

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ÁRVORE DE DECISÃO COMO EXTRAÇÃO DE REGRA DE ALGORÍTMOS DE REDE DE FLUXO NA OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

*Larissa Zaira Rafael Rolim¹; Francisco de Assis de Souza Filho²; João Dehon de Araújo Pontes
Filho¹ & Taís Maria Nunes Carvalho¹*

RESUMO – O atendimento das demandas de um reservatório ou hidrossistemas são dependentes das decisões dos tomadores de decisão ou operadores do reservatório. A crescente pressão sob os recursos hídricos decorrentes do aumento da demanda e das mudanças climáticas implica na necessidade de realizar simulações dos sistemas para uma tomada de decisão mais eficiente. A cidade de Caicó, localizada na porção semiárida do estado do Rio Grande do Norte, possui um complexo hidrossistema composto com vários reservatórios que podem ser utilizados para realizar o seu abastecimento. Este trabalho tem como objetivo extrair as regras de operação de tais reservatórios a partir de uma técnica de aprendizado em máquina denominada árvore de decisão. Essa técnica será aplicada aos resultados de uma simulação dos hidrossistemas realizada por meio de um *software* de rede de fluxo, *Acquanet*. Os resultados da simulação do hidrossistema apontam que, seguindo as regras de operação determinadas pelo *Acquanet*, o mesmo é capaz de atender à demanda da cidade com os dados simulados. Com a árvore de decisão, foi possível explicitar para cada reservatório as regras que explicitassem quem iria abastecer a cidade baseado nos volumes finais de cada mês em cada um dos reservatórios. A aplicação das árvores de decisão se mostrou uma maneira de fácil compreensão para demonstrar como os volumes dos reservatórios afetam o fornecimento de água a partir de cada um dos reservatórios. Com isso, os operadores dos sistemas poderão ter mais sensibilidade para entender a regra otimizada de operação de seus reservatórios e como eles funcionam em conjunto, formando um único hidrossistema.

ABSTRACT – The fulfillment of the demands of a reservoir or hydrosystems are dependent on the decisions of the decision makers or operators of the reservoir. The growing pressure on water resources due to increased demand and climate change implies the need to carry out simulations of the systems for an efficient decision making. The city of Caicó, located in the semi-arid portion of the state of Rio Grande do Norte, has a complex hydrosystem composed of several reservoirs that are may be used to supply water. This work aims to extract the operating rules of such reservoirs from a machine learning technique called decision tree. This technique will be applied to the results of a simulation of hydrosystems by means of *Acquanet* flow network software. The results of the simulation of the hydrosystem indicate that, following the rules of operation determined by *Acquanet*, it is able to meet the city's demand with simulated data. With the decision tree, it was possible to specify for each reservoir the rules that would explain who would supply the city based on the final volumes of each month in each reservoir. The application of decision trees proved to be an easy way to demonstrate how reservoir volumes affect the water supply from each reservoir.

¹) Doutorando em Eng. Civil – Recursos Hídricos (UFC): larissazairarr@gmail.com; dehonambiental@gmail.com; taismarianc@gmail.com.

²) Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Bloco 713 – assis@ufc.br

This will enable system operators to be more sensitive to understand the optimized operating rule of their reservoirs and how they work together to form a single hydrosystem.

Palavras-Chave – abastecimento de água, árvore de decisão, aprendizado em máquina.

1. INTRODUÇÃO

Os hidrossistemas situados na região Nordeste estão sob crescente pressão devido a problemas insustentáveis de abastecimento de água causados pelo crescimento populacional, degradação ambiental, falta de gestão, secas recorrentes e mudanças climáticas. Um dos grandes desafios dos tomadores de decisão é atender às crescentes demandas de água com recursos limitados. Desta forma, faz-se necessária a alocação consciente dos recursos hídricos, pois tais decisões são bastante conflituosas, especialmente em regiões de escassez hídrica.

À vista disto, busca-se uma gestão eficiente dos recursos para garantir seu uso adequado, especialmente, em regiões de reconhecida escassez hídrica e com ocorrência de secas recorrentes como a do semiárido brasileiro. A cidade de Caicó, localizada na porção semiárida do estado do Rio Grande do Norte, possui um hidrossistema, que neste estudo é definido como a composição de mais de um ou mais reservatórios que podem ser utilizados para fins de atendimento de uma mesma demanda, que pode realizar o seu abastecimento (Figura 1). Nesse sentido, a determinação de qual a melhor fonte de abastecimento em um determinado momento é uma tarefa complexa e que demanda a análise das diferentes fontes de maneira conjunta.

