

USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA OTIMIZAÇÃO DE UMA REGRA DE OPERAÇÃO PARA O RESERVATÓRIO DE ENGENHEIRO ÁVIDOS

José Benito de Andrade Vieira¹
João Maria de Andrade²
Ulisses Alencar Bezerra³

RESUMO

Os reservatórios de água superficiais são as principais e, em alguns locais, a única fonte hídrica do semiárido nordestino. Estes foram amplamente construídos a partir do século passado para diminuir a vulnerabilidade desta região à seca e à estiagem, entretanto, sem um gerenciamento adequado, estes mananciais entram em colapso e deixam de cumprir o seu papel. Portanto, para tornar a gestão destes recursos mais eficaz e eficiente, este trabalho teve como objetivo obter uma regra de operação otimizada para o reservatório de Engenheiro Ávidos, localizado no município de Cajazeiras - Paraíba, baseada em níveis de alerta e coeficientes de racionamento. Para isso foi utilizado um método de otimização pertencente ao grupo das inteligências artificiais conhecido como algoritmo genético. A regra de operação obtida foi a seguinte: se o volume do reservatório atingir volumes menores do que 54.4 e 43.3 milhões de metros cúbicos, a retirada de água deste deve ser reduzida para 0.25 e 0.1% do seu valor total, respectivamente.

Palavras-chave: Programação não linear, Níveis de alerta, Semiárido.

¹Graduado pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, josebenitoeng@gmail.com;

² Graduado pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, andradejmn@gmail.com;

³ Doutorando em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) – Campina Grande (PB), Brasil. Fone: +55 83 3332-0243 E-mail: ulisses.alencar17@gmail.com;

INTRODUÇÃO

Ao longo de toda sua história, o semiárido nordestino sofreu com os fenômenos da seca e da estiagem. Isto já causou e ainda causa diversos impactos de ordem socioambientais para a população, como perdas e danos humanos, materiais, econômicos e ambientais (ZANELLA, 2014). Este tipo de problema é algo que a sociedade é incapaz de lidar usando somente meios próprios, o que demanda uma intervenção por parte do Estado (UNISDR *et al.*, 2009).

Apesar de todas as medidas adotadas pelo Estado, segundo Moura *et al.* (2016), a Paraíba é um dos estados que mais reconheceu desastres climáticos (estiagem e seca) em todo o território nacional entre os anos de 2003 a 2015. Isto é um enorme problema, visto que a economia local é baseada, em grande parte, na agricultura e na pecuária (MOREIRA, TARGINO e LIMA, 2002).

Para tornar a gestão dos recursos hídricos mais eficiente, e com isso mitigar os efeitos da seca e da estiagem, várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas nas últimas décadas. Entre elas destaca-se aquelas que tem como objetivo criar e/ou adaptar modelos para otimizar a operação dos reservatórios de água superficial, que são a principal fonte de água da região (ALAYA *et al.*, 2003; BARROS *et al.*, 2003; CHANG, LAI e KAO, 2003; CONSOLI, MATARAZZO e PAPPALARDO, 2008).

Segundo Hossain e El-shafie (2013), modelos de otimização de reservatórios podem ser divididos em duas categorias: estocásticos implícitos e estocásticos explícitos. Os métodos implícitos são determinísticos e se apoiam em séries históricas, enquanto os métodos explícitos usam vazões probabilísticas e parâmetros incertos. Ambos métodos são amplamente empregados neste campo de pesquisa e há um grande discurso sobre qual método é superior.

Estes modelos têm que lidar com diversos tipos de dificuldades, como: incertezas climáticas, comportamento não-linear, usos conflitantes, complexidades, descontinuidades (períodos secos intercalados com chuvosos) e mudanças climáticas (Hossain e El-shafie 2013).

A inteligência artificial, assim como os métodos estocásticos explícitos, são metodologias amplamente utilizadas para a simulação da operação de reservatórios, devido a sua grande capacidade de lidar com incertezas e complexidades envolvidas no processo, operações que os métodos implícitos não conseguem realizar de maneira satisfatória (AHMED e SARMA, 2005; CHANG, CHEN e CHANG, 2005; FALLAH-MEHDIPOUR, BOZORG e MARIÑO, 2013; TSAI *et al.*, 2015).

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo obter uma regra de operação otimizada para o reservatório de Engenheiro Ávidos, localizado no município de Cajazeiras - Paraíba, baseada em níveis de alerta e coeficientes de racionamento. Para isso foi utilizado um

método de otimização pertencente ao grupo das inteligências artificiais conhecido como algoritmo genético.

