevereiro de 2008, mesmo período de maior déficit de atendimento. Os demais cenários não atingiram este limite. O cenário A apresenta os maiores níveis de armazenamento, porque é o cenário que atende menos as demandas, como já discutido na Tabela 5, Tabela 6 e Figura 13.

O reservatório extravasou em cinco períodos, exceto em SOP₂, com um período a menos. SOP₂ extravasou menos, em 14 meses, A extravasou mais, em 21 meses. Os cenários otimizados reduziram os períodos de extravasamento comparados ao cenário A, com 18 meses para R, 19 para RP e 18 para RPP. De março a agosto de 2009, houve o maior período

consecutivo de extravasamento, comum a todos os cenários, mas com volumes extravasados diferentes.

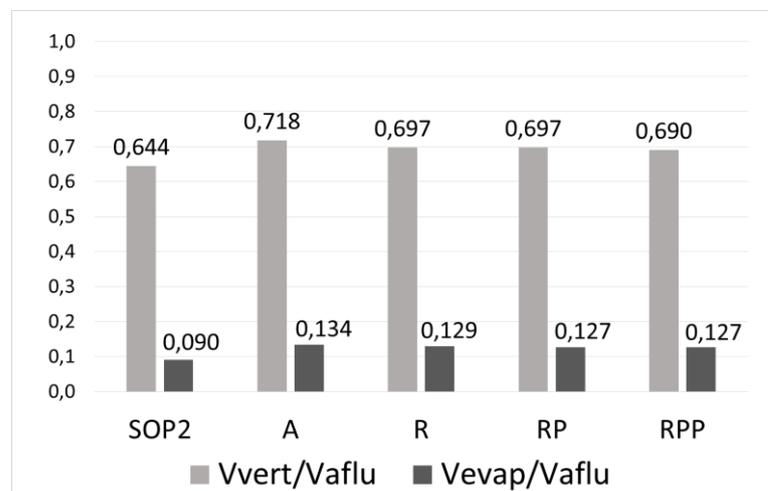
Figura 14. Evolução volumétrica dos cenários de aplicação.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A Figura 15 apresenta as razões entre os volumes perdidos por vertimento (V_{vert}) e por evaporação (V_{evap}) e os volumes afluentes (V_{aflu}) para cada cenário. Apesar da alta evaporação anual média do reservatório Cruzeta comparada à média de precipitação no mesmo período (Figura 2), é possível observar que se perde mais volume por vertimento do que por evaporação. Isto se deve ao fato de que a principal entrada de água do reservatório provém da vazão afluente drenada em toda bacia hidráulica, e a evaporação incide apenas na superfície líquida do reservatório.

Figura 15. Razão de volume perdido nos cenários de aplicação.

