



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DANIEL ANTONIO CAMELO CID

**MODELAGEM COLABORATIVA E JOGO SÉRIO PARA A TOMADA DE DECISÃO
DE ALOCAÇÃO DE ÁGUAS EM RESERVATÓRIOS DURANTE SECAS**

FORTALEZA

2023

DANIEL ANTONIO CAMELO CID

MODELAGEM COLABORATIVA E JOGO SÉRIO PARA A TOMADA DE DECISÃO DE
ALOCAÇÃO DE ÁGUAS EM RESERVATÓRIOS DURANTE SECAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho.

Fortaleza

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C51m Cid, Daniel Antonio Camelo.

Modelagem colaborativa e jogo sério para a tomada de decisão de alocação de águas em reservatórios durante secas / Daniel Antonio Camelo Cid. – 2023.
129 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho.

1. Sistema sócio-natural. 2. Alocação de águas. 3. Modelagem colaborativa. 4. Jogos sérios. 5. Tomada de decisão. I. Título.

CDD 627

DANIEL ANTONIO CAMELO CID

MODELAGEM COLABORATIVA E JOGO SÉRIO PARA A TOMADA DE DECISÃO DE
ALOCAÇÃO DE ÁGUAS EM RESERVATÓRIOS DURANTE SECAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho.

Aprovada em: ___/___/_____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Eduardo Sávio Passos Martins
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Ticiania Marinho de Carvalho Studart
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Rosa Maria Formiga Johnsson
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

Prof. Dra. Conceição de Maria Albuquerque Alves
Universidade Federal do Ceará (UnB)

A Deus.

Aos meus pais, Antônio e Sheila.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPQ pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de auxílio, o qual tornou possível a realização desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho, meu orientador dedicado ao longo dos últimos anos, da graduação ao doutorado, expresso minha sincera gratidão. Obrigado por compartilhar seu conhecimento, orientação e por sempre se importar com o meu crescimento acadêmico e pessoal.

À banca examinadora composta pelos ilustres Prof. Dr. Eduardo Sávio Passos Martins, Prof. Dra. Ticiania Marinho de Carvalho Studart, Prof. Dra. Rosa Maria Formiga Johnsson e Prof. Dra. Conceição de Maria Albuquerque Alves, agradeço o tempo dedicado à avaliação deste trabalho e pelas valiosas contribuições e sugestões que enriqueceram esta pesquisa. Também sou grato a todos os meus professores do DEHA, cujas contribuições foram fundamentais para minha formação acadêmica.

A meus pais, Antonio e Sheila, e minha tia Keila, expresso meu profundo agradecimento pelo incentivo e apoio constante aos meus estudos. Sem o amor e apoio de vocês, eu não teria alcançado este momento significativo em minha jornada acadêmica. Agradeço também aos meus irmãos, Danielle e David, cujos exemplos de estudo, perseverança e dedicação me inspiraram ao longo dessa trajetória.

Ao meu companheiro Cristiano, que esteve ao meu lado durante toda esta jornada, compartilhando as dificuldades e celebrando as alegrias. Sua presença foi essencial para minha motivação e bem-estar ao longo deste período.

Aos meus amigos da Funceme e GRC, em especial a Rafaela Alves e João Dehon, agradeço por compartilharem as experiências diárias do doutorado. Com vocês, as dificuldades se tornaram mais leves, e as conquistas foram ainda mais significativas.

Às minhas queridas amigas e sociólogas, Daniele Costa e Sandra. Vocês foram fundamentais na construção do pensamento sócio-hidrológico deste trabalho. Agradeço pelas conversas enriquecedoras, reflexões e vivências compartilhadas.

Por fim, estendo meu reconhecimento a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento desta tese de doutorado. A cada um de vocês, meu mais sincero obrigado.

RESUMO

A gestão de recursos hídricos é uma questão complexa e desafiadora, exigindo abordagens que considerem a interdependência dos fatores sociais e naturais. Esta tese tem por objetivo aprimorar as ferramentas de participação social na gestão de recursos hídricos por meio de modelagem colaborativa que incorpore a criação de sistemas de preferências de usuários e gestores de água para a tomada de decisão de alocação de águas em reservatórios durante secas, assim como, capacitar os agentes sociais envolvidos no processo de alocação por meio de jogo sério. Os resultados desta tese são alcançados por meio de pesquisas que resultaram em três artigos científicos. O primeiro artigo apresenta uma metodologia para a modelagem de um sistema sócio-natural, utilizando diagramas de influências, e a aplica à alocação negociada de águas de curto prazo no estado do Ceará, Brasil. Essa abordagem abrange os aspectos sociais e naturais da alocação de águas, fornecendo um modelo de suporte à decisão capaz de integrar informações quantitativas e qualitativas. Essa metodologia permite, ainda, a análise dos riscos e benefícios de curto prazo das decisões, considerando a incerteza das informações disponíveis. A rede de influência gerada é capaz de modelar diversos cenários de operação permitindo ao usuário entender a consequência de suas decisões na disponibilidade hídrica de curto prazo. O segundo artigo propõe uma abordagem de modelagem colaborativa para a definição de curvas de salvaguardas em reservatórios, envolvendo a participação das partes interessadas na definição dos riscos aceitáveis. Por meio da otimização de um sistema de preferências das partes interessadas, a abordagem considera as diferentes perspectivas e interesses envolvidos na gestão de recursos hídricos. A metodologia foi aplicada a um conjunto de reservatórios no Ceará, levando em conta as preferências dos gestores da Companhia de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH). Essa abordagem colaborativa promove uma gestão mais inclusiva e equitativa dos recursos hídricos, com potencial para se tornar um instrumento capaz de integrar a alocação de curto e longo prazo. O terceiro artigo apresenta a ferramenta metodológica "Seca em Jogo", um jogo sério que busca aprimorar a participação social na gestão de recursos hídricos, sendo aplicado para a construção de planos proativos de seca. Essa ferramenta foi utilizada em dois hidrossistemas no Ceará, facilitando a colaboração entre os diferentes setores usuários envolvidos na gestão local da água. Os resultados sugerem que o "Seca em Jogo" possa ser utilizado como uma ferramenta para modelagem socio-hidrológica, com potencial para facilitar a gestão integrada dos recursos hídricos, aprimorar a aprendizagem social e fornecer uma estrutura de conhecimento para lidar com desafios ambientais complexos. A proposta de metodologias que integrem modelos e ferramentas para a tomada de decisão em

recursos hídricos, com foco nas abordagens socio-naturais, desempenha um papel importante na modelagem de sistemas complexos, como o da alocação de águas. A criação de um sistema de preferência de usuários e tomadores de decisão possibilita a inclusão de diferentes perspectivas e interesses, promovendo uma gestão equitativa dos recursos hídricos. Os atores envolvidos têm a oportunidade de contribuir com seu conhecimento e interesse, garantindo que o modelo seja mais completo e legitimado pelas partes interessadas. Essas metodologias representam um avanço significativo na busca por soluções eficientes e socialmente justas para o gerenciamento dos recursos hídricos, e sua aplicação prática pode resultar em benefícios concretos para a natureza e sociedade.

Palavras-chave: Sistema sócio-natural; alocação de águas; modelagem colaborativa; jogos sérios; tomada de decisão.