Atualmente, as regras de operação de reservatórios, como curvas guias, são definidas a partir de simulações dos sistemas de reservatórios com algoritmos de rede de fluxo, por exemplo. O problema dessas técnicas é a dificuldade de identificar e estabelecer os limiares em que o algoritmo encontra o estado ótimo em que determinado reservatório deve ser utilizado em detrimento de outro. Essa dificuldade pode levar os operadores dos sistemas a não depositarem total confiança nas simulações.

Em função desta dificuldade, outro tipo de metodologia que vem sendo utilizada baseia-se na mineração de dados e aprendizado de máquinas, conhecida como algoritmos de árvores de decisão. Dentre as maiores vantagens deste algoritmo está a capacidade de explicitar as regras de operação otimizadas, que antes seguiam como uma espécie de “caixa-preta” para os operadores. Diante dessa informação acessível, permite-se aos operadores dos sistemas obter sensibilidade quanto ao momento de transição entre a escolha das fontes de abastecimento (Bessler et al., 2003; Corani et al., 2009; Yang et al., 2016.).

Neste sentido, este trabalho tem como objetivo permitir o entendimento das regras de operação otimizadas de um hidrossistema complexo aplicando a técnica de árvore de decisão. Tais regras de operação serão provenientes dos resultados da simulação do hidrossistema realizada por meio de um algoritmo de rede de fluxo, *Acquanet*.

2. METODOLOGIA

O estudo está dividido em duas etapas: (i) primeiramente foi realizada a simulação das regras de operação por meio de algoritmo de rede de fluxo. Para isso, foram utilizados os dados de vazão afluente, demandas, evaporação e as curvas cota-área-volume (CAVs); (ii) em seguida, buscou-se explicitar a regra de operação ótima por meio do algoritmo de árvore de decisão utilizando os resultados da simulação gerados no item anterior.

Sistema de abastecimento da cidade de Caicó - RN

Como parte de um planejamento de uso eficiente dos recursos hídricos e estratégia de preparação para mitigação dos impactos das secas nessa região, o presente estudo busca entender a dinâmica de alocação de água para atendimento das demandas da cidade de Caicó a partir de três fontes hídricas: (i) o reservatório Itans, (ii) o hidrossistema Coremas/Mãe D'água e (iii) o reservatório Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves. A Figura 1 apresenta o hidrossistema, suas capacidades de armazenamento, a infraestrutura de captação e adução existente. Os dados foram obtidos junto a Agência Nacional de Águas (ANA) e confirmados por funcionários da Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN). O hidrossistema Coremas/Mãe D'água regulariza trecho do rio Piranhas (canto esquerdo da Figura 1) até a divisa do Estado da Paraíba com o Rio Grande do Norte. Essa regularização, por vezes, é utilizada para o abastecimento da cidade de Caicó. O açude Itans (canto esquerdo da Figura 1) possui como maiores usuários a cidade de Caicó e o seu Perímetro Irrigado. Diante da forte seca que assola a região desde 2012, uma nova fonte de abastecimento foi construída a partir da adutora Serra de Santana que realiza captação no Açude Armando Ribeiro Gonçalves (canto superior da Figura 1).

Figura 1 - Sistema de abastecimento - Caicó



Base de Dados

As séries de vazões afluentes utilizadas no desenvolvimento deste trabalho foram fornecidas pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). As vazões compõem uma série mensal para o período entre janeiro de 1961 e dezembro de 2017. As curvas cota-área-volume foram obtidas junto à Agência Nacional de Águas (ANA). Os dados de evaporação foram fornecidos pela FUNCEME.

As demandas do município de Caicó e do reservatório Itans foram retiradas da nota técnica fornecida pela Agência Nacional de Águas (ANA) e as demandas associadas aos reservatórios Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves e do Sistema Coremas/Mãe D'água foram obtidas no relatório dos 204 reservatórios (ANA, 2017).

Simulação no Software Acquanet

Em um sistema multidisciplinar como o de recursos hídricos lidam-se com um amplo escopo de atores, seja eles sociais, econômicos ou ambientais, desta forma aplicam-se algoritmos que objetivam otimizar decisões por meio de programas que se destinam ao apoio à tomada de decisões.