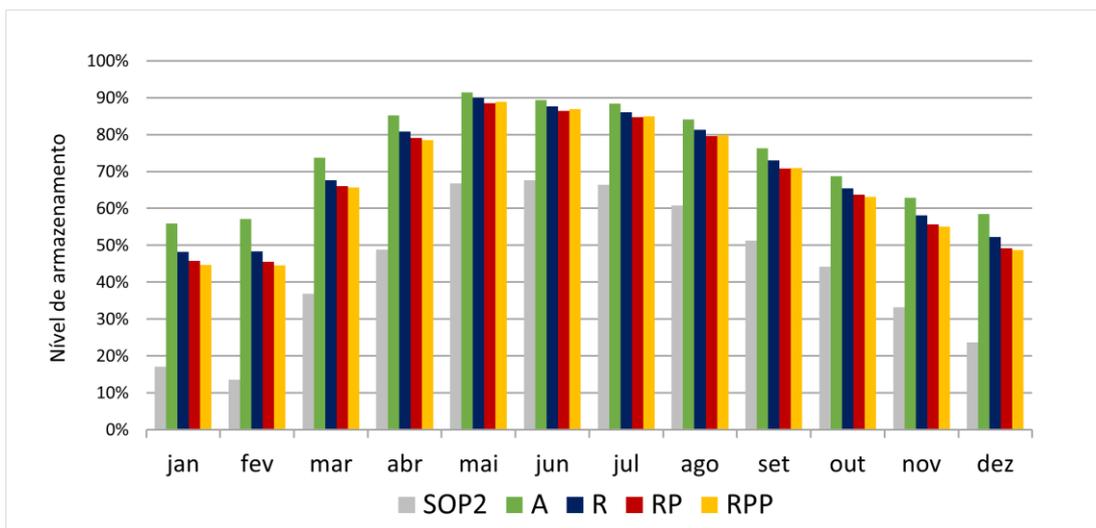


Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Observa-se que SOP₂ é o cenário que perdeu menos volume por vertimento e também por evaporação, correspondendo a 64,4% e 9,00% de toda vazão que afluiu ao reservatório no período simulado, respectivamente. Isto porque seus níveis de armazenamento se mantiveram mais baixos que os demais cenários, em toda simulação, resultando em menos volume vertido e menores áreas médias para evaporação. O contrário aconteceu em A, com as maiores razões para vertimento e evaporação. Os cenários otimizados em AG, obtiveram razões bem próximas ou iguais, valores maiores que SOP₂, mas inferiores ao cenário A.

A Figura 16 mostra o volume de armazenamento médio mensal do reservatório nos cenários, em porcentagem. SOP₂ possui as menores médias, A possui as maiores, R sempre é maior que RP e RP, complementando o que foi discutido na Figura 13. SOP₂ tem sua maior média no mês de junho e os demais cenários no mês de maio.

Figura 16. Nível de armazenamento médio mensal dos cenários de aplicação.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Assim como na Figura 13, observa-se uma tendência de aumentos e diminuições ao longo dos meses comuns a todos os cenários, e o semestre de abril a setembro se destaca com as maiores médias. Assim, é interessante observar que, mesmo com diferentes operações simuladas, existe uma sazonalidade clara quanto ao volume de armazenamento médio do reservatório Cruzeta. Na Figura 2, observa-se que de janeiro a junho é o semestre mais chuvoso em Cruzeta, de fevereiro a julho acontecem as maiores entradas de água por vazão afluyente, e de abril a agosto as menores taxas de evaporação. Portanto esta configuração de maiores entradas e menores saídas de água é determinante no balanço hídrico do reservatório.

Obviamente, se há mais água armazenada no semestre de abril a setembro, então é neste período que as demandas podem atender um percentual maior, e o contrário acontece no

semestre de outubro a março. As operações simuladas com faixas de racionamento constantes ao longo do ano neste reservatório não acompanham a tendência sazonal predominante. Então, otimizar CR₁ e CR₂ de forma semestral pode ser uma opção para que haja mais consumo de água no semestre de outubro a março, sem que o reservatório entre em crise, mas liberando mais água para o atendimento das demandas. Desta forma, também, talvez fosse reduzido o volume perdido por vertimento, porque no semestre mais abundante, mais água seria necessária para recuperar os baixos níveis de armazenamento do semestre mais escasso.

4.3 Análise dos dados das séries históricas e de previsão

Os dados de vazão afluente, previsão e precipitação foram classificados e utilizados na definição e na aplicação das regras de operação do reservatório, por isso sua coerência foi analisada neste tópico.

4.3.1 Precipitação e vazão afluente

A partir das classificações trimestrais de precipitação (Tabela 2) e de vazão afluente (Tabela 3), as séries históricas destas componentes do balanço hídrico foram comparadas, de 1964 a 2012. Dos 585 trimestres comparados, as classificações de tercís coincidiram em 67 trimestres de classificação seco, 81 normais e 151 chuvosos; e não coincidiram em 286 meses (48,8%), como mostra o Quadro 3.

Quadro 3. Classificações incompatíveis entre precipitação e vazão afluente.

