



XVI SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE
15º SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES
DE LÍNGUA PORTUGUESA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE RESERVATÓRIOS DO SEMIÁRIDO
BRASILEIRO COM USO DE REGRAS DE OPERAÇÃO**

Luiz Felipe de Araújo Figueirêdo¹; Adelena Gonçalves Maia² & Jonathan Mota da Silva³

RESUMO – O objetivo deste trabalho foi avaliar o uso de regras de operação em onze reservatórios da bacia hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu, entre os estados da PB e do RN, através de um modelo de simulação-otimização. Nestes reservatórios foram definidos níveis de volume de água, a partir dos quais estes teriam a necessidade de estabelecer o racionamento no atendimento às demandas, bem como a severidade deste racionamento. O modelo é baseado no balanço hídrico do reservatório e na aplicação da otimização, via algoritmo genético, da eficiência do atendimento das demandas prioritárias pelos os reservatórios. O atendimento foi avaliado a partir de um índice de eficiência que foi levantado para as demandas prioritárias e não-prioritárias. Os resultados indicaram que as regras de operação obtidas são bastante distintas e que os reservatórios não são capazes de atender suas demandas satisfatoriamente. Quando o reservatório é operando de forma padrão as demandas prioritária e não-prioritária são atendidas com eficiência similar, mas ao aplicar a regra de operação ocorre um melhor atendimento da demanda prioritária, em detrimento à demanda não-prioritário. As variações das eficiências das demandas são diferentes para cada reservatório, em função das suas características físicas e hidrológicas.

ABSTRACT– This research aimed to define operating rules for eleven reservoirs in the Piancó-Piranhas-Açu River basin (PB and RN) through a simulation-optimization model, by which the levels were established for demands rationing application, as well as the severity of the rationing. The model was based on reservoir water budget and an optimization model, via genetic algorithm, of an objective function based on the efficiency of meeting the priority demands. The efficiency index was raised for priority and non-priority demands. The results indicated that the operating rules obtained are quite different and that the reservoirs are not able to satisfactorily meet their

¹) Dept. de Engenharia Civil e Ambiental - UFRN, Lagoa Nova, Natal, RN 59078-970, tel: (84) 3215-3723, e-mail: luizfgrdo@gmail.com

²) Dept. de Engenharia Civil e Ambiental - UFRN, Lagoa Nova, Natal, RN 59078-970, tel: (84) 3215-3723, e-mail: adelenam@gmail.com

³) Dept. de Ciências Atmosféricas e Climáticas - UFRN, Lagoa Nova, Natal, RN 59078-970, tel: (84) 99193-6403, e-mail: jonathan.mota@ufrn.br

demands. When the reservoir is operating in a standard way, priority and non-priority demands are met with similar efficiency, but when applying the operating rule, priority demand is better met, to the detriment of non-priority demand. The variations in demand efficiencies are different for each reservoir, depending on their physical and hydrological features.

Palavras-Chave – otimização; demanda prioritária.

1 – INTRODUÇÃO

A região semiárida brasileira apresenta uma baixa disponibilidade hídrica natural, decorrentes da concentração das precipitações em poucos meses, elevada evapotranspiração e baixa capacidade de acumulação de água subterrânea no substrato cristalino. Além disso, ainda vivencia secas recorrentes que reduz ainda mais esta disponibilidade nestes períodos. Esta baixa disponibilidade não necessariamente acarreta ao baixo atendimento das demandas dos diversos usos de água existente na região. No entanto, quando este fator está associado à uma elevada e crescente demanda, cria-se um quadro de déficit hídrico, vivenciado nos períodos de estiagem e agravado nos períodos de seca. Esta condição se apresenta em boa parte do semiárido brasileiro, incluindo a porção potiguar.

Neste sentido, ações para o aumento da disponibilidade hídrica foram implementadas na região, com o destaque à construção de barragens para o acúmulo de água nos reservatórios (açudes). Estes açudes estão em operação há décadas, e o entendimento do seu comportamento para o atendimento das suas demandas, frente às suas características morfológicas e hidrológicas, é crucial para a operação dos mesmos

A presente pesquisa foi desenvolvida na bacia do rio Piancó-Piranhas-Açu, que abrange os estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. Foram estudados 11 reservatórios, muitos deles com déficit de atendimento das demandas, o que se agrava durante os períodos de seca. Este trabalho tem como foco aumentar a disponibilidade hídrica através da gestão dos reservatórios. Sendo assim, esta pesquisa se propôs a estudar o impacto casado pela utilização de regras de operação na liberação de água pelos reservatórios, para o atendimento das demandas. Adotando uma abordagem em que os usos sejam divididos em prioritários e não-prioritários, e o referido impacto seja analisado considerando o atendimento destas duas demandas.