A metodologia aplicada aos programas e denominada de Sistemas de Suporte a Decisões (SSD) podem ser definidos como um sistema iterativo, integrado e que possui ferramentas analíticas

e recursos de gerenciamento de informações, buscando ajudar os tomadores de decisão a resolver problemas de gerenciamento relativamente grandes e não estruturados (McKinney, 2004).

Desta forma, para realizar uma análise integrada das diversas considerações que deve estar atrelada aos corpos hídricos adotou-se na operação e simulação do sistema de abastecimento o software Acquanet desenvolvido pelo laboratório de Sistema de Apoio à Decisão da Escola Politécnica da USP (ACQUANET, 2013). Ele caracteriza-se por ser um modelo de rede de fluxo, permitindo a análise integrada do balanço hídrico mensal considerando os reservatórios, canais e adutoras, assim como, as demandas hídricas para os diferentes usos no sistema analisado.

A rede de abastecimento de água bruta construída para a avaliação da segurança hídrica atual está apresentada na Figura 2. Nesta, os triângulos com contorno azul representam os reservatórios que compõe o sistema, os quadrados de cor rosa simbolizam as demandas hídricas dos reservatórios e do município de Caicó. Foram colocadas demandas que funcionam como drenos para alocar o excesso de água existente no sistema modelado.

A operação desta rede e a alocação de água é realizada pela aplicação de um sistema de prioridades e custos otimizados pelo algoritmo Out-of-Kilter, utilizando a simulação contínua para a realização deste trabalho. Os hidrossistemas são avaliados e como respostas obtêm-se tabelas e gráficos sobre as acumulações dos reservatórios, vazão transportada entre trechos, demandas atendidas, entre outros resultados.

Árvore de decisão

Uma árvore de decisão é uma ferramenta de suporte à decisão que utiliza um modelo em forma de árvore, a qual considera as decisões e suas possíveis consequências. Árvores de decisão são comumente usadas em pesquisa operacional para auxiliar a identificação de estratégias com maior probabilidade de atingir uma meta.

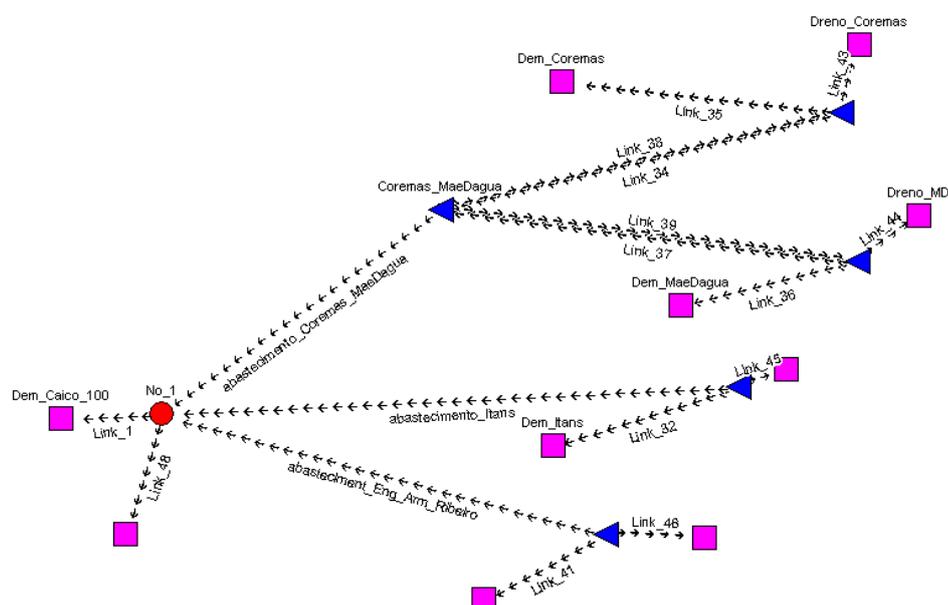
Uma árvore de decisão é organizada em uma estrutura de fluxograma dividida em nós e folhas, onde cada nó representa um teste feito em determinado atributo e cada folha representa o resultado deste teste. Cada caminho do nó raiz para um nó terminal pode ser interpretada como regra (WEI; HSU, 2008).