Precipitação		Vazão afluente	
Nº trimestres	Classificação	Nº trimestres	Classificação correspondente
146	Seco	87	Normal
		59	Chuvoso
89	Normal	25	Seco
		64	Chuvoso
51	Chuvoso	9	Seco
		42	Normal

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A menor coincidência e as maiores incompatibilidades se deram quando a precipitação foi classificada como seca. As diferenças se apresentaram na maioria, nos trimestres

set/out/nov, out/nov/dez e nov/dez/jan, com 71 das 146 ocorrências, porque neste período a vazão afluyente não teve classificação de período seco, como foi discutido também nos resultados da Tabela 3. Assim, por 61 vezes houve vazão afluyente exatamente igual a zero, classificada como normal, o que contribuiu para esta disparidade entre classificações.

Quanto à classificação de precipitação normal e vazão afluyente diferente disso, nenhum trimestre específico ficou evidenciado, com seis a nove ocorrências cada. A última classificação, de trimestre chuvoso para precipitação, e seco ou normal para vazão, observou-se um leve aumento das ocorrências nos três primeiros trimestres do ano e nos trimestres de jul/ago/set, ago/set/out/ e set/out/nov, com cinco a sete em cada, enquanto os outros trimestres tiveram de um a quatro. Estes períodos coincidem em grande parte com a ascensão e o declínio médio da vazão afluyente (Figura 2).

Observa-se também na Figura 2, que há diferentes picos das médias de precipitação e vazão afluyente, nos meses de março e abril, respectivamente. Portanto, esta defasagem percebida faz com que não necessariamente as classificações venham a coincidir sempre. Por exemplo, um determinado trimestre pode ter precipitação acima da faixa normal, mas vazão afluyente normal ou abaixo disso porque principalmente depois de um período seco, as primeiras chuvas são absorvidas pelo solo até que, após sua saturação, inicia-se o escoamento responsável pela vazão afluyente.

4.3.2 Previsão e precipitação

As previsões do INMET, foram comparadas às precipitações do mesmo período apresentadas pela série histórica. Dos 100 trimestres comparados, as classificações de tercís coincidiram por 44 vezes (nove trimestres secos, 25 normais e dez chuvosos). O Quadro 4 apresenta o detalhamento destas incompatibilidades. É possível observar que a classificação indicada pelo INMET como normal é a mais incompatível com a classificação dos mesmos trimestres para a série histórica de precipitação, com 46 das 56 falhas.

Ressalta-se que dos dez meses que tiveram previsão de igual probabilidade para as três categorias (classificados como normal para fins de simulação), oito tiveram classificações de precipitação como seca ou chuvosa. Estas ocorrências não caracterizam falha de previsão. Destes 46 trimestres, apontados como normais, 27 foram secos e 19 foram chuvosos. Em seguida, por nove vezes o trimestre foi indicado como seco, mas em seis houve precipitação normal e em três, chuvosa. Por fim, em um trimestre houve indicação de período chuvoso, mas

aconteceu precipitação de classificação normal. Metade destas incompatibilidades de classificação subestimou a precipitação, a outra metade a superestimou.

Quadro 4. Classificações incompatíveis entre previsão e precipitação.

Previsão INMET		Série histórica de precipitação	
Nº trimestres	Classificação adotada	Nº trimestres	Classificação correspondente
9	Seco	6	Normal
		3	Chuvoso
46	Normal	27	Seco
		19	Chuvoso
1	Chuvoso	1	Normal

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

4.4 Comparação entre os cenários

Os cenários de racionamento apresentaram vantagens sobre o cenário de operação padrão, que não reserva água para atendimentos futuros. Estes atenderam minimamente a demanda prioritária, realizando períodos de privação para algumas demandas para evitar que o atendimento não chegasse a ser nulo. O perfil consumista de SOP₂, de fato, proporcionou maiores níveis globais de atendimento às demandas, mas manteve o reservatório em seus níveis mais baixos, comparados as demais regras, inclusive levando o sistema ao colapso por vezes. As políticas de racionamento são apropriadas para a região do reservatório Cruzeta, que, em períodos de crise, adota o racionamento como forma de remediação, mas precisa utilizar desta munção como estratégia preventiva.