2– METODOLOGIA

2.1 Otimização e regras de operação

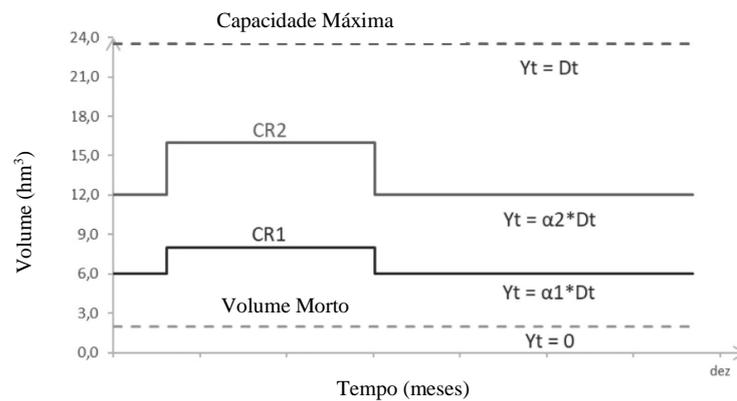
Para a simulação da operação dos reservatórios, foi realizado o balanço hídrico (equação 1) dos mesmos, com intervalos mensais.

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - Y_t - E_t - V_t \quad (1)$$

Em que S_{t+1} é o volume armazenado de água no fim do mês “t”; S_t é o volume armazenado de água no início do mês “t”; Q_t , Y_t , E_t e V_t são, para o mês “t”, a vazão afluyente, a vazão efluente para atendimento da demanda, a evaporação e o volume vertido de água, respectivamente.

As simulações foram realizadas adotando a Regra de Operação Padrão (ROP) e a Regra de Operação com Otimização (ROO). Na ROP, o volume de água liberado (Y_t) é igual à demanda (D) sempre que houver água no reservatório. Na ROO é definida uma regra de operação, onde a depender do volume de água do reservatório no início do mês, pode-se aplicar uma regra de racionamento e apenas ser liberado um percentual da demanda para o atendimento dos diversos usos múltiplos do reservatório.

Para a aplicação da ROO, o ano será dividido em dois semestres em concordância com a realidade climática da região de estudo considerada, a qual possui um período úmido entre janeiro e junho e um seco entre julho e dezembro. A figura 1 apresenta a curva inferior (Volume Morto), que define o nível abaixo do qual não será disponibilizada água pra atender a demanda; a curva crítica 1 (Critical Rule Curve 1 - **CR1**) e a curva crítica 2 (Critical Rule Curve 2 - **CR2**), definem os níveis de aplicação dos fatores de racionamento, α_1 e α_2 , responsáveis por limitarem o atendimento da demanda D_t ; e a curva superior (Capacidade Máxima do Reservatório) que é igual ao volume máximo acima do qual haverá vertimento de água. Desse modo, só haverá disponibilização plena da demanda de água quando o volume estiver acima de **CR2** e, além disso, por serem períodos com dinâmicas hídricas diferentes, haverá uma diferença de posicionamento das curvas críticas entre os intervalos de tempo seco e úmido.



Fonte: GOMES et al. (2021)

Figura 1. Regra de racionamento aplicada

2.2 Aplicação de algoritmos genéticos para determinação dos índices de racionamento

Para a aplicação da ROO, é necessária a definição de seis fatores: as curvas críticas para o período seco (“s”) e para o período úmido (“u”) - ($CR1_s$, $CR1_u$, $CR2_s$ e $CR2_u$) - e os fatores de racionamento (α_1 e α_2). Com o objetivo de encontrar a combinação de fatores que resulte em uma racionalização que maximize o atendimento das demandas, isto é, $\sum(Y_t)$, foi usado um programa de simulação do balanço hídrico do reservatório, com otimização via algoritmo genético (GA). Tal metodologia foi usada por CHANG et al. (2010) para encontrar uma estratégia otimizada nas tomadas de decisão na operação de reservatórios, tornando os requisitos ecológicos de fluxo de base como restrições da liberação de água para atendimento da demanda.