ABSTRACT

Water resources management is a complex and challenging issue, requiring an approach that considers the interdependence of social and natural factors. This thesis aims to enhance social participation tools in water resources management through collaborative modeling that incorporates the creation of user and water manager preference systems for decision-making in water allocation during droughts in reservoirs. Additionally, it aims to empower the social agents involved in the allocation process through the application of a serious game. The research is summarized in three scientific papers aimed at contributing to sustainable water resource management. The first paper presents a methodology for modeling a socio-natural system using influence diagrams and applies it to the short-term negotiated allocation of water from a reservoir in the state of Ceará, Brazil. This approach includes the social and natural aspects of water allocation, providing a decision support model capable of integrating quantitative and qualitative information. Additionally, this methodology allows for the analysis of short-term risks and benefits, considering the uncertainty of available information. The resulting influence network can model various operational scenarios, enabling users to understand the consequences of their decisions on water availability. The second paper proposes a collaborative modeling approach for defining hedging curves in reservoirs, involving the participation of stakeholders in defining acceptable risks. By optimizing a stakeholder preference system, the approach considers the different perspectives and interests involved in water resource management. The methodology was applied to a set of reservoirs in Ceará, considering the preferences of managers from the Water Resources Management Company of Ceará (COGERH). This collaborative approach promotes more inclusive and equitable water resource management, with the potential to become an instrument capable of integrating short- and long-term allocation. The third paper introduces the methodological tool "Drought in game", a serious game that seeks to enhance social participation in water resource management by facilitating the development of proactive drought plans. This tool was applied in two hydrological systems in Ceará, facilitating collaboration among different user sectors involved in water resource management. The game improved understanding of water issues during periods of scarcity and enhanced communication and joint decision-making. The proposal of a methodology that integrates models and tools for decision-making in water resources, with a focus on socio-natural approaches, plays a crucial role in modeling complex systems, such as water allocation. The creation of a user and decision-maker preference system allows for the inclusion of different perspectives and interests, promoting equitable water resource

management. Through this participatory approach, stakeholders could contribute their knowledge and interests, ensuring that the model is more comprehensive and legitimate for decision-makers. This methodology represents a significant advancement in the search for efficient and socially just solutions for water resource management, and its practical application can result in tangible benefits for nature and society.

Keywords: Socio-natural system; water allocation; collaborative modeling; serious games; decision-making.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura 1 - Mapa de localização da região de estudo..... | 25 |
| Figura 2 - Framework para construção do modelo de alocação de águas de curto prazo utilizando diagrama de influência | 27 |
| Figura 3- Modelo conceitual da tomada de decisão da alocação de curto prazo..... | 33 |
| Figura 4 - Diagrama de Influência da alocação de água de curto prazo | 36 |
| Figura 5 - Histórico das vazões médias operadas (m^3/s) e volume acumulado (%) do reservatório Orós dos anos de 2011 a 2021. | 46 |
| Figura 6 - Esquema de um sistema de reservatórios com transferência entre duas bacias.. | 66 |
| Figura 7 – Tabela de preenchimento para definição de riscos toleráveis de escassez de água e valores limite de transferência de água para um sistema de reservatórios com transferência de água entre duas bacias..... | 68 |
| Figura 8 - Regra de operação com salvaguarda discreta. | 69 |
| Figura 9 – Mapa de localização do Sistema Jaguaribe Metropolitano no estado do Ceará, Brasil..... | 73 |
| Figura 10 - Demanda (m^3/s) do sistema Jaguaribe–Metropolitano. | 75 |
| Figura 11 – Procedimento gráfico para construção das curvas de salvaguarda | 77 |
| Figura 12 – Curva de Salvaguardas resultantes para os reservatórios equivalentes (a) Jaguaribe; e (b) Metropolitano, com base nas definições de técnicos da COGERH..... | 82 |
| Figura 13 - Relação entre os armazenamentos mensais dos reservatórios equivalentes e dos sistemas desagregados estudados: a) Sistema Jaguaribe. b) Sistema Metropolitano | 84 |
| Figura 14 - Severidade da regra de <i>hedging</i> para os reservatórios do sistema Jaguaribe-Metropolitano. | 85 |
| Figura 15 - Elementos do jogo: a) tabuleiro; b) exemplo de Cartas de Uso; e, c) exemplo de Cartas de Ação do Plano de Seca. | 95 |
| Figura 16 - Fluxograma das etapas do Seca em Jogo para os cenários 1 e 2..... | 97 |
| Figura 17 - a) Aplicação do jogo com a comissão gestora do Sistema Fogareiro-Quixeramobim; b) Aplicação do jogo com os usuários de água do Sistema Tejuçuoca. | 102 |
| Figura 18 - Impressões gerais do jogo conforme questionário aplicado no “Pós-jogo” com base em uma escala Likert de 5 pontos. A classificação “Ajudou completamente” conta como 5 e “Não ajudou” como 1. | 104 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 - Variáveis identificadas para a construção do modelo proposto..... | 31 |
| Tabela 2 - Características das variáveis durante o período de 2011 a 2021 | 49 |
| Tabela 3 - Validação da Rede de Influência para alocação de água | 50 |
| Tabela 4a- Probabilidade de ocorrência e verossimilhança calculada para os diferentes cenários: Ausência da informação climática, Melhoria do modelo de previsão sazonal. | 52 |
| Tabela 5 - Verossimilhanças percentual calculada em relação ao modelo de referência (modelo validado)..... | 53 |
| Tabela 6 - Tela do modelo com a simulação para o ano de 2020 | 54 |
| Tabela 7 - Probabilidade de ocorrência futura de cada categoria do reservatório para diferentes possibilidades de alocação durante o período chuvoso | 54 |
| Tabela 8 - Probabilidade de ocorrência futura de cada categoria do reservatório para diferentes possibilidades de alocação durante o período seco, após a decisão de 1 a 3m ³ /s durante o período chuvoso..... | 55 |
| Tabela 9- Probabilidade de ocorrência futura de cada categoria do reservatório para diferentes possibilidades de alocação durante o período chuvoso, utilizando um cenário de menores vazões. | 56 |
| Tabela 10 - Probabilidade de ocorrência futura de cada categoria do reservatório para diferentes possibilidades de alocação durante o período seco, após a decisão de 1 a 3m ³ /s durante o período chuvoso, utilizando um cenário de menores vazões..... | 56 |
| Tabela 11 – Resultado gerado em cada decisão durante o período chuvoso e seco com base em diferentes cenários de simulações..... | 58 |
| Tabela 12 - Descrição dos estados de seca do sistema Jaguaribe-Metropolitano..... | 73 |
| Tabela 13 - Definição dos valores de riscos toleráveis para escassez de água no sistema de abastecimento de água do Jaguaribe-Metropolitano realizados por técnicos da COGERH. | 79 |
| Tabela 14 - Definição dos valores de transferência de água (m ³ /s) em função dos diferentes estados de seca no sistema de abastecimento de água do Jaguaribe-Metropolitano realizados por técnicos da COGERH | 79 |
| Tabela 15 - Saída do algoritmo de otimização: parâmetros ótimos..... | 81 |
| Tabela 16 - Saída do algoritmo de otimização: funções objetivas | 81 |
| Tabela 17 - Saída do algoritmo de otimização: frequência de falhas | 81 |
| Tabela 18 - Garantia de cada estado de seca para simulações do Reservatório Equivalente e Reservatórios Desagregados. | 84 |
| Tabela 19 - Frequência de racionamento dos reservatórios do sistema Jaguaribe e Metropolitano por estado de seca. | 85 |
| Tabela 20 - Resiliência (em meses) dos reservatórios no sistema para cada estado de seca. | 86 |
| Tabela 21 - Vulnerabilidade dos reservatórios no sistema para cada estado de seca | 86 |
| Tabela 22 - Resultado gerado em cada decisão durante o período chuvoso e seco com base em diferentes cenários de simulações para o sistema de preferência de um usuário com aversão ao risco de escassez hídrica futura..... | 126 |
| Tabela 23 - Resultado gerado em cada decisão durante o período chuvoso e seco com base em diferentes cenários de simulações para o sistema de preferência de um usuário inclinado a utilizar maior quantidade de água no presente. | 129 |