METODOLOGIA

Área de Estudo

A área de estudo deste trabalho é o reservatório de Engenheiro Ávidos, localizado no município de Cajazeiras no estado da Paraíba. Este reservatório se encontra dentro da bacia hidrográfica do rio Piancó - Piranhas - Açu e é usado para a irrigação de 5.000 ha de plantações a jusante da barragem, controle de cheias do rio Piranhas, piscicultura e abastecimento da cidade de Cajazeiras (DNOCS, 2018).

A bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu é a maior da Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental, com área total de 43.683 km². Seu território se divide entre os estados da Paraíba (60%) e do Rio Grande do Norte (40%). Inserida completamente dentro de território de clima semiárido, a bacia é caracterizada por apresentar precipitações concentradas em alguns meses do ano, que variam fortemente de um ano para o outro, alternando entre anos de pluviosidade acima da média e secas prolongadas (ANA, 2016).

Dados

Todos os dados utilizados durante a realização desta pesquisa foram obtidos do plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piancó – Piranhas – Açu (ANA, 2016).

Os dados coletados foram:

- Série histórica de precipitação e vazão afluente: As séries utilizadas têm 41 anos de duração (1969 – 2009), onde os 30 primeiros anos foram usados para a determinação da regra de operação, enquanto os últimos 11 foram usados para a validação do resultado encontrado;
- Curva cota x área x volume do reservatório;
- Dados de evaporação média mensal: Foi adotado que a evaporação de um mesmo mês não varia de um ano para o outro;
- Volume máximo e morto do reservatório;
- Demanda total do reservatório: Considerando demandas para abastecimento humano, dessedentação animal, irrigação e industrial (Tabela 1).

Tabela 1: Demandas para o atendimento dos múltiplos usos da água do reservatório de Engenheiro Ávidos.

Uso	Abastecimento humano	Irrigação	Dessedentação animal	Industrial	Total
Demanda (m ³ /s)	0,179	2,783	0,035	0,042	3,039

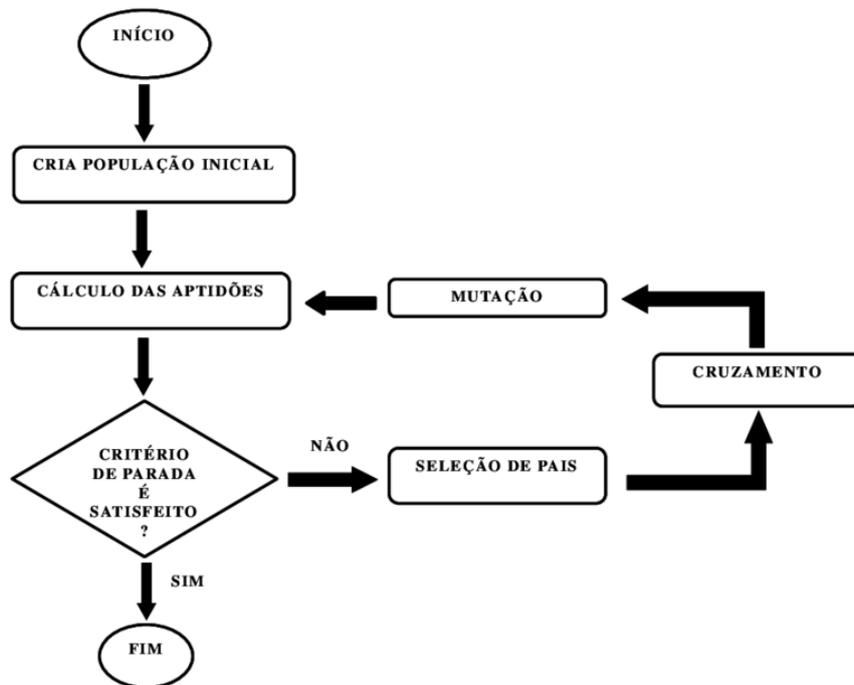
Algoritmo Genético

Algoritmos evolutivos são métodos de otimização e busca inspirados no princípio da seleção natural e sobrevivência do mais apto, proposto por Darwin em 1860 no seu livro “*A Origem das Espécies*”. Este algoritmo foi criado por Holland (1975), e foi popularizado por um dos seus alunos, Goldberg (1989), mais de 10 anos depois.