Na montagem do programa, foi usado um pacote de GA desenvolvido por SCRULLA (2013) no software R (R CORE TEAM, 2018). Foi considerada uma população inicial de 100 indivíduos para todas as simulações, formados por conjuntos das seis incógnitas do problema. A partir disso, foi feita a otimização dos parâmetros através da função objetivo da equação 2. Vale salientar que a função objetivo foi calculada usando como base apenas o atendimento da demanda prioritária do sistema (demandas para abastecimento humano e dessedentação animal).

$$fitness = \frac{\sum_{t=1}^n Y_{pri,t}}{\sum_{t=1}^n D_{P,t}} - penalty1 - c \cdot penalty2 \quad (2)$$

$$penalty1 = \max(g, 0) \quad (3)$$

$$penalty2 = \max((\alpha_1 - \alpha_2), 0) \quad (4)$$

Onde g é o vetor que representa a diferença entre $CR1$ e $CR2$ para cada mês e c é um multiplicador para correção de ordem de grandeza entre os valores de α e CR , fixado em 10^6 .

As equações de penalty (CHANG et al. 2010, ALLAWI et al. 2019) são aplicadas pelo fato de o algoritmo genético não necessariamente atender às condições estabelecidas pelas seguintes equações, as quais são necessárias para a correta aplicação da metodologia:

$$1 \geq \alpha_2 \geq \alpha_1 \geq 0 \quad (5)$$

$$\text{Capacidade Máxima} \geq CR2_t \geq CR1_t \geq \text{Volume Morto} \quad (6)$$

Como consequência, tais condicionantes penalizam soluções inviáveis por meio da redução da sua fitness de forma proporcional à magnitude da violação, dificultando a passagem de material genético de conjuntos que não atendam ao padrão estabelecido.

Ao todo, foi usada uma quantidade de 150 gerações, com uma taxa de mutação de 0,05 e uma taxa de crossover de 0,8 para cada um dos reservatórios. Os dados de volumes máximos, volumes mínimos, cotas área-volume, vazões de entrada mensais, precipitações médias mensais e evaporações médias mensais foram encontrados em ANA (2017). Os dados de demanda, por sua vez, foram extraídos de ANA (2016).

Para avaliar a performance das simulações com ROP e ROO, foi considerado o índice de eficiência. A eficiência, como apresentado por JAIN & BHUNYA (2008), é calculada dividindo-se o volume total efluente liberado para demanda (Y_t) pelo volume total necessário de atendimento (D_t), onde N é o total de meses:

$$\text{Eficiência} = \frac{\sum_{t=1}^n Y_t}{\sum_{t=1}^n D_t} \quad (7)$$

A *Eficiência* é máxima quando for igual a 1. O cálculo do índice foi feito para os três tipos de demanda, sendo demanda total (D), demanda prioritária (D) e demanda não prioritária (D_{npri}), de modo que:

$$D = D_{pri} + D_{npri} \quad (8)$$

Com isso, pôde-se ter uma visão melhor do quanto a aplicação da regra de operação impactaria no atendimento das demandas prioritárias e não prioritárias.

Para fazer uma análise comparativa, foram calculadas as eficiências para as simulações ROP e a ROO, para que fosse possível ver os benefícios e os prejuízos do racionamento.

3– RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na figura 2 são apresentados os resultados dos níveis críticos (CR's) encontrados para as regras de operação obtidas, estes valores estão apresentados em percentual com relação ao volume

máximo do reservatório. A figura 3 apresenta os resultados os fatores de racionamento (α_1 e α_2) obtidos das regras de operação.