Desta forma, foi gerado um modelo de árvore de decisão com o auxílio do *software* de uso livre R onde utilizaram-se como dados de entrada a vazão para o abastecimento de Caicó (0,205 m³/s) vinda de cada reservatório e os níveis dos reservatórios vinculados a este estudo gerado no *software* de modelagem de rede de fluxo Acquanet,

3. RESULTADOS

Foi modelada a rede com os reservatórios Itans, o sistema Coremas/Mãe D'água e o reservatório Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves, aplicando maior prioridade de abastecimento para o reservatório de Itans, em seguida, Coremas/Mãe D'água e, por último, o Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves, como esquematizado na Figura 2.

Figura 2 - Rede de fluxo para o hidrossistema de abastecimento da cidade de Caicó utilizando três reservatórios.



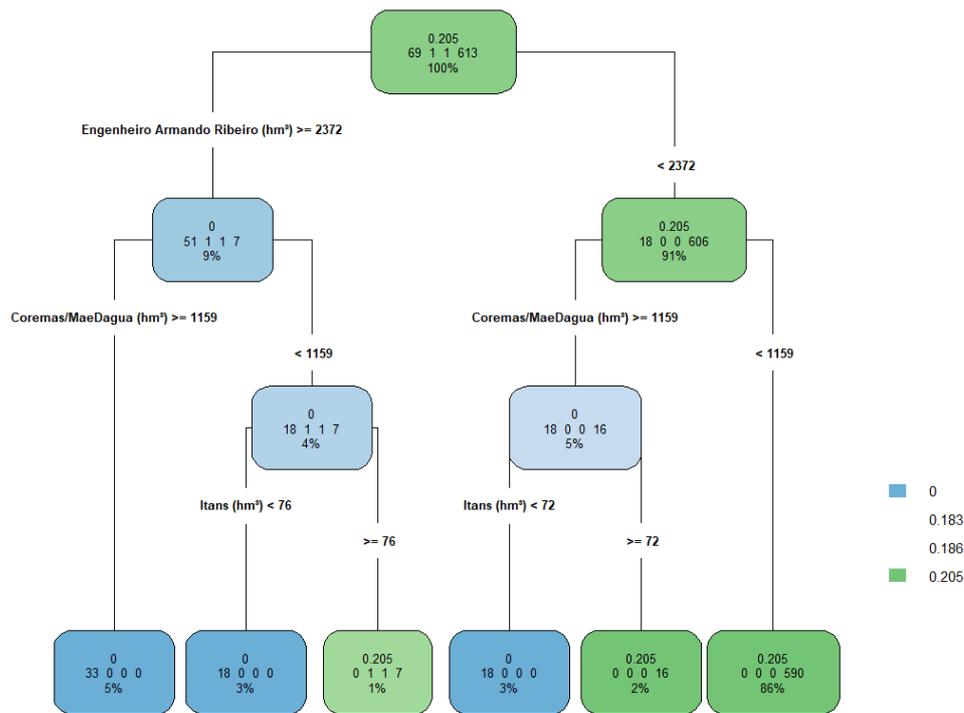
Percebe-se que todas as demandas são atendidas e a vazão média fornecida é igual às demandas da região. A regra de operação estabeleceu que a vazão afluyente para atendimento da demanda de Caicó derivaria do reservatório Itans, em 90% do período, do sistema Coremas/Mãe D'água durante 7% do tempo e do reservatório Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves durante 3% do período analisado.

As árvores de decisão apresentadas nas Figuras 3, 4 e 5 mostram em cada nó as seguintes informações: na primeira linha, a vazão demandada, na segunda, o número de meses presentes em cada classe criada pelo modelo da árvore de decisão e a terceira mostra o percentual de observações no nó. Cada galho pode ser interpretado como uma regra. Como resultado do algoritmo, cada reservatório possui um conjunto de regras definidas pelo seu volume final de cada mês da série avaliada.

A retirada do reservatório Itans será igual a $0,205\text{m}^3/\text{s}$ quando as seguintes regras ocorrem:

- Quando o reservatório Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves estiver com um volume maior ou igual a 2372 hm^3 , o Coremas/Mãe D'água tiver um volume menor que 1159 hm^3 e o reservatório Itans maior ou igual a $75,7\text{ hm}^3$, ocorrendo em 1% do tempo.
- Quando o reservatório Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves estiver com um volume menor que 2372 hm^3 , o Coremas/Mãe D'água tiver um volume maior ou igual a 1159 hm^3 e o reservatório Itans maior ou igual a $75,7\text{ hm}^3$, ocorrendo em 2% do tempo.
- Quando o reservatório Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves estiver com um volume menor que 2372 hm^3 e o sistema Coremas/Mãe D'água um volume menor que 1159 hm^3 , ocorrendo em 86% do tempo.