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 | Objetivo..... | 18 |
| 1.2 | Objetivos específicos | 18 |
| 1.3 | Contribuição Científica e Tecnológica..... | 18 |
| 2 | ESTRUTURA METODOLÓGICA E INTERRELAÇÃO ENTRE OS ARTIGOS | 20 |
| 3 | MODELAGEM DE SISTEMA SÓCIO-NATURAL UTILIZANDO DIAGRAMA DE INFLUÊNCIA: APLICAÇÃO NA ALOCAÇÃO DE ÁGUA | 22 |
| 3.1 | Introdução..... | 22 |
| 3.1.1 | <i>Local de aplicação</i> | <i>24</i> |
| 3.2 | Metodologia | 26 |
| 3.2.1 | <i>Estratégia metodológica</i> | <i>26</i> |
| 3.2.2 | <i>Aplicação no local de estudo</i> | <i>29</i> |
| 3.2.2.1 | <i>Análise do processo de tomada de decisão</i> | <i>29</i> |
| 3.2.2.2 | <i>Definição de variáveis e informações relevantes</i> | <i>31</i> |
| 3.2.2.3 | <i>Definição do Modelo Conceitual</i> | <i>33</i> |
| 3.2.2.4 | <i>Criação do modelo computacional</i> | <i>34</i> |
| 3.2.2.4.1 | Identificação da base de dados | 34 |
| 3.2.2.4.2 | Discretização das variáveis | 35 |
| 3.2.2.4.3 | Definição do modelo de simulação | 36 |
| 3.2.2.4.4 | Modelo de inferência..... | 37 |
| 3.2.2.5 | <i>Validação do Modelo.....</i> | <i>44</i> |
| 3.2.2.5.1 | Previsão Climática Sazonal | 44 |
| 3.2.2.5.2 | Categoria de acumulação do reservatório e valor alocado..... | 44 |
| 3.2.2.6 | <i>Cenarização.....</i> | <i>45</i> |
| 3.2.2.6.1 | Melhoria da informação | 45 |
| 3.2.2.6.2 | Impacto do uso da informação | 46 |
| 3.3 | Resultados e Análises | 46 |
| 3.3.1 | <i>Validação.....</i> | <i>46</i> |
| 3.3.2 | <i>Cenarização.....</i> | <i>50</i> |
| 3.3.2.1 | <i>Melhoria da informação.....</i> | <i>50</i> |
| 3.3.2.2 | <i>Tomada de decisão baseado no risco</i> | <i>53</i> |

| | | |
|---------|---|-----|
| 3.3.2.3 | <i>Tomada de decisão baseada no sistema de preferência.....</i> | 57 |
| 3.4 | Discussão | 59 |
| 3.5 | Conclusão | 61 |
| 4 | MODELAGEM COLABORATIVA PARA CONSTRUIR UMA POLÍTICA DE SALVAGUARDAS PARA GESTÃO DE SECAS EM SISTEMAS DE RESERVATÓRIOS | 63 |
| 4.1 | Introdução..... | 63 |
| 4.2 | Metodologia | 66 |
| 4.2.1 | <i>Definição de riscos toleráveis.....</i> | 67 |
| 4.2.2 | <i>Modelo de operação de reservatórios com salvaguardas</i> | 68 |
| 4.3 | Estudo de caso | 72 |
| 4.3.1 | <i>Dados.....</i> | 74 |
| 4.3.2 | <i>Reservatórios equivalentes.....</i> | 75 |
| 4.3.3 | <i>Procedimento para a construção de curvas de salvaguardas</i> | 76 |
| 4.3.4 | <i>Simulação de funcionamento do sistema desagregado.....</i> | 78 |
| 4.4 | Resultados | 79 |
| 4.5 | Discussão | 86 |
| 4.6 | Conclusão | 88 |
| 5 | SECA EM JOGO: UMA FERRAMENTA PARA PROMOVER E APRIMORAR A PARTICIPAÇÃO SOCIAL NA CONSTRUÇÃO DE PLANOS PROATIVOS DE SECA..... | 90 |
| 5.1 | Introdução..... | 90 |
| 5.1.1 | <i>Uso de jogos na gestão de recursos hídricos.....</i> | 91 |
| 5.2 | Design do jogo | 93 |
| 5.3 | Aplicação do Seca em Jogo | 98 |
| 5.3.1 | <i>Características da área de aplicação</i> | 98 |
| 5.3.2 | <i>Jogabilidade.....</i> | 99 |
| 5.3.2.1 | <i>Pré-jogo.....</i> | 100 |
| 5.3.2.2 | <i>Jogando.....</i> | 100 |
| 5.3.2.3 | <i>Pós-jogo.....</i> | 102 |
| 5.4 | Discussões e conclusões..... | 105 |
| 6 | CONCLUSÃO..... | 108 |
| | REFERÊNCIAS..... | 112 |
| | APÊNDICE A – MATRIZ DOS VALORES DE PREFERÊNCIA DOS USUÁRIOS | 124 |

1 INTRODUÇÃO

A gestão de recursos hídricos é uma questão complexa e desafiadora que envolve múltiplos objetivos que muitas vezes são conflitantes. Sistemas complexos são sistemas compostos por redes ou conjuntos de diversas componentes que interagem entre si, geralmente de forma não linear, e se adaptam e evoluem por meio da auto-organização (SAYAMA, 2015). Essas propriedades presentes na gestão de recursos hídricos permitem a sua caracterização como um sistema complexo. Para enfrentar os desafios trazidos pela complexidade, é essencial adotar abordagens holísticas e integradas que leve em consideração a interdependência dos fatores sociais e naturais (KUMAR, 2015; WHEATER; GOBER, 2015).

Ao considerar a complexidade dos recursos hídricos, é fundamental compreender que as interações entre os elementos naturais e sociais não seguem uma lógica linear previsível. A compreensão da complexidade permite reconhecer que os elementos que compõem a gestão de recursos hídricos estão interconectados e que as ações tomadas em uma área terão impactos em outras, demonstrando dinâmicas, não linearidades, ciclos de feedbacks, resiliência, heterogeneidade e surpresas (ou emergências). (LIU et al., 2007a).

As dinâmicas presentes nos recursos hídricos podem levar esses sistemas complexos para diferentes caminhos. Podem convergir para equilíbrios de curto prazo, como equilíbrio relativo entre oferta e demanda hídrica, resultar em ciclos ou padrões simples, como o crescimento do número de reservatórios para incremento da oferta (DI BALDASSARRE et al., 2018), ou até mesmo gerar informações aparentemente aleatórias ou caóticas, como os processos de chuva-vazão (SIVAKUMAR, 2000). As interações entre as diversas componentes do sistema de recursos hídricos (sociais, naturais, hidráulicas, econômicas, políticas) em diferentes escalas de tempo e espaço podem levar o sistema a produzir novas estruturas, conhecidos como fenômenos emergentes (SIVAPALAN; BLÖCHL 20015), tais como “efeito dique” (DI BALDASSARRE et al., 2013) ou adaptação às mudanças (GLEICK, 2003).

A alocação de águas é um exemplo prático da complexidade dos recursos hídricos. Trata-se de um processo que envolve a distribuição e a repartição de água entre diferentes usuários, levando em consideração múltiplos objetivos, que frequentemente são conflitantes. O processo de alocação é, portanto, um sistema sócio-natural no qual os elementos estão intrinsecamente interligados. Para compreender e abordar adequadamente essa complexidade, é necessário considerar e estudar as diversas componentes desse sistema de forma conjunta.

Sendo assim, é essencial o desenvolvimento de métodos e ferramentas capaz de integrar as diferentes partes do processo. Essas ferramentas permitem que os tomadores de decisão analisem e comparem diferentes cenários, quantifiquem os impactos das escolhas e

identifiquem soluções ótimas ou preferenciais. Os modelos de suporte à decisão, por exemplo, ajudam a lidar com a incerteza, permitindo a consideração de múltiplos cenários e a avaliação de seus resultados prováveis.

Nesse contexto, as redes bayesianas (RB) são utilizadas para modelar a complexidade e incertezas em sistemas socio-naturais (JOO et al., 2019; XUE et al., 2016; VAN DAM et al., 2013; CASTELLETTI; SONCINI-SESSA, 2007) pois são capazes de integrar as múltiplas componentes de um sistema, utilizar informações de diferentes fontes e trabalhar com dados faltantes ou incertos (CHEN; POLLINO, 2012). Ao se acrescentar nós de decisões e nós de utilidades, as redes bayesianas passam a ser chamadas de Diagramas de influência (DI), e conseguem representar os custos e benefícios de decisões (LAURITZEN; NILSSON, 2001; KJAERULFF; MADSEN, 2008). Ambos os métodos, que se fundamentam na teoria de probabilidade, são amplamente utilizados para modelar incertezas e conexões causais entre as variáveis relevantes de um sistema, sendo um recurso para reduzir riscos e fortalecer a capacidade de adaptação na esfera da política e na gestão do meio ambiente (CARRIGER, 2018).

Uma característica importante dos modelos baseados em redes são as características lógica e visual que eles representam dos fenômenos. Essas características facilitam a compreensão e contribuição de especialistas no processo de desenvolvimento, aceitação e aplicabilidade desses modelos em casos reais (JAKEMAN *et al.*, 2006, CAIN, 2001).