O funcionamento do algoritmo, ilustrado na Figura 1, consiste nos seguintes passos:

1. Criação da população inicial: Geração de um conjunto de soluções aleatórias para o problema;
2. Cálculo das aptidões: Determinar quão bem cada solução resolve o problema com base em uma ou mais funções objetivo;
3. Seleção de pais: Se o critério de parada não for satisfeito, as melhores soluções são selecionadas e encaminhadas para o mecanismo de reprodução;
4. Cruzamento: As melhores soluções são cruzadas para produzir um novo conjunto de soluções;
5. Mutação: Uma pequena porcentagem das soluções produzidas sofre mutações (que pode ser a mudança de algum valor específico ou da solução como um todo);
6. Critério de parada: Esse processo continua até que as soluções converjam para uma única resposta ou que algum dos critérios de parada sejam satisfeitos.

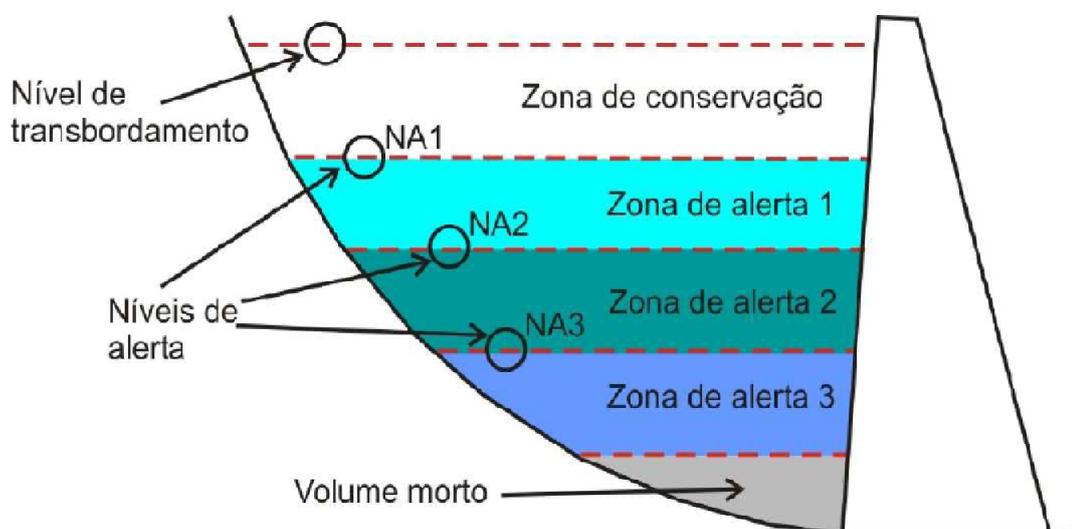
Figura 1: Algoritmo genético



Representação matemática da regra de operação do reservatório

A representação matemática do problema é feita através de uma matriz com duas linhas e três colunas. A primeira linha armazena três valores de volume que podem variar entre o volume morto e o volume máximo do reservatório. Estes são chamados níveis de alerta (Figura 2), onde, toda vez que o reservatório alcançar um destes níveis, alguma medida definida previamente deve ser tomada.

Figura 2: Níveis de alerta de um reservatório



Fonte: (OLIVEIRA e GALVÃO, 2004)

A segunda linha da matriz é composta por três coeficientes, que podem variar entre 0 e 1. Quando o reservatório está com volume máximo, a demanda (m^3/s) é retirada integralmente. A partir do momento que o volume abaixa e alcança o primeiro nível de alerta, a demanda retirada será calculada através da Equação 1

$$Q_r = k_{NAi} \cdot Q_d \quad (1)$$

Onde:

Q_r : Vazão retirada do reservatório para o atendimento das demandas;

k_{NAi} : Coeficiente da zona de alerta i;

Q_d : Vazão necessária para o atendimento integral das demandas

Desta forma, a matriz que representa as soluções tem a seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} V_{NA1} & V_{NA2} & V_{NA3} \\ k_{NA1} & k_{NA2} & k_{NA3} \end{bmatrix}$$

Onde:

V_{NAi} : Volume abaixo do qual o reservatório entre na zona de alerta i;

k_{NAi} : Coeficiente da zona de alerta i;

Dentro do algoritmo foram impostas as seguintes condições: $V_{NA1} > V_{NA2} > V_{NA3}$; $k_{NA1} > k_{NA2} > k_{NA3}$ e $k_{NA3} > 0.1$ (para que o racionamento não afete o abastecimento humano, uma vez que essa demanda é aproximadamente igual a 6% da demanda total).