Figura 3 - Árvore de decisão para o reservatório Itans.

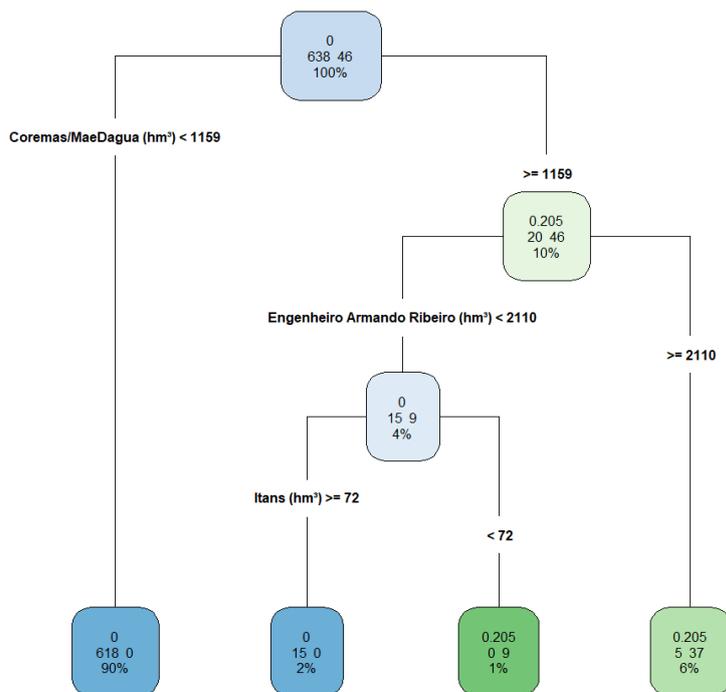


A retirada do sistema Coremas/Mãe D'água será igual a $0,205\text{m}^3/\text{s}$ quando as seguintes regras ocorrem:

- Quando o sistema Coremas/ Mãe D'água estiver com um volume maior ou igual que 1159hm^3 , o Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves tiver um volume menor que 2110 hm^3 e o reservatório Itans um volume menor que $72,15\text{ hm}^3$, ocorrendo em 1% do tempo.

- b. Quando o sistema Coremas/ Mãe D'água estiver com um volume maior ou igual que 1159hm³, o Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves tiver um volume maior que 2110 hm³, ocorrendo em 6% do tempo.

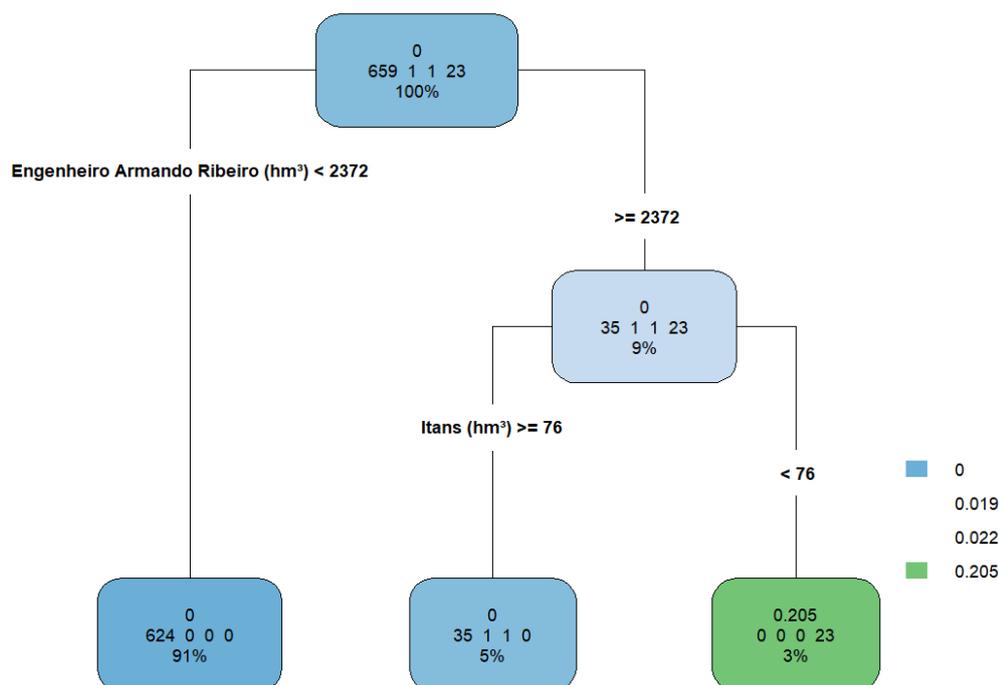
Figura 4 - Árvore de decisão para o sistema Coremas/Mãe D'água.