De fato, a participação das partes interessadas no gerenciamento dos recursos hídricos é fundamental para garantir decisões mais justas e equitativas (CARR et al., 2012). Em regiões que frequentemente enfrentam períodos secos, a alocação de águas, com características descentralizadas e participativas, é um mecanismo de resolução de conflitos (SOUZA FILHO, 2005, SILVA; RIBERIO, 2022). A participação social é considerada uma medida de planejamento e gestão para lidar com a seca e democratizar o acesso à água (SOUZA FILHO et al., 2018). Isso facilita a consideração de diferentes perspectivas, prioridades e valores, promovendo uma abordagem mais inclusiva e colaborativa.

Abordagens de modelagem colaborativa, conhecidas como modelagem com visão compartilhada (em inglês, *shared vision management*), têm sido aplicadas na gestão de recursos hídricos (LANGSDALE et al. 2013; PALMER et al. 2013; VON STACKELBERG; NEILSON, 2014; VAN DEM BELT; BLAKE, 2015; BROWN et al., 2015). Basheer et al. (2021), por exemplo, utilizou abordagem de modelagem colaborativa na Grande Barragem do Renascimento Etíope (*Grand Ethiopian Renaissance Dam*) para melhorar a eficiência da operação do reservatório em períodos secos e úmidos, aumentando a resiliência e os benefícios

econômicos para a região. Em comparação com os sistemas clássicos de suporte à decisão, nos quais modelos computacionais são desenvolvidos para auxiliar as decisões das partes interessadas (KOUTSOYIANNIS et al., 2002; ALEMU et al., 2011), na modelagem colaborativa os modelos são construídos com a participação das partes interessadas na maioria dos processos de modelagem (SANDOVAL-SOLIS et al., 2013).

No entanto, a participação efetiva pode ser desafiadora devido a vários fatores, como desequilíbrios de poder, falta de confiança, assimetrias de conhecimentos e recursos limitados (DI BALDASSARRE et al., 2019). Nesse contexto, jogos sérios têm sido usados como uma ferramenta para aumentar a participação das partes interessadas e promover a colaboração entre os diferentes setores de usuários envolvidos na gestão de recursos hídricos (HAAN et al., 2020).

Jogos sérios são jogos que têm objetivos diferentes do puro entretenimento (MICHAEL; CHEN, 2005). Eles combinam intenções sérias, como objetivos pedagógicos, informativos ou de treinamentos, com os elementos lúdicos. Jogos sérios são utilizados para promover aprendizado social, diálogo entre setores e participação das partes interessadas no processo de planejamento de recursos hídricos (BATHKE et al., 2019), aprimorar a participação das partes interessadas, servindo como uma atividade quebra-gelo e facilitando a compreensão das complexidades da gestão da água (DEN HAAN et al., 2020) ou, ainda, como ferramenta socio-hidrológica para identificar fatores que influenciam a tomada de decisões (MARIANO; ALVES, 2020).

Diante disso, é proposto o aprimoramento de ferramentas que possibilitem a inclusão da participação social no processo de tomada de decisões em recursos hídricos, focando em abordagens que integrem as componentes sociais e naturais presentes na gestão de recursos hídricos. As abordagens propostas são aplicadas a casos reais na gestão de recursos hídricos no território cearense em diferentes escalas espaciais, abrangendo regiões hidrográficas, hidrossistemas¹ e reservatórios.

Nas subseções a seguir, são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos desta tese, bem como as contribuições científicas e tecnológicas. Na seção 2, é descrita a estrutura metodológica e a inter-relação entre os artigos que compõem as seções 3, 4 e 5. Por fim, na seção 6, são apresentadas as principais conclusões deste trabalho.

Hidrossistema é um sistema composto por elementos que representam a oferta hídrica, como reservatórios, poços, adutoras, canais e rios, e elementos que representam a demanda hídrica, como usos urbanos, industriais, irrigação e energia. Esses componentes estão interligados entre si, e suas interações mútuas afetam a qualidade e a quantidade da água disponível. Além disso, o Hidrossistema é capaz de realizar trocas de água e energia com o ambiente circundante. Caracterizam-se por ser um domínio relevante para a realização do balanço hídrico, bem como para a análise de estratégias de gestão e tomada de decisão em relação aos desafios relacionados aos recursos hídricos.

1.1 Objetivo

Esta tese tem por objetivo aprimorar as ferramentas de participação social na gestão de recursos hídricos por meio de modelagem colaborativa que incorpore a criação de sistemas de preferências de usuários e gestores de água para a tomada de decisão de alocação de águas em reservatórios durante secas, assim como, capacitar os agentes sociais envolvidos no processo de alocação por meio de jogo sério.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta tese são alcançados por meio de pesquisas que resultaram em três artigos científicos. Cada um deles se concentra em responder a um único objetivo específico. São eles:

- Propor uma metodologia para a modelagem de um sistema sócio-natural, utilizando diagramas de influências para a tomada de decisão na alocação de águas de curto prazo.
- Propor uma abordagem de modelagem colaborativa para definir curvas de salvaguardas para a operação de reservatórios, incluindo as partes interessadas na definição de riscos aceitáveis, visando a integração da alocação de curto e longo prazo
- Propor um jogo sério como ferramenta metodológica para aprimorar o processo participativo na construção de planos proativos de secas.

1.3 Contribuição Científica e Tecnológica

As contribuições científicas e tecnológicas desta tese estão presentes nos objetivos específicos de cada um dos três artigos. Essas contribuições representam avanços no campo da gestão de recursos hídricos, oferecendo modelos e ferramentas para enfrentar os desafios complexos associados à gestão da água.

No primeiro artigo, parte-se da ideia de que a alocação negociada de águas é um sistema complexo que requer metodologias que integrem todas as suas componentes. Para isso, é proposta uma metodologia para modelar o sistema sócio-natural da alocação de águas utilizando diagramas de influências, possibilitando a análise dos riscos e benefícios das decisões de curto prazo. Essa abordagem representa um avanço no entendimento da alocação de águas

como um sistema complexo. Além disso, resulta no desenvolvimento de uma ferramenta de suporte à decisão para a alocação que abrange toda a cadeia causal do processo decisório.

No segundo artigo, uma relevante contribuição científica é oferecida ao propor uma metodologia colaborativa para a definição de curvas de salvaguarda, por meio da explícita incorporação de um sistema de preferências das partes interessadas. Essa abordagem considera as diferentes perspectivas e interesses envolvidos, promovendo uma gestão mais inclusiva e equitativa dos recursos hídricos. A metodologia proposta neste artigo foi aplicada a uma região como uma prova conceitual do método. Entretanto, destacamos que ela tem sido aplicada com sucesso na construção de planos proativos de secas em hidrossistemas no Estado do Ceará. A contribuição deste artigo avança na possibilidade de se tornar um instrumento capaz de integrar a alocação de curto e longo prazo.

No terceiro artigo, uma contribuição tecnológica é apresentada por meio da proposição de um jogo sério, denominado “Seca em Jogo” como ferramenta que possibilita o aprendizado social, aprimorando a participação social nos processos de planejamento e gestão de recursos hídricos. A ferramenta metodológica facilita a apreensão e compreensão de conceitos e princípios do planejamento de seca. O “Seca em Jogo” atua como uma ferramenta metodológica mediadora entre distintos saberes e entendimentos e possibilita uma melhor comunicação e um compartilhamento de informações e termos numa linguagem acessível e facilmente compreensível. Essa ferramenta busca melhorar a comunicação, a interação e a tomada de decisão entre os diversos atores envolvidos. Ela avança no sentido de fomentar uma maior compreensão das questões hídricas e aprimorar o planejamento e gestão de secas de forma colaborativa e equitativa.

2 ESTRUTURA METODOLÓGICA E INTERRELAÇÃO ENTRE OS ARTIGOS

Para abordar os aspectos mencionadas na introdução e alcançar os objetivos propostos, esta tese é composta por três seções principais, além de uma seção final que apresenta as conclusões do trabalho. Cada seção principal é constituída por um artigo científico dedicado a abordar de maneira aprofundada cada objetivo específico da tese.