Função objetivo e restrição

Para testar a aptidão de cada solução em ser uma regra de operação apropriada para o reservatório, cada uma delas foi usada para guiar a operação do reservatório durante um período de 30 anos.

A função objetivo utilizada pode ser vista na Equação 2

$$f = \sum_{i=1}^n \frac{Q_d - Q_{ri}}{Q_d} \quad (2)$$

Onde:

f : Valor de aptidão da solução (quanto menor, mais apta a solução é);

n : número de meses;

Q_{ri} : Vazão retirada do reservatório para o atendimento das demandas no mês i ;

Esta função tem o objetivo de minimizar o déficit hídrico, ou seja, o racionamento de água. Juntamente com ela, foi imposta uma restrição que considerava que qualquer solução que permitisse que o reservatório chegasse ao volume morto fosse considerada como inviável.

Desta forma, o algoritmo procura a solução (regra de operação), que libera o máximo possível de água para o atendimento às demandas ao mesmo tempo que não permita que o mesmo chegue ao colapso em momento algum.

População externa

A população externa é uma população intermediária onde as melhores soluções são armazenadas antes de serem encaminhadas para o mecanismo de reprodução. As soluções que não são encaminhadas para a população externa são imediatamente descartadas do processo de otimização e sempre tem um tamanho menor do que a população inicial.

O processo de preenchimento da população externa foi feito da seguinte forma: Primeiramente todos os indivíduos viáveis são transferidos para a população externa. Caso não seja totalmente preenchida pelas soluções viáveis, o restante das vagas é completado com os indivíduos inviáveis de melhor aptidão. Caso o número de indivíduos viáveis ultrapasse o tamanho da população externa, as soluções excedentes são excluídas em ordem decrescente de aptidão (menos apta para a mais apta).

Operadores de reprodução

Foram utilizados três operadores de reprodução: crossover média, mutação uniforme e mutação direcionada. Cada um tem uma probabilidade de ser executado e, caso essa probabilidade não fosse atendida, o filho simplesmente era considerado igual ao pai mais apto.

- **Crossover média:** A solução filha é igual a média aritmética dos dois pais;
- **Mutação uniforme:** O indivíduo é substituído por outro produzido de forma aleatória;
- **Mutação direcionada:** Só é feita em indivíduos inviáveis, pois seu propósito é acelerar a convergência do algoritmo. Ele aumenta os valores de volume da solução por um fator aleatório entre 0 e 100% e diminui os coeficientes por esse mesmo fator.

Parâmetros do algoritmo genético

População Inicial: 200 soluções;

População Externa: 100 soluções

Probabilidade de acontecer Crossover: 80%;

Probabilidade de acontecer Mutação Uniforme: 10%;

Probabilidade de acontecer Mutação Direcionada: 10%;

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A regra de operação obtida ao final do processo de otimização pode ser vista abaixo, onde os volumes estão em milhões de m³.