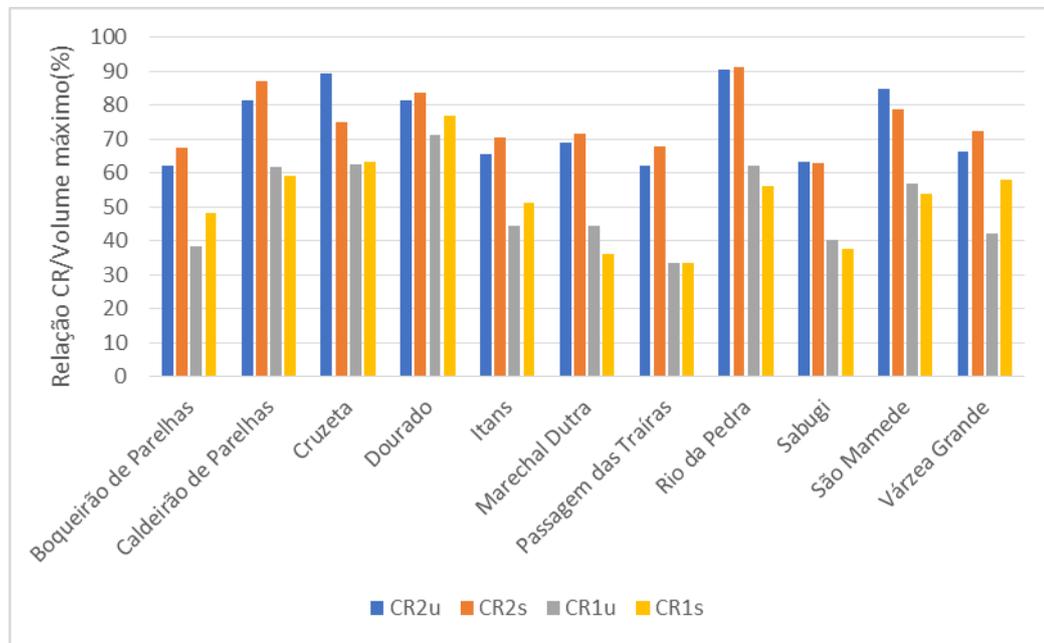


Figura 2. Razão percentual entre o nível crítico (CR) médio anual e volume máximo para 11 reservatórios para os períodos secos (s) de jan-jun e úmidos (u) de jul-dez na bacia do Piancó-Piranhas-Açu.

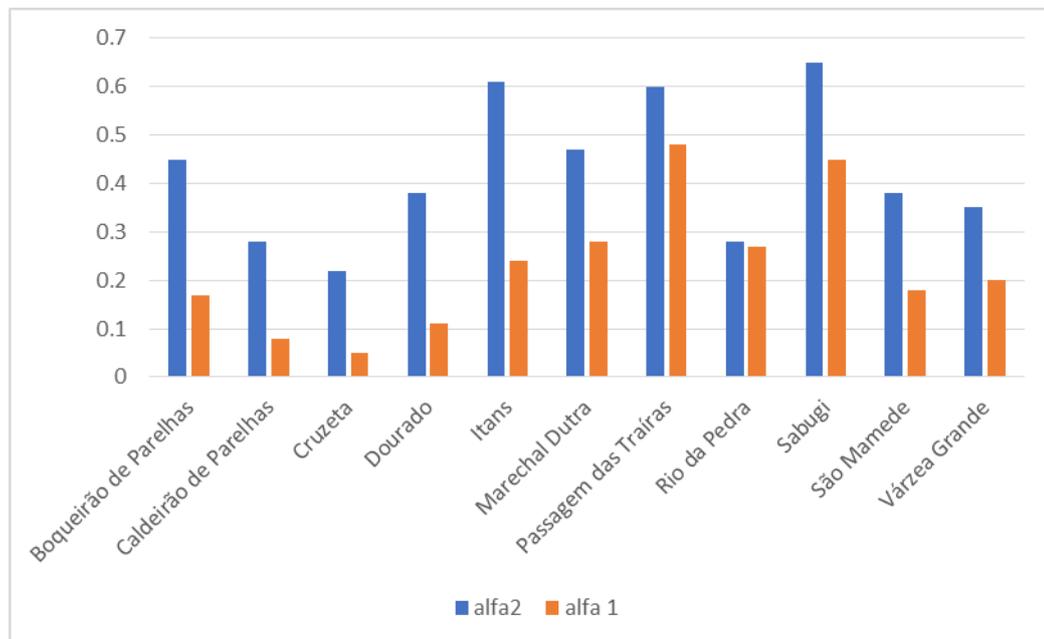
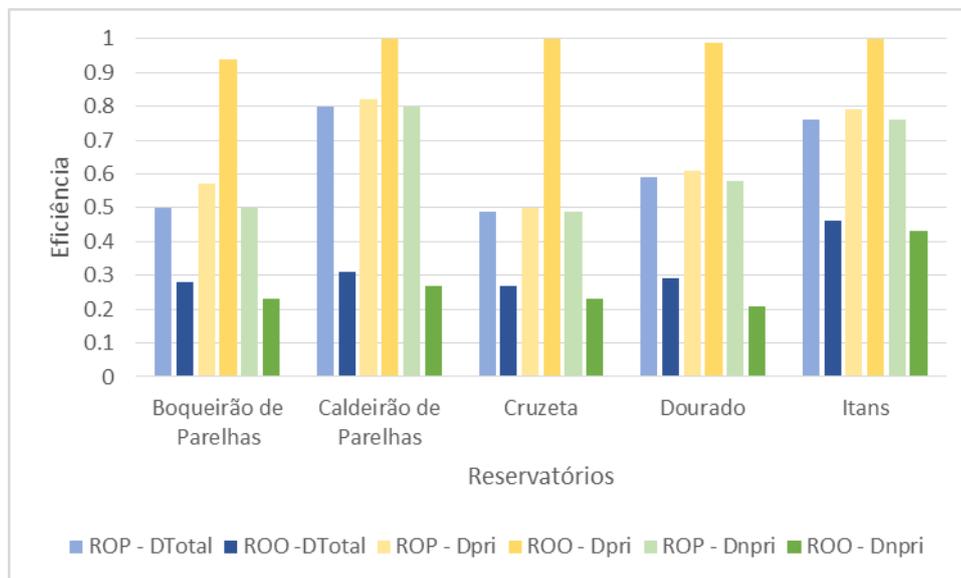