O primeiro artigo, apresentado na seção 3, contempla o problema da modelagem sócio-natural. A gestão de recursos hídricos, por ser um sistema complexo, necessita ser tratado por metodologias que integre as diversas componentes que a constituem (KUMAR, 2015). A partir disso, propomos a modelagem de um sistema sócio-natural através da utilização de diagramas de influências e aplicamos na alocação negociada de águas de um reservatório localizado no Ceará. O trabalho contempla os aspectos sociais e naturais da alocação, fornecendo um modelo de suporte a decisão capaz de integrar informações quantitativas e qualitativas para a tomada de decisão na gestão de recursos hídricos.

As respostas do modelo criado, no entanto, são influenciadas pelo conhecimento prévio que temos sobre as variáveis ou a forma como elas são discretizadas dentro do modelo. Nesse sentido, a figura das partes interessadas no processo pode trazer melhorias para a modelagem, além de sua aceitação e aplicabilidade em problemas reais (CARR et al., 2012). Pensando nisso, o segundo artigo, descrito na seção 4, propõe uma metodologia colaborativa para zonestar um reservatório para a construção de curvas de salvaguardas através da otimização de um sistema de preferências das partes interessadas no processo de decisão. O zoneamento serve como um gatilho para declarar a seca em uma região, desencadeando a implementação de medidas e ações proativas de gestão de seca. A metodologia foi aplicada a um conjunto de reservatórios que foi zoneado segundo a preferências dos gestores da Companhia de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH). No entanto, a aplicação poderia ser estendida para qualquer parte interessada para definir outros valores de preferência e, conseqüentemente, a construção de outras curvas de salvaguardas para o reservatório.

A participação efetiva da sociedade em processos de tomadas de decisão pode ser uma tarefa desafiadora devido a diversos fatores, como desequilíbrios de poder, falta de confiança, ou assimetrias de conhecimento (DI BALDASSARRE et al., 2019). Nesse contexto, os jogos sérios podem ser utilizados como uma ferramenta para fomentar a participação das partes interessadas e incentivar a colaboração entre os diferentes setores de usuários envolvidos na gestão de recursos hídricos. Assim, no terceiro artigo (seção 5) propomos uma ferramenta para promover e aprimorar a participação social na construção de planos proativos de seca. A

ferramenta, denominada de “Seca em Jogo”, é um jogo sério que foi construído visando a aprendizagem social através da abordagem lúdica. O jogo foi aplicado em dois hidrossistema no Ceará e facilitou a construção de planos proativos de seca nas regiões.

Os artigos representam avanços na promoção e integração de modelos e ferramentas para a tomada de decisão na gestão de recursos hídricos, concentrando-se em abordagens que incorporam tanto as componentes naturais quanto as sociais, por meio da explicitação das preferências das partes interessadas em todo o processo de tomada de decisão. Embora tenham sido aplicados em regiões localizados no Ceará, as metodologias e ferramentas propostas podem ser replicadas em outras regiões onde a disponibilidade de água seja um fator limitante para o desenvolvimento.

3 MODELAGEM DE SISTEMA SÓCIO-NATURAL UTILIZANDO DIAGRAMA DE INFLUÊNCIA: APLICAÇÃO NA ALOCAÇÃO DE ÁGUA²

3.1 Introdução

A gestão de águas é uma atividade complexa, envolvendo objetivos múltiplos que muitas vezes são conflitantes. A água, sendo um recurso natural limitado e dotado de valor econômico (SECRETARIAT, 1992) precisa ser alocada entre usos concorrentes. A alocação de águas é uma ferramenta de gestão dos recursos hídricos, por meio da qual decide-se a distribuição e repartição desse bem para atendimento de diferentes setores da sociedade. Nesse contexto, compreender as interações entre fatores socioeconômicos e processos naturais é fundamental para uma gestão sustentável dos recursos hídricos (TAN et al., 2021).

As interações entre seres humanos e meio ambiente são temas de estudos com abordagens interdisciplinares: Sistemas Socio-Ecológicos – SESs (OSTROM, 2009; BERKES; FOLKE; COLDING, 2000; GALLOPIN et al., 1989), Sistemas Humanos e Naturais Acoplados- CHANS (LIU et. al, 2007a,b), Socio-hidrologia (DI BALDASSARRE, 2013; SIVAPALAN et al., 2012), entre outros. Essas disciplinas abordam as interrelações entre os sistemas, destacando a existência de feedbacks, não linearidade, coevolução, vulnerabilidade, resiliência, adaptação, entre outras características (LIU et. Al, 2007a; SIVAPALAN et al., 2012; BLAIR; BUYTAERT, 2016).

Estudos que agregam as relações entre natureza e sociedade revelam uma complexidade que não é observada quando essas componentes são estudadas de forma separadas (LIU et. al., 2007), caracterizando o sistema sócio-natural como um sistema complexo. O estudo dessa complexidade tem se tornado cada vez mais importantes nas ciências naturais e sociais (LADYMAN et al., 2018), buscando compreender como os seres humanos afetam os sistemas ambientais, que, por sua vez, afetarão os seus comportamentos (AN, 2012).

As características complexas das interações e inter-relações sinalizam que os sistemas socio-naturais sejam modelados por métodos diferentes dos convencionais (KUMAR 2015) em que as componentes são estudadas de forma separadas. Blair e Buytaert (2016) revisam as diferentes abordagens, conceitos e aplicações para a modelagem de um mundo sócio-hidrológico, entre elas Modelagem Baseada em Agentes (HYUN et al., 2019, WENS et al., 2019, AN., 2012), Sistemas Dinâmicos (SHAHSAVARI-POUR et al., 2023, TAN et al.,

²Este artigo ainda não foi submetido a nenhuma revista científica.

2021, ELSAWAH et al., 2017), Teoria do Jogos (MADANI; HOOSHYAR, 2014) e Redes Bayesianas (XUE et al., 2016; VAN DAM et al., 2013, CASTELLETTI; SONCINI-SESSA, 2007).

Além da complexidade, a incerteza é uma questão presente na modelagem de qualquer sistema socio-natural. É necessário, portanto, incorporá-la nesse processo (WELSH et al., 2013). Algumas técnicas de modelagem, como as redes Bayesianas, tratam esse aspecto de maneira explícita (KELLY et al., 2013), diferentes de outras técnicas, como análises de sensibilidade (WANG; HUANG, 2014) ou métodos baseados em cenários.

A utilização de redes bayesianas (RBs) tem crescido na modelagem de sistemas ambientais pois elas são capazes de integrar múltiplas componentes de um sistema, utilizar informações de diferentes fontes, trabalhar com dados faltantes ou incertos (CHEN; POLLINO, 2012). Apesar de existirem estudos aplicados em sistemas socio-naturais (JOO et al., 2019, VAN DAM, 2013), existe uma dificuldade das RBs em modelar processos de feedbacks, o que torna o desenvolvimento de modelos que gerem esse tipo de compreensão no contexto sócio-hidrológico valioso (BLAIR; BUYTAERT, 2016).

A incorporação de nós de decisão e nós de utilidade que representam os custos e benefícios das ações e seus resultados em uma rede bayesiana resulta em uma forma de representação denominada Diagrama de Influência (DI), também conhecido como Rede de Influência (RI) (LAURITZEN; NILSSON, 2001; KJAERULFF, MADSEN, 2008). Assim, os DIs podem ser considerados como a extensão de RBs com uma representação explícita de opções de decisão e preferências sobre os possíveis resultados do processo de decisão. Ambas as abordagens, que se baseiam na teoria da probabilidade, são amplamente empregadas para modelar a incerteza e as relações causais entre as variáveis relevantes do sistema. Carriger (2018), por exemplo, apontam os Diagramas de Influência como potenciais para minimizar riscos e aumentar a resiliência na política e gestão ambiental.

Historicamente, a construção de reservatórios de água foi uma tentativa de minimizar os riscos de desabastecimento das populações (DI BALDASSARRE, 2019). Entretanto, devido ao papel significativo do consumo de água no equilíbrio entre oferta e demanda, tornou-se necessário implementar soluções de controle do uso e governança da água na gestão hídrica (GLEICK, 2003, FORMIGA-JOHNSON; KEMPER 2005).