A retirada do reservatório Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves será igual a 0,205m³/s quando as seguintes regras ocorrem:

- a. Quando o reservatório Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves estiver com um volume maior ou igual que 2372 hm³ e o reservatório Itans tiver um volume menor que 75,7 hm³, ocorrendo em 3% do tempo.

Figura 5 - Árvore de decisão para o reservatório Engenheiro Armando Ribeiro.



4. CONCLUSÕES

A modelagem da rede fluxo mostrou que as demandas de abastecimento da cidade de Caicó são atendidas dentro do sistema operado com as três fontes, Itans, Coremas/ Mãe D'Água e Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves.

A partir do resultado da modelagem com as três fontes desenvolveram-se árvores de decisão para explicitar as regras de operação de atendimento da cidade. Com isso, foi possível interpretar como os volumes dos reservatórios afetam o fornecimento de água a partir de cada um dos reservatórios.

Para cada reservatório foram estabelecidas regras de operação baseadas nos volumes finais de cada mês e a dinâmica existente entre os volumes das fontes foi estabelecida. O reservatório que possui o maior percentual de atendimento no período simulado é o Itans, 90% do tempo, seguido por Coremas/Mãe D'água, 7% e Armando Ribeiro Gonçalves, 3%. Como exemplo das regras de operação estabelecidas, obteve-se que o reservatório Itans disponibilizará vazão máxima quando o reservatório Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves e o sistema Coremas/Mãe D'água não estiverem próximos de sua capacidade máxima ou quando o primeiro estiver próximo da

capacidade máxima, o segundo abaixo e o Itans estiver com volume igual a $75,7\text{hm}^3$. Com a explicitação das regras de operação otimizadas com esse nível de detalhe, espera-se que os operadores dos sistemas consigam obter maior sensibilidade de como os reservatórios funcionam em conjunto, formando um hidrossistema, e possam permitir melhores tomadas de decisões.

De modo geral, a utilização da modelagem de rede de fluxo associada com o algoritmo de árvore de decisão se mostrou uma estratégia viável para auxiliar na tomada de decisão da fonte abastecedora para um sistema complexo como o da cidade de Caicó, composto por várias fontes. Esse recurso pode ser utilizado no processo de alocação de água, facilitando a identificação da tomada de decisão ótima tomada pelo algoritmo de rede de fluxo.

REFERÊNCIAS

ACQUANET - Modelo para alocação de água em sistemas complexos de recursos hídricos - Manual do Usuário. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária - Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões (LabSid). São Paulo. 2013. 72p

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Reservatórios do Semiárido Brasileiro: Hidrologia, Balanço Hídrico e Operação : Anexo B / Agência Nacional de Águas - Brasília: ANA, 2017.

BESSLER, FLORIAN et al. Water reservoir control with data mining. *Journal of water resources planning and management* 129.1. 2003. p. 26-34.

CORANI, GIORGIO et al. Reproducing human decisions in reservoir management: the case of lake Lugano. In: *Information technologies in environmental engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. p. 252-263.

MCKINNEY, Daene C. Technical report: International survey of decision support systems for integrated water management. Support to Enhance Privatization, Investment, and Competitiveness in the Water Sector of the Romanian Economy (SEPIC) IRG PROJECT, n. 1673-000, 2004.

WEI, CHIH-CHIANG e HSU, NIEN-SHENG. Derived operating rules for a reservoir operation system: Comparison of decision trees, neural decision trees and fuzzy decision trees. *Water resources research*, v. 44, n. 2, 2008.

YANG, TIAN TIAN et al. Simulating California reservoir operation using the classification and regression-tree algorithm combined with a shuffled cross-validation scheme. *Water Resources Research*, v. 52, n. 3, p. 1626-1651, 2016.