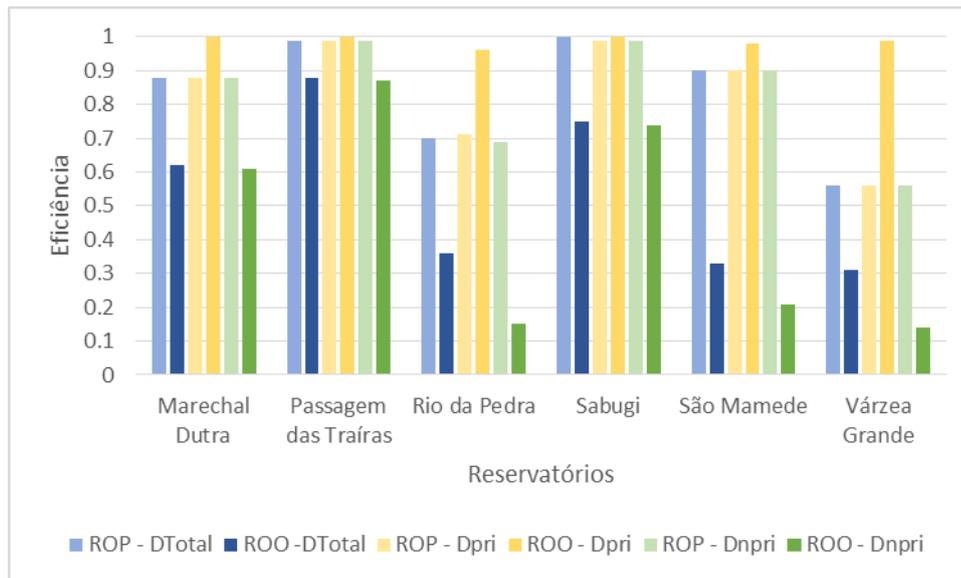
Figura 3. Fatores de racionamento (α_1 e α_2) obtidos das regras de operação

Os resultados não são homogêneos. O reservatório Rio da Pedra, por exemplo, deve iniciar seu racionamento quando atingir níveis de cerca de 90% do volume máximo, enquanto que para outros reservatórios este racionamento só se inicia para níveis inferiores a 65% do seu volume máximo. No entanto, a severidade do racionamento não é indicada apenas em função do nível em que o mesmo é iniciado, mas principalmente em função dos valores de alfa, pois um valor reduzido desta variável indica uma menor liberação de água para o atendimento das demandas, impondo assim um racionamento mais severo. Alguns reservatórios como Cruzeta, por exemplo, apresentam alfas reduzidos, o que indica um racionamento mais severo. O reservatório Rio Pedra também tem estes valores reduzidos, apontando que, além do racionamento se iniciar em níveis elevados, já inicia de forma mais severa.