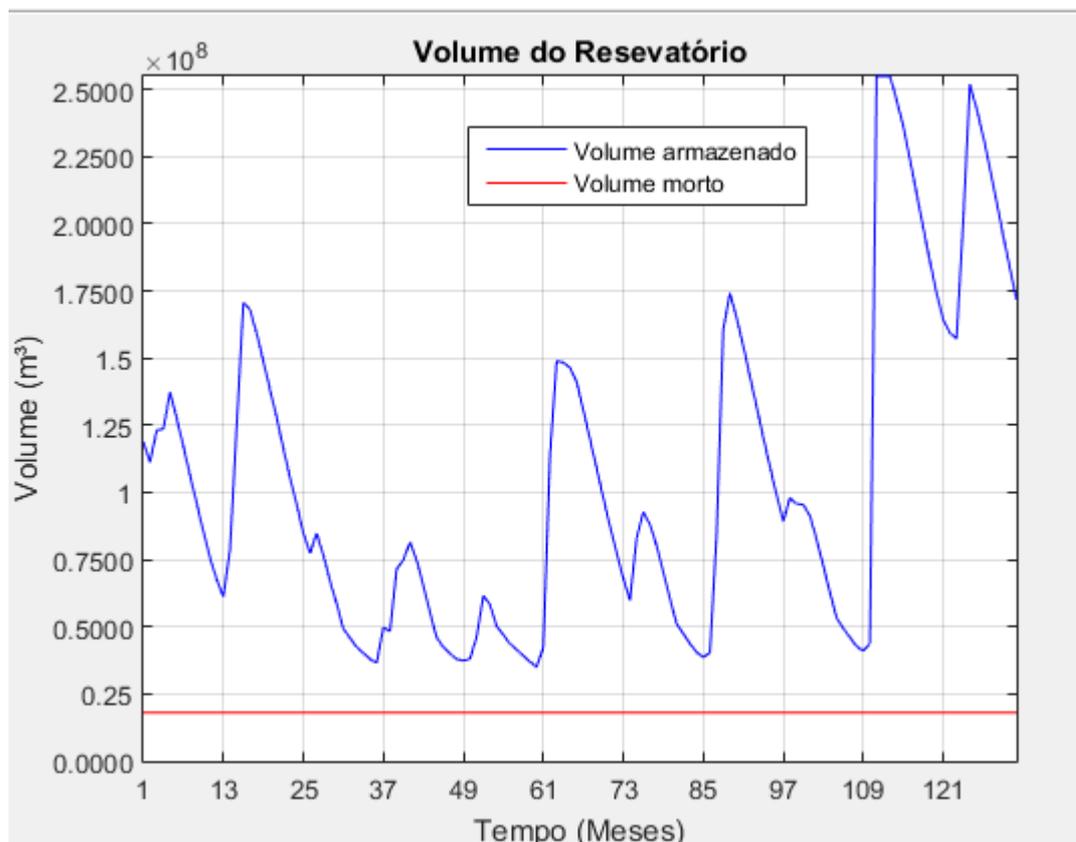
$$\begin{bmatrix} 76.8 & 54.4 & 43.3 \\ 1 & 0.25 & 0.1 \end{bmatrix}$$

A primeira conclusão que pode ser feita a partir deste resultado é que só são necessários dois níveis de alerta, e não três, como foi assumido inicialmente. Isso porque, mesmo o algoritmo tendo determinado um volume para o nível de alerta 1 (76.8 milhões de m³), o coeficiente atribuído para essa zona foi 1, ou seja, sem racionamento.

Os volumes dos níveis de alerta 2 e 3 (54.4 e 43.3 milhões de m³, respectivamente) tiveram valores bem parecidos, o que indica que uma regra de operação mais simples, só com uma zona de alerta (provavelmente alcançada após um volume intermediário entre 54.4 e 43.3) e que tivesse coeficiente igual a 0.1, não seria muito menos eficiente.

A fim de validar a eficácia desta regra de operação, foi realizada uma simulação do comportamento do reservatório durante 11 anos (1999 – 2009), onde foi utilizada para gerenciar o atendimento às demandas. Assumindo-se que o volume inicial do reservatório era metade do máximo, o volume armazenado durante o período de simulação é o mostrado na Figura 3.

Figura 3: Volume armazenado no reservatório durante o período de simulação



Como mostrado na Figura 3, o volume mínimo alcançado durante este período (35 milhões de m³) é maior que volume morto (18 milhões de m³), provando que a regra, assim como esperado, não permite que o reservatório entre em colapso em nenhum momento, ao mesmo tempo que tenta aproveitar o máximo possível do potencial do reservatório.

Com o valor de 10% da demanda total é possível atender a todas as demandas, exceto a da irrigação, comprovando que só necessário realizar racionamentos nesse uso para evitar o desabastecimento total. Assim, a implementação desse método pelos órgãos gestores vai de encontro com aquilo que é dito no art. 1º, inciso III da Lei Federal nº 9.433/1997, que prevê que o consumo humano e a dessedentação de animais detêm o uso prioritário em situações de escassez.

O resultado desta pesquisa vai de encontro ao de outras, que também utilizaram algoritmos genéticos para a otimização de regras de operação mensais para reservatórios. Há uma concordância geral de que os algoritmos genéticos são técnicas promissoras e competitivas, que podem ser efetivamente empregadas para esta finalidade. (AHMED e SARMA, 2005; SHIAU, 2009; JOTHIPRAKASH e SHANTHI, 2006)

CONCLUSÃO

O algoritmo genético se mostrou bastante eficiente na determinação de uma regra de operação para o reservatório de Engenheiro Ávidos, visto que não somente encontrou os volumes e coeficientes ótimos dos níveis de alerta, mas também o número ideal de zonas de alerta.