Este estudo verificou que a política de racionamento proposta pelo PRH para o reservatório Cruzeta, garante o atendimento das demandas prioritárias, mas é conservadora nas suas porcentagens e faixas de racionamento. A eficiência de atendimento nos períodos de falha (*Yfalha*) do cenário A (0,079) é menor que a de SOP₂ (0,123), que não realiza racionamento. A mesma configuração de racionamento em 2 estágios, otimizada em AG no cenário R, mostrou que pode haver mais liberação de água para as demandas sem que haja rebaixamento do nível mínimo operacional do reservatório.

Quanto à incorporação das previsões de precipitação na política de racionamento, percebeu-se que o uso dos coeficientes otimizados e subdivididos em classes pode trazer melhorias no atendimento, inclusive nos períodos de falha, aproveitando com mais eficiência o volume de armazenamento. A defasagem percebida entre precipitação e vazão afluyente não se torna um problema, mas sim um aumento no “tempo de alerta” para períodos chuvosos e secos de vazão afluyente. Como a previsão de precipitação é trimestral e o período de precipitação se apresenta anterior ao da vazão afluyente, então o racionamento é acionado pela indicação da previsão, que indiretamente comunica a vazão que afluirá. Então, uma previsão de precipitação abaixo do normal para o próximo trimestre, indica que pouca vazão afluyente virá nos meses seguintes, e o racionamento preserva água para o momento de escassez. Quando o contrário acontece, utiliza-se mais água porque se espera que esses volumes se recuperem no futuro.

A vazão é a entrada mais relevante de água ao reservatório, porque drena água de toda bacia hidráulica, enquanto a entrada por precipitação consiste naquela que incide sobre o espelho d’água, somente. Por esta razão, os coeficientes foram otimizados para se adequar a esta variável. No entanto, não há previsão de vazão afluyente e sim de precipitação, e se esta anuncia indiretamente a vazão que afluirá ao reservatório, seu uso é pertinente para a prevenção de crises no reservatório Cruzeta.

Quando se compara RP a RPP, percebe-se que RP, a ideia central deste trabalho, obteve resultados muito próximos da condição idealizada, RPP. O cenário com as previsões perfeitas é pouco superior ao cenário que usa as previsões disponíveis, embora falhas existam. Como a maior parte delas se concentrou na classificação normal, então houve liberação de água intermediária a períodos secos ou chuvosos, e a eficiência global foi pouco prejudicada.

5. CONCLUSÕES

- A política de operação padrão não tem razão de ser aplicada em reservatórios localizados em regiões que sofrem com a escassez hídrica, como a região semiárida, porque uma vez esgotados, os níveis de armazenamento não se recuperam com facilidade. Então, regras de operação devem ser desenvolvidas e colocadas em prática para amenizar as crises.
- O algoritmo genético é uma ferramenta poderosa para gerenciamento de recursos hídricos porque, com sua versatilidade no processo de otimização, pode auxiliar os tomadores de decisão.

- Os cenários com racionamento otimizados em algoritmo genérico apresentaram resultados intermediários entre o consumismo da regra de operação padrão e o conservadorismo da regra atualmente aplicada ao reservatório. Seus resultados apresentaram propostas de operações de reservatórios razoáveis, que aproveitam ao máximo a disponibilidade hídrica, sem deixar que o reservatório colapse.
- O aumento dos períodos de falha (atendimento menor que 100%), através de operação com racionamento, é benéfico ao atendimento das demandas dos reservatórios inseridos no semiárido, porque esta economia realizada em alguns períodos age de maneira preventiva às crises hídricas, evitando o não atendimento da demanda prioritária.
- Agregar previsões de precipitação à política de racionamento otimizada em algoritmo genético trouxe ganhos na eficiência de utilização do reservatório: a confiabilidade volumétrica passou de 0,59 para 0,61 e a eficiência de atendimento nos períodos de falha de 0,256 aumentou para 0,321. Mesmo com imprecisões detectadas nas previsões, este cenário se aproximou bastante da condição ideal, o cenário de racionamento com previsão perfeita. Ressalta-se que mesmo com a utilização das previsões perfeitas, os valores da eficiência deste último cenário não são tão elevados (eficiência volumétrica de 0,62 e a eficiência de atendimento nos períodos de falha de 0,323).
- Em todos os cenários simulados, apesar das diferentes operações implementadas, persistiu o comportamento sazonal do reservatório Cruzeta quanto ao nível de armazenamento e também, conseqüentemente, quanto ao atendimento às demandas. Por isso, mais possibilidades, como variações dos limites das faixas de racionamento ao longo do ano, por exemplo, podem ser estudadas em trabalhos futuros a fim de sofisticar e adaptar cada vez mais a gestão do açude.