Um estudo realizado por Medeiros e Silvapalan (2020) destacou o impacto das mudanças na governança da água na capacidade de adaptação humana às secas em uma região do semiárido brasileiro, localizada no Ceará. Nessa região, a incerteza hidrológica é uma variável de grande relevância considerada no momento de tomar decisões sobre alocação de

água. Apesar da existência de grandes reservatórios, a alocação nessa região ainda é altamente dependente das chuvas (REIS JUNIOR et al., 2007) o que leva os gestores e tomadores de decisões a adotarem medidas conservadoras, como assumir vazão zero para a próxima estação chuvosa (SOUZA FILHO, 2005, SANKARASUBRAMANIAN, et al., 2009). Embora essa política minimize o risco de falhas no abastecimento de água ou perdas econômicas, ela pode ser muito restritiva, limitando o desenvolvimento de uma região (REIS JUNIOR et al., 2007). Portanto, a utilização de modelos de previsão climática pode ser uma estratégia útil para melhorar o aproveitamento do recurso disponível, considerando o custo de oportunidade associado ao uso da água nos mananciais.

Diante disso, o objetivo deste estudo é propor uma metodologia para a tomada de decisão na alocação de águas de curto prazo, por meio da criação de um modelo de suporte baseado em uma abordagem sócio-natural utilizando um diagrama de influência. Esse modelo integrará todo o processo de tomada de decisão da alocação de curto prazo, criando uma rede de cadeia causal que possibilitará a análise do risco e da incerteza nas dimensões climáticas, hidrológicas e sociais. A metodologia apresentará as estratégias para o desenvolvimento da rede, que poderá ser replicada em qualquer região onde a disponibilidade hídrica seja um fator limitante.

O capítulo está estruturado em diferentes seções, sendo a introdução a primeira delas. Na seção 3.2, é detalhada a metodologia adotada neste trabalho, apresentando um fluxograma que ilustra de forma clara a estratégia metodológica para a criação do modelo proposto e sua aplicação na região de estudo. Os principais resultados obtidos com a utilização desse modelo são apresentados na seção 3.3. Em seguida, na seção 3.4, são discutidos os resultados e, por fim, a seção 3.5 traz as conclusões do capítulo.

3.1.1 Local de aplicação

O estudo foi aplicado ao sistema Jaguaribe–Metropolitano, localizado na porção centro-nordeste do Estado do Ceará, no semiárido brasileiro. O sistema é composto por oito reservatórios estratégicos (Castanhão, Orós, Banabuiú, Gavião, Pacoti, Riachão, Pacajús e Aracoiaba), e tem como principais usos a irrigação na região Jaguaribana e o abastecimento urbano da Região Metropolitana de Fortaleza. As duas regiões hidrográficas são interligadas por dois canais, o Eixão das Águas e o do Trabalhador. As decisões de transferência hídrica entre as regiões são objetos de conflitos pelo uso da água, notadamente acentuada durante a seca de 2012-2017 (STUDART et al, 2021).

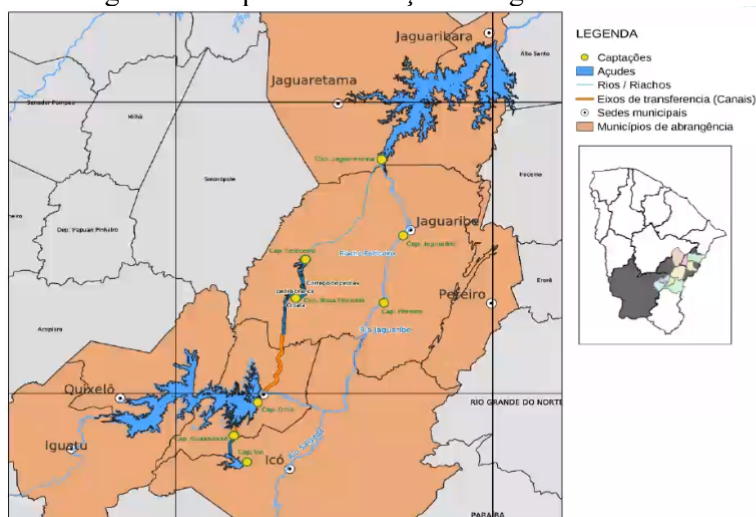
A metodologia proposta poderia ser aplicada a todos os reservatórios da bacia. Entretanto, com o intuito de simplificar as análises, o reservatório Orós foi considerado como

único reservatório da bacia do Jaguaribe, tendo a sua vazão alocável distribuída entre dois usuários: a irrigação, representando a atividade predominante da bacia do Jaguaribe e o abastecimento urbano, representado pelos consumos residencial, industrial e de serviços da RMF.

A escolha do reservatório Orós neste estudo se dá pela sua importância estratégica para o Estado do Ceará. O reservatório Orós foi construído em 1961 pelo Departamento Nacional de Obras Contra a Seca (DNOCS), e possui uma capacidade de acumulação de 1.940.000 m³. O reservatório foi por muitos anos estratégico para o complemento da oferta da RMF, sendo o principal responsável por evitar o colapso da capital cearense no ano 1993. Desde 2004, ano da conclusão da construção do açude Castanhão, o reservatório teve seu uso voltado prioritariamente para atendimento demandas do seu entorno.

Além disso, o reservatório apresenta um conjunto de usuários que utiliza suas águas para atender diferentes demandas. As principais são divididas em quatro tipos: (i) Demandas de usos de montante, cuja captação é feita diretamente na bacia hidráulica do reservatório; (ii) Demanda de transferência para o açude Lima Campos (transferência entre bacia); (iii) Demanda de transferência para o açude Feiticeiro (transferência dentro da bacia hidrográfica); (iv) Demanda de perenização do rio Jaguaribe, por quase 100 km de extensão desde a tomada d'água a captação do município de Jaguaretama (atendimento de usos de irrigação, dessedentação animal, além da sedes municipais de Jaguaribe e Jaguaretama, e diversas comunidades e distritos). A figura 1 mostra um mapa de localização da região.

Figura 1 - Mapa de localização da região de estudo



Fonte: Apresentação do XXVIII Seminário de Alocação dos Vales do Jaguaribe e Banabuiú realizada pela COGERH em julho de 2021.

3.2 Metodologia

A metodologia foi dividida em duas partes distintas. Na primeira parte, é apresentada a estratégia metodológica para o desenvolvimento do modelo sócio-natural de alocação de curto prazo utilizando diagramas de influências. Já na segunda parte, realiza-se a aplicação da metodologia proposta, tendo como estudo de caso a alocação de água do reservatório Orós.

3.2.1 Estratégia metodológica

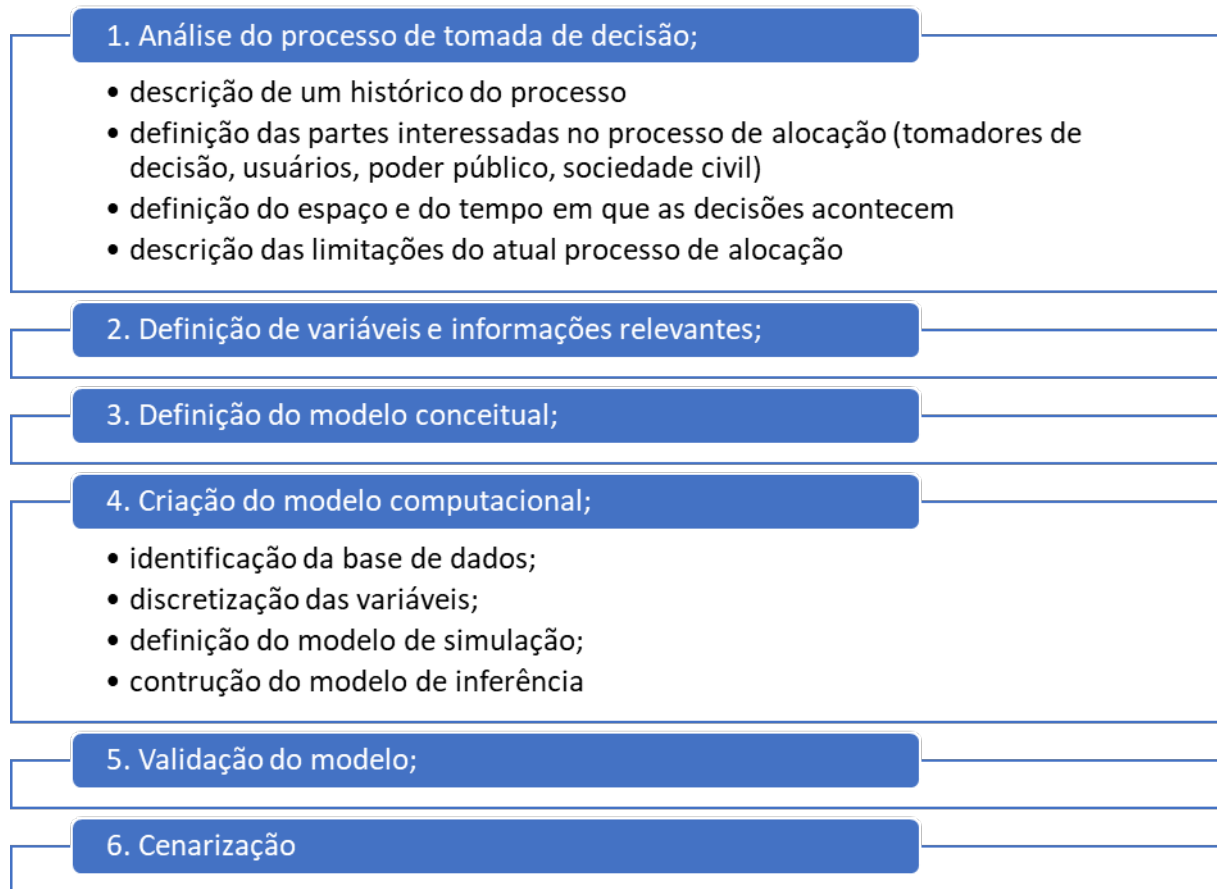
A estratégia para a construção e validação do modelo de alocação de águas de curto prazo é composta de seis etapas, conforme ilustrado na Figura 2.