A seguir é apresentada a figura 4 com a síntese dos resultados da eficiência, com a aplicação das diferentes regras (regra de operação padrão, ROP, e regra de operação com otimização, ROO), para a demanda total e as demandas prioritária, D_{pri} , e não prioritária, D_{npri} .



(a)



(b)

Figura 4. Resultados das eficiências para as diferentes simulações realizadas (ROP e ROO) e considerando as diferentes demandas (D_{total} , D_{pri} e D_{npri})

Pode-se observar que, de uma forma geral, todos os reservatórios, com exceção de Sabugi apresentam eficiência da demanda total abaixo de 90%, sendo este o limite mínimo esperado para a eficiência dos reservatórios, indicando assim que os mesmos não são capazes de atender suas demandas satisfatoriamente. Quando os reservatórios foram operados de forma padrão (ROP) para atender todas às demandas, estes apresentaram uma maior Eficiência do que aqueles quando foram operados de através de operações (ROO). Contudo, na forma padrão (ROP), as demandas prioritária e não-prioritárias são atendidas com eficiência similar, o que não é o indicado, visto que uma deve ter prioridade em relação a outra. Ou seja, ao aplicar a regra de operação (ROO), o reservatório é conduzido a atender a demanda prioritária, em detrimento da demanda não-prioritária. Na maioria das vezes, para que haja um pequeno aumento da eficiência da demanda prioritária, é forçada uma redução significativa da eficiência da demanda não-prioritária. Com destaque para o reservatório São Mamede, que para aumentar a eficiência da D_{pri} em cerca de 9% foi preciso uma redução da eficiência da D_{npri} de mais de 70%. Estes aumentos e reduções foram diferentes para cada reservatório. O próximo passo de pesquisa será estudar quais características físicas e hidrológicas dos reservatórios interferem nestes resultados e também nos resultados das regras de operação estabelecidas.

4- CONCLUSÕES

Esta pesquisa estudou reservatórios do semiárido brasileiro a fim de levantar informações a respeito da diferença entre operá-los de forma padrão (ROP) ou através de regras de operação otimizadas (ROO), considerando as demandas prioritárias e não-prioritárias.

Os reservatórios, de uma forma geral, não atendem adequadamente suas demandas, apresentando baixos índices de eficiência. As regras de operação propostas em alguns casos são mais severas, uma vez que indicam o racionamento quando os volumes de água ainda são elevados e impõem uma maior redução no atendimento das demandas.

A aplicação da regra de operação viabilizou um aumento do atendimento das demandas prioritárias em detrimento do atendimento das demandas não-prioritárias. E função da grande variabilidade dos resultados considera-se que a próxima etapa da pesquisa é estudar quais características físicas e hidrológicas dos reservatórios mais interferem nas eficiências e nas regras de operação estabelecidas.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Pesquisa CNPq (proc. 438271/2018-1).

REFERÊNCIAS

- ALLAWI, M.F.; JAAFAR, O.; HAMZAH, F.M.; EL-SHAFIE, A. (2019). “*Novel reservoir system simulation procedure for gap minimization between water supply and demand*”. Journal of Cleaner Production, v. 206.
- ANA (Agência Nacional de Águas). (2016). “*Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio piacó-piranhas-açu—Resumo executivo*”. Brasília, Brazil: ANA.
- ANA (Agência Nacional de Águas). (2017). “*Reservatórios do semiárido brasileiro: Hidrologia, balanço hídrico e operação: Relatório síntese*”. Brasília, Brazil: ANA.
- CHANG, L.; CHANG, F.; WANG, K.; DAI, S. (2010). “*Constrained genetic algorithms for optimizing multi-use reservoir operation*”. Journal of Hydrology, 390, 66-74.
- GOMES, L. S.; MAIA, A. G.; DE MEDEIROS, J.D.F. (2021). “*Fuzzifield hedging rules for a reservoir in the Brazilian semiarid region*”. Environmental Challenges, 4.
- JAIN, S.K.; BHUNYA, P.K. (2008). “*Reliability, resilience and vulnerability of a multipurpose storage reservoir*”. Hydrological Science, 53 (2).
- 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/>.
- SCRUCCA, L. (2013). “*GA: A Package for Genetic Algorithms in R*”. Journal of Statistical Software, 53(4), 1-37. URL <http://www.jstatsoft.org/v53/i04/>.