6. REFERÊNCIAS

- ADELOYE, A. J.; DAU, Q. V. Hedging as an adaptive measure for climate change induced water shortage at the Pong reservoir in the Indus Basin Beas River, India. **Science of the Total Environment**, v. 687, p. 554–566, 15 out. 2019.
- AESBE. **Cruzeta (RN) tem abastecimento retomado pela Caern**. Disponível em: <<https://aesbe.org.br/cruzeta-rn-tem-abastecimento-retomado-pela-caern/>>.
- AGORARN. **Cruzeta sai da situação de colapso no abastecimento de água**. Disponível em: <<https://agorarn.com.br/noticia/cruzeta-sai-da-situacao-de-colapso-no-abastecimento-de-agua/>>. Acesso em: 2 jul. 2020.
- AGORARN. **Municípios de Cruzeta e João Dias deixam situação de colapso no abastecimento**. Disponível em: <<https://agorarn.com.br/cidades/municipios-de-cruzeta-e-joao-dias-deixam-situacao-de-colapso-no-abastecimento/>>.
- AL-AQEELI, Y. H.; LEE, T. S.; ABD AZIZ, S. Enhanced genetic algorithm optimization model for a single reservoir operation based on hydropower generation: case study of Mosul reservoir, northern Iraq. **SpringerPlus**, v. 5, n. 1, 2016.
- ALLAWI, M. F. et al. Forecasting hydrological parameters for reservoir system utilizing artificial intelligent models and exploring their influence on operation performance. **Knowledge-Based Systems**, v. 163, p. 907–926, 2019.
- ANA, A. N. DE Á. Reservatórios do Semiárido Brasileiro: Hidrologia, Balanço Hídrico e Operação - Anexo B. p. 140, 2017a.
- ANA, A. N. DE Á. Reservatórios Do Semiárido Brasileiro: Hidrologia, Balanço Hídrico e Operação - Relatório Síntese. p. 88, 2017b.
- ANA, A. N. DE Á. **AÇUDES DO SEMIÁRIDO (SAIBA MAIS)**. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/sala-de-situacao/acudes-do-semiarido/acudes-do-semiarido-saiba-mais>>. Acesso em: 20 jun. 2020.
- ANA, A. N. DE Á.; MMA, M. DO M. A. Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu - Resumo Executivo. p. 160, 2016a.
- ANA, A. N. DE Á.; MMA, M. DO M. A. Plano de Recursos Hídricos da bacia hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu (relatório técnico). p. 195, 2016b.
- ANAND, J.; GOSAIN, A. K.; KHOSA, R. Optimisation of multipurpose reservoir operation by coupling soil and water assessment tool (SWAT) and genetic algorithm for optimal operating policy (case study: Ganga River Basin). **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 5, 2018.
- BLOCK, P. J. et al. A streamflow forecasting framework using multiple climate and