A utilização de uma regra de operação que não permita o colapso do reservatório é de extrema importância, principalmente para regiões do semiárido nordestino, que tem, na maioria dos casos, os reservatórios como única fonte de água nos períodos de estiagem. Se regras como estas fossem implementadas na prática, cenários de racionamento, como o que aconteceu devido à seca que teve início em 2012, teriam um final bem diferente.

Além da ocorrência periódica de períodos de seca (que é uma característica intrínseca do semiárido nordestino), o aumento das demandas de consumo e as mudanças climáticas tornam cada vez mais importante a implementação de métodos como estes, que têm o intuito de melhorar a eficiência da gestão dos recursos hídricos dos reservatórios.

REFERÊNCIAS

AHMED, J. A.; SARMA, A. K. Genetic algorithm for optimal operating policy of a multipurpose reservoir. **Water Resources Management**, v. 19, n. 2, p. 145–161, 2005.

ALAYA, A. B *et al.* Optimization of Nebhana reservoir water allocation by stochastic dynamic programming. **Water Resources Management**, v. 17, n. 4, p. 259–272, 2003.

ANA, Agência Nacional de Águas, **Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu**, Brasília, 2016.

BARROS, M. T. L. *et al.* Optimization of Large-Scale Hydropower System Operations. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 129, n. June, p. 11, 2003.

CHANG, F. J.; CHEN, L.; CHANG, L. C. Optimizing the reservoir operating rule curves by genetic algorithms. **Hydrological Processes**, 2005.

CHANG, F. J.; LAI, J. S.; KAO, L. S. Optimization of operation rule curves and flushing schedule in a reservoir. **Hydrological Processes**, v. 17, n. 8, p. 1623–1640, 2003.

CONSOLI, S.; MATARAZZO, B.; PAPPALARDO, N. Operating Rules of an Irrigation Purposes Reservoir Using Multi-Objective Optimization. **Water Resources Management**, v. 22, n. 5, p. 551–564, 23 maio 2008.

DNOCS, Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. **Açude Piranhas – Barragem Engenheiro Ávidos**. Disponível em:

<<http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/barragens/Barragem%20da%20Paraiba/piranhas.htm>>. Acessado em: 04 de maio de 2018.

FALLAH-MEHDIPOUR, E.; BOZORG H., O.; MARIÑO, M. A. Developing reservoir operational decision rule by genetic programming. **Journal of Hydroinformatics**, v. 15, n. 1, p. 103, 2013.

GOLDBERG, D. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. **Choice Reviews Online**, v. 27, n. 02, p. 27- 0936-27-0936, 1 out. 1989.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems : an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence**. Ann Arbor University of Michigan Press. 1975

HOSSAIN, M. S.; EL-SHAFIE, A. Intelligent Systems in Optimizing Reservoir Operation Policy: A Review. **Water Resources Management**, v. 27, n. 9, p. 3387–3407, 20 jul. 2013.

JOTHIPRAKASH, V.; SHANTHI, G. Single Reservoir Operating Policies Using Genetic Algorithm. **Water Resources Management**, v. 20, n. 6, p. 917–929, 25 out. 2006.

MOREIRA, E.; TARGINO, I.; LIMA, G. F. Estruturação do território municipal paraibano: na busca das origens. **Cadernos do Logepa**, v. 2, n. 1993, p. 81–93, 2002.

MOURA, M. O. *et al.* Desastres hidrometeorológicos na região Nordeste do Brasil: distribuição espaço-temporal dos reconhecimentos de Estado de Calamidade Pública. **Caderno de Geografia**, v. 26, n. 2, p. 259, 2016.

OLIVEIRA, K. F. de; GALVÃO, C. de O. **Planilha HIDRO (Operação dos reservatórios com base nos níveis de alerta) – Manual do usuário**. Versão 5. Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande. 2004.

SHIAU, J.-T. Optimization of Reservoir Hedging Rules Using Multiobjective Genetic Algorithm. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 135, n. 5, p. 355–363, set. 2009.

TSAI, W. P. *et al.* AI techniques for optimizing multi-objective reservoir operation upon human and riverine ecosystem demands. **Journal of Hydrology**, v. 530, p. 634–644, 2015.

UNISDR. **Terminology on disaster risk reduction**. International Strategy for Disaster Reduction (ISDR). 2009

ZANELLA, M. E. Considerações sobre o clima e os recursos hídricos do semiárido nordestino. **Caderno Prudentino de Geografia**, 2014.