A etapa inicial visa à análise do processo de decisão da alocação. O objetivo é compreender como a alocação acontece na região de estudo, definindo claramente o sistema que irá ser modelado. Nesta etapa, a participação de *stakeholders* (partes interessadas no processo) pode ser de extrema importância. Definimos cinco passos para estabelecer a análise, são elas: i) Descrever um histórico do processo; ii) Definir as partes interessadas no processo de alocação (tomadores de decisão, usuários, poder público, sociedade civil); iii) Definir o espaço e o tempo em que as decisões acontecem; iv) Descrever sobre as limitações do atual processo de alocação.

A etapa (2) visa identificar as variáveis que influenciam direta ou indiretamente a alocação de águas. Segundo Cain (2001), as variáveis podem representar aspectos físicos, sociais, econômicos, institucionais, além de propriedades, quantidades e ações do objeto modelado. A definição dessas pode ser feita através da consulta a especialistas, a partes interessadas, na literatura científica, ou em modelos de simulação (PHAN et al, 2016). Pode-se, ainda, utilizar técnicas de Brainstorming (OSBORN, 1953), mineração de textos e processamento de linguagem natural, pesquisa manual em documentos e literatura científica, além de consulta a especialistas.

A etapa seguinte, etapa (3), visa construir um modelo conceitual, que, segundo JAKEMAN *et al.*, (2006) é valioso para estruturar o problema e determinar a cadeia causal, além de trazerem diversos benefícios quando são construídos com a contribuição de especialistas e *stakeholders*. Cain (2001) descreve um passo-a-passo da construção de um modelo conceitual baseado na experiência de *stakeholders*. O objetivo, no entanto, é entender como as variáveis definidas nas etapas anteriores se relacionam. O resultado desta fase será a base para construção de um modelo computacional usando diagrama de influência.

Figura 2 - Framework para construção do modelo de alocação de águas de curto prazo utilizando diagrama de influência



O modelo computacional desenvolvido na etapa (4) é resultado de um conjunto de suposições de causa e efeito entre as variáveis, aplicadas a uma distribuição de probabilidade conjunta e um nó de decisão. Essa combinação forma o que é conhecido como diagrama de influência (HOWARD; MATHESON, 1984). O diagrama de influência é composto por nós, links, tabelas de probabilidades condicionais e funções de benefícios. Os nós representam as variáveis foram definidas na etapa (2). Os links representam as relações existentes entre essas variáveis e são apresentadas no modelo como setas indicando a relação de causa (nós pais) e efeito (nós filhos) entre as variáveis. Os nós que não possuem nós pais são as entradas do modelo e recebem os valores das observações. Assim, as modificações desses valores nos permitem a criação e avaliação de diversos cenários. Cada ligação entre dois nós (links) são definidos através das tabelas de probabilidade condicionais. Por fim, as funções de benefícios representarão uma medida de preferência que auxiliará na tomada de decisão do usuário da rede.

Nesta etapa, definimos quatro passos importantes para definição do modelo estrutural, são eles: (1) identificação da base de dados; (2) discretização das variáveis; (3) definição do modelo de simulação; (4) Modelo de inferência.

O passo de identificação da base de dados consiste na coleta e levantamento dos dados das variáveis definidas anteriormente e que serão necessários para a construção dos modelos de inferência. As fontes de dados podem ser, além de outras: base de dados de órgãos e instituições de recursos hídricos e meio ambiente; questionários abertos ou direcionados aos gestores e usuários de água; medições e experimentos em campo, tais como, monitoramento climático, medição de vazão, operação de sistemas de reservatórios, monitoramento da qualidade da água; resposta de modelos científicos, a exemplo, modelos climáticos, hidrológicos, socioeconômicos.

A discretização das variáveis consiste na subdivisão de suas observações em categorias. Existem diversos métodos matemáticos para construir distribuições discretas (intervalos iguais, quantis iguais, método dos momentos). Destaca-se que a discretização deve ser realizada com cautela uma vez que ela pode resultar em perda de informação para o modelo (NOVAJAN et al., 2017).

O passo seguinte consiste na escolha do modelo de simulação que será utilizado. Existem diversos modelos que já foram testados e publicados, dentre eles citamos GeNIe Modeler (BAYESFUSION, 2023), Netica Application Software (NETICA, 2023), R (R CORE TEAM, 2020). No entanto, a escolha deve priorizar aspectos relacionados a facilidade de uso e disponibilidade de aquisição.

O modelo de inferência é composto pelas Tabelas de Probabilidade Condicional (CPT's, do inglês, *conditional probability tables*) e pelas funções de benefício. CPT's representam as relações de probabilidades condicionais entre as variáveis do modelo de redes influências e indicam as relações de causa e efeito entre elas. As funções de benefícios representam uma medida de preferência que auxiliará na tomada de decisão. Ambas são derivadas através de uma variedade de fontes de dados, incluindo dados observados, resultados de modelos de simulação, modelos econômicos, conhecimento de especialistas e opinião de stakeholders (AMES et. al, 2005; PHAN et.al, 2016).

O modelo desenvolvido será avaliado na etapa (5). As formas de avaliação incluem avaliações qualitativas, realizados pelos stakeholders ou partes interessadas, através de um processo participativo ou avaliações quantitativas, como análise de sensibilidade, comparação da capacidade preditiva com dados observados ou resultados de outros modelos (PHAN et al., 2016, AGUILERA et. al, 2011).

Por fim, foram criados cenários (etapa 6) para testar diferentes condições e situações no modelo proposto, com o objetivo de avaliar o impacto da melhoria das informações a priori e verificar como a alocação poderia ter sido afetada. A análise dos resultados desses cenários é crucial para compreender o desempenho do modelo, identificar possíveis limitações e oportunidades de aprimoramento.

3.2.2 Aplicação no local de estudo

3.2.2.1 Análise do processo de tomada de decisão

A decisão sobre alocação negociada de recursos hídricos foi iniciada no Ceará em 1994 no “Seminário dos Usuários de Água dos Vales do Jaguaribe e Banabuiú”. Na ocasião, usuários, instituições governamentais e não governamentais reuniram-se para analisar e propor alternativas para a gestão dos recursos hídricos dos principais reservatórios da bacia Jaguaribana. A reunião, que aconteceu no município de Jaguaribe no dia em 20 de junho do citado ano, foi organizada pela Secretaria dos Recursos Hídricos sob coordenação da COGERH e formou a base para a gestão compartilhada de água no Estado.