- hydrological models. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 45, n. 4, p. 828–843, 2009.
- BOLOURI-YAZDELI, Y. et al. Evaluation of real-time operation rules in reservoir systems operation. **Water Resources Management**, v. 28, n. 5, p. 715–729, 2014.
- BRAVO, J. M. et al. Incorporating Forecasts of Rainfall in Two Hydrologic Models Used for Medium-Range Streamflow Forecasting. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 14, n. 5, p. 435–445, 2009.
- CHANG, L. C. et al. Constrained genetic algorithms for optimizing multi-use reservoir operation. **Journal of Hydrology**, v. 390, n. 1–2, p. 66–74, 2010.
- CHEN, D. et al. A Genetic Algorithm Parallel Strategy for Optimizing the Operation of Reservoir with Multiple Eco-environmental Objectives. **Water Resources Management**, v. 30, n. 7, p. 2127–2142, 2016.
- CHIAMSATHIT, C.; ADELOYE, A. J.; SOUDHARAJAN, B. Genetic algorithms optimization of hedging rules for operation of the multi-purpose Ubonratana Reservoir in Thailand. **Evolving Water Resources Systems: Understanding, Predicting and Managing Water–Society Interactions Proceedings of ICWRS2014**, v. 364, n. June, p. 507–512, 2014.
- CHIAMSATHIT, C.; ADELOYE, A. J.; SOUNDHARAJAN, B. A New Dynamic Genetic Algorithm for optimising the reservoir operating rule curves : A case study of the Ubonrantana reservoir , Thailand. **XV World Water Congress**, p. 267–283, 2015.
- COLLISCHONN, W. et al. Medium-range reservoir inflow predictions based on quantitative precipitation forecasts. **Journal of Hydrology**, v. 344, n. 1–2, p. 112–122, 2007.
- FAN, F. M. et al. Performance of Deterministic and Probabilistic Hydrological Forecasts for the Short-Term Optimization of a Tropical Hydropower Reservoir. **Water Resources Management**, v. 30, n. 10, p. 3609–3625, 2016.
- FICCHÍ, A. et al. Optimal Operation of the Multireservoir System in the Seine River Basin Using Deterministic and Ensemble Forecasts. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 142, n. 1, 2016.
- G1RN. **Seca faz subir para 17 número de cidades em colapso no RN**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rn/rio-grande-do-norte/noticia/2015/11/seca-faz-subir-para-17-numero-de-cidades-em-colapso-no-rn.html>>. Acesso em: 21 jun. 2020.
- G1RN. **Cruzeta, RN, volta a ter água nas torneiras e número de cidades em colapso cai para 12**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rn/rio-grande-do-norte/noticia/cruzeta-rn-volta-a-ter-agua-nas-torneiras-e-numero-de-cidades-em-colapso-cai-para-12.ghtml>>.
- GOI. **Drought Management Manual**. Department of Agriculture, Cooperation & Farmers

- Welfare; Ministry of Agriculture & Farmers Welfare; New Delhi, India.: [s.n.].
- GONDIM, J. et al. A seca atual no Semiárido nordestino – Impactos sobre os recursos hídricos. **Parcerias Estratégicas**, v. 22, n. 44, p. 277–300, 2017.
- GUO, H. et al. Spatial and temporal characteristics of droughts in Central Asia during 1966–2015. **Science of the Total Environment**, v. 624, 2018.
- HASHEMI, M. S.; BARANI, G. A.; EBRAHIMI, H. Optimization of Reservoir Operation by Genetic Algorithm Considering Inflow Probabilities (Case Study: The Jiroft Dam Reservoir). **Journal of Applied Sciences**, p. 2173–2177, 2008.
- HOSSAIN, M. S.; EL-SHAFIE, A. Optimal operation of Klang gate dam using genetic algorithm. **Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering)**, v. 65, n. 2, p. 37–40, 2013.
- INMET, I. N. DE M. **Previsão Sazonal do INMET**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/prev_estocastica>. Acesso em: 20 set. 2019a.
- INMET, I. N. DE M. **Faixa Normal da Precipitação Trimestral**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/faixaNormalPrecipitacaoTrimestral2>>. Acesso em: 20 set. 2019b.
- INMET, I. N. DE M. **Boletins de Prognóstico Climático**. Disponível em: <[http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/prognostico ClimaticoTrimestral](http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/prognostico_ClimaticoTrimestral)>. Acesso em: 26 jun. 2020.
- KOCH, H. et al. Reservoir operation and environmental water demand: Scenarios for the Sub-Middle and Lower São Francisco River basin, Brazil. **Ecohydrology**, v. 11, n. 8, p. 1–12, 2018.
- KRAU, S. et al. A daily hydrological system management model that takes meteorological forecast errors into account. In: **WIT Transactions on Ecology and the Environment**. [s.l.: s.n.]. v. 99p. 577–586.
- LUCIO, P. S. et al. Um modelo estocástico combinado de previsão sazonal para a precipitação no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 70–87, 2010.
- MARENGO, J. A. et al. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 1973–1985, 2018.
- MICHALEWICZ, Z. **Genetic algorithms + data structures = evolution programs Artificial Intelligence in Medicine**, 1992.
- MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. A review of drought concepts. **Journal of Hydrology**, v. 391, n. 1–2, p. 202–216, 2010.
- NOHARA, D.; HORI, T. Reservoir operation for water supply considering operational

- ensemble hydrological predictions. **Journal of Disaster Research**, v. 13, n. 4, p. 650–659, 2018.
- NOHARA, D.; HORI, T.; SATO, Y. Real-Time Reservoir Operation for Drought Management Considering Operational Ensemble Predictions of Precipitation in Japan. p. 331–345, 2018.
- OLUKANNI, D. O. et al. Optimization-based reliability of a multipurpose reservoir by Genetic Algorithms: Jebba Hydropower Dam, Nigeria. **Cogent Engineering**, v. 5, n. 1, p. 1–30, 2018.
- PALLOTTINO, S.; SECHI, G. M.; ZUDDAS, P. A DSS for water resources management under uncertainty by scenario analysis. **Environmental Modelling and Software**, v. 20, n. 8, p. 1031–1042, 2005.
- PENG, A. et al. The application of ensemble precipitation forecasts to reservoir operation. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 19, n. 2, p. 588–595, 2019.
- R CORE TEAM, 2018. **R: A language and environment for statistical computing**. **R Foundation for Statistical Computing** R Foundation for Statistical Computing Vienna, Austria, 2018.
- RAGAB, R.; PRUDHOMME, C. Climate change and water resources management in arid and semi-arid regions: Prospective and challenges for the 21st century. **Biosystems Engineering**, v. 81, n. 1, p. 3–34, 2002.
- RAMOS, M. H. et al. Communicating uncertainty in hydro-meteorological forecasts: Mission impossible? **Meteorological Applications**, v. 17, p. 223–235, 2010.
- REBOUÇAS, A. DA C. Água na região Nordeste: desperdício e escassez. **Estudos Avançados**, v. 11, n. 29, p. 127–154, 1997.
- RITTIMA, A. Hedging policy for reservoir system operation: A case study of mun bon and lam chae reservoirs. **Kasetsart Journal - Natural Science**, v. 43, n. 4, p. 833–842, out. 2009.
- SCRUCCA, L. GA : A Package for Genetic Algorithms in R. v. 53, n. 4, 2013.
- SEMARH, S. DO M. A. E DOS R. H. **Ficha técnica do Reservatório Cruzeta**. Disponível em:
<<http://sistemas.searh.mn.gov.br/MonitoramentoVolumetrico/Monitoramento/FichaTecnica?idReservatorio=1070>>. Acesso em: 20 set. 2019.
- TRAMBAUER, P. et al. A review of continental scale hydrological models and their suitability for drought forecasting in (sub-Saharan) Africa. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 66, p. 16–26, 2013.
- TU, M.-Y.; HSU, N.-S.; YEH, W. W.-G. Optimization of Reservoir Management and Operation with Hedging Rules. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 129, n. 2, p. 86–97, mar. 2003.

WAFAB, E. H. et al. **Genetic Algorithm applied to reservoir operation optimization with emphasis on the Moroccan context**. 3^a Conferência Internacional sobre Gestão de Operações Logísticas (GOL). **Anais...**Fez, Marrocos: 2016

YAO, H.; GEORGAKAKOS, A. Assessment of folsom lake response to historical and potential future climate scenarios 2. Reservoir management. **Journal of Hydrology**, v. 249, n. 1–4, p. 176–196, 2001.