Essa primeira experiência de negociação de água no Ceará resultou na constituição das “Comissões permanentes dos Usuários de Água dos Vales do Jaguaribe e Banabuiú”, formada por usuários das regiões, que se tornaram os responsáveis pela alocação das águas (COGERH, 1994). A partir do ano de 1997, os Comitês de Bacias Hidrográficas (CBHs) são implantados do Estado, como forma de adequação as leis estaduais e federais de recursos hídricos, ocupando a posição destas comissões de usuários nos espaços de discussão sobre a uso da água (AQUINO, 2019).

A alocação negociada de águas no Estado do Ceará é um processo de decisão participativo e descentralizado. Atualmente, as decisões acontecem no âmbito dos CBHs, formadas por representantes do poder público estadual/federal e municipal, sociedade civil e usuários de água. O Comitê da sub-Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe, região cujo reservatório Orós está inserido, foi instalado em 2002 e conta com a participação de 50 instituições-membros, sendo 10 representantes do poder público municipal, 10 do poder público estadual/federal, 15 usuários de água e 15 instituições representando a sociedade civil³

³ Informação disponível em: <<https://portal.cogerh.com.br/alto-jaguaribe/>>. Acesso em: 1 mar. 2023.

Os atores sociais deste comitê, reúnem-se com os membros dos comitês das sub Bacias Hidrográficas do Baixo, do Médio Jaguaribe, do rio Banabuiú, do rio Salgado e o Comitê das Bacias Metropolitanas em seminários anuais, logo após o fim da quadra chuvosa (julho), denominada de “Seminário de Alocação das Águas dos Vales do Jaguaribe e Banabuiú”. Ao todo 240 instituições membros devem decidir sobre (i) a quantidade de água (vazão) que sairá dos reservatórios Banabuiú, Castanhão e Orós para atender as demandas dos diferentes setores usuários e (ii) como esta água será dividida entre os usuários. Destaca-se que, nesse seminário, o Comitê das Bacias Metropolitanas é apenas consultivo (não tem poder de voto), restando o poder de deliberação aos outros comitês.

As reuniões de negociação da alocação no Ceará acontecem normalmente no final de junho justificado pelo fato de que nesse mês os reservatórios já atingiram sua capacidade máxima de acumulação no ano. Nesses encontros, a COGERH, apresenta cenários de operação dos reservatórios (retiradas mensais com horizonte de 6 meses a 1 ano), com base no estado atual dos mananciais, demandas instaladas na bacia e um cenário de vazões afluentes. Os cenários de operação são previamente discutidos em reuniões com membros das diretorias dos comitês, que definem parâmetros (vazões máximas e mínimas a serem liberadas dos açudes) e premissas (condições de uso das águas) para alocação. Os membros dos CBHs debatem os cenários pré-definidos e definem em consenso, ou através de votação, a vazão média que deve ser liberada para o período.

A decisão da alocação, normalmente, tem validade até o dia 31 do mês de janeiro do ano seguinte, quando então são revisitadas na “Reunião de avaliação da alocação das águas dos vales do Jaguaribe e Banabuiú e Operação Emergencial do 1º semestre”. Nesse encontro, que normalmente acontece em fevereiro, são apresentadas as situações atualizadas dos reservatórios, as vazões médias mensais liberadas durante o período desde a última reunião, e um comparativo entre níveis simulados e realizados na operação dos açudes. Os membros dos CBHs tomam a decisão de continuar ou modificar os valores alocados no semestre anterior.

Na prática, tanto o seminário que acontece no segundo semestre, após a quadra chuvosa, quanto a reunião do primeiro semestre, que antecede o período chuvoso da região, objetivam definir a liberação de água dos açudes. Entretanto, nesta última, a liberação é baseada nas necessidades de curto prazo dos usos prioritários (abastecimento humano e dessedentação animal), haja vista que os outros usos poderão captar água dos rios advinda das chuvas da estação. Além disso, a incerteza associada ao regime de vazões que ocorrerá nos meses seguintes tem grande influência sobre as decisões neste momento. A decisão de quanto de água

irá retirar do reservatório, e quanto de água irá reservar no período chuvoso para usar no seco é influenciado por essa incerteza.

Na reunião de avaliação e operação emergencial, a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme) divulga o prognóstico de chuvas para os meses de fevereiro, março e abril. A informação é repassada aos tomadores de decisões através de probabilidades de ocorrências do acumulado de chuva, distribuída em três categorias: abaixo, normal e acima da média climatológica.

O conhecimento da previsão climática sazonal, no entanto, é considerado de forma subjetiva no processo de alocação, sendo esse uma das grandes limitações do atual processo. De fato, os dados apresentados pelo órgão cearense de previsão do clima não são incorporados de forma direta nas simulações realizadas pela COGERH. Os cenários de simulação realizados incorporaram valores de vazões nulas, ou valores de algum ano de referência como estimativa dos aportes dos açudes. No ano de 2021, por exemplo, a simulação da operação dos reservatórios foi realizada com o aporte de vazão de 2015, pior ano da última década (Ata da Reunião de Avaliação da XXVII Alocação das Águas dos Vales do Jaguaribe e Banabuiú e Operação Emergencial do 1º Semestre de 2021), mesmo com a Funceme apontando no prognóstico de chuvas a maior probabilidade de chuvas acima da média para o Estado⁴. Segundo Souza Filho (2022), modelos de previsão de vazões foram desenvolvidos pela equipe da COGERH, entretanto, não foram continuados, resultado em uma abordagem similar a utilizada no ano de 1994, quando se considerava a vazão afluyente aos reservatórios nula.

3.2.2.2 Definição de variáveis e informações relevantes

A identificação das variáveis aleatórias do modelo, que representam as características ou causas e efeitos dentro da situação de aplicação, são apresentadas na Tabela 1. As variáveis foram definidas utilizando as técnicas de brainstorm (OSBORN, 1953) e análise textuais, como as atas das reuniões de alocação e artigos científicos sobre a temática no Ceará (SILVA et al., 2019; SILVA et al., 2017; AQUINO et al., 2012; SILVA et. al, 2006)

Tabela 1 - Variáveis identificadas para a construção do modelo proposto

Variável

Previsão climática sazonal

⁴ Informação disponível em: <http://www.funceme.br/wp-content/uploads/2021/01/Prognostico-20Jan2021-Ceara.pdf>. Acesso em 7 de junho de 2023.

Precipitação
Vazão
Estoque
Simulação do Estoque
Demanda
Métrica de Impacto e Benefício
Decisão da alocação

A previsão climática sazonal é o ponto de partida da cadeia de decisão. Ela indica as possibilidades de ocorrência do clima para um determinado período futuro. No Ceará, a previsão climática sazonal é realizada pela Funceme, que informa as probabilidades de ocorrência de três categorias de precipitação: Acima da normal climatológica, em torno da Normal e abaixo da normal climatológica. Desde 2012, a Funceme realiza o processamento do modelo de circulação geral da atmosfera (ECHAM 4.6) e utiliza metodologia objetiva para definir as probabilidades apresentadas no prognóstico sazonal⁵.

A variável precipitação indica a categoria da chuva acumulada observada durante a quadra chuvosa. Os dados observados podem fazer parte de uma rede de monitoramento composta de estações pluviométricas manuais e automáticas, como as da ANA, INMET ou Funceme, ou base de dados de diferentes iniciativas, tais como CMAP (XIE; ARKIN, 1997; HUFFMAN et al., 1997), GPCC (SCHNEIDER et al., 2013), CHIRPS (FUNK et al., 2015) e CRU (HARRIS et al., 2020).

Parte da precipitação, quando cai sobre o solo, torna-se escoamento superficial. Esta variável, denominada de vazão, é monitorada por duas instituições no Ceará: COGERH e CPRM. As vazões também podem ser obtidas através de modelos chuva-deflúvio calibradas para as regiões de estudos. Esta variável torna-se entrada para o modelo de reservatórios.

A decisão da alocação é realizada no âmbito dos CBH's após a observação dos resultados de diferentes cenários de operação do reservatório. Estes cenários levam em conta as seguintes variáveis: Estoque inicial do reservatório, cenários de vazão afluentes, demandas, estoque de água no fim do período simulado, além de alguma métrica ou critério para decidir a vazão alocada (SILVA et. al, 2006)

⁵ Informação disponível em <http://www.funceme.br/?p=1562> acesso em 15 de dezembro de 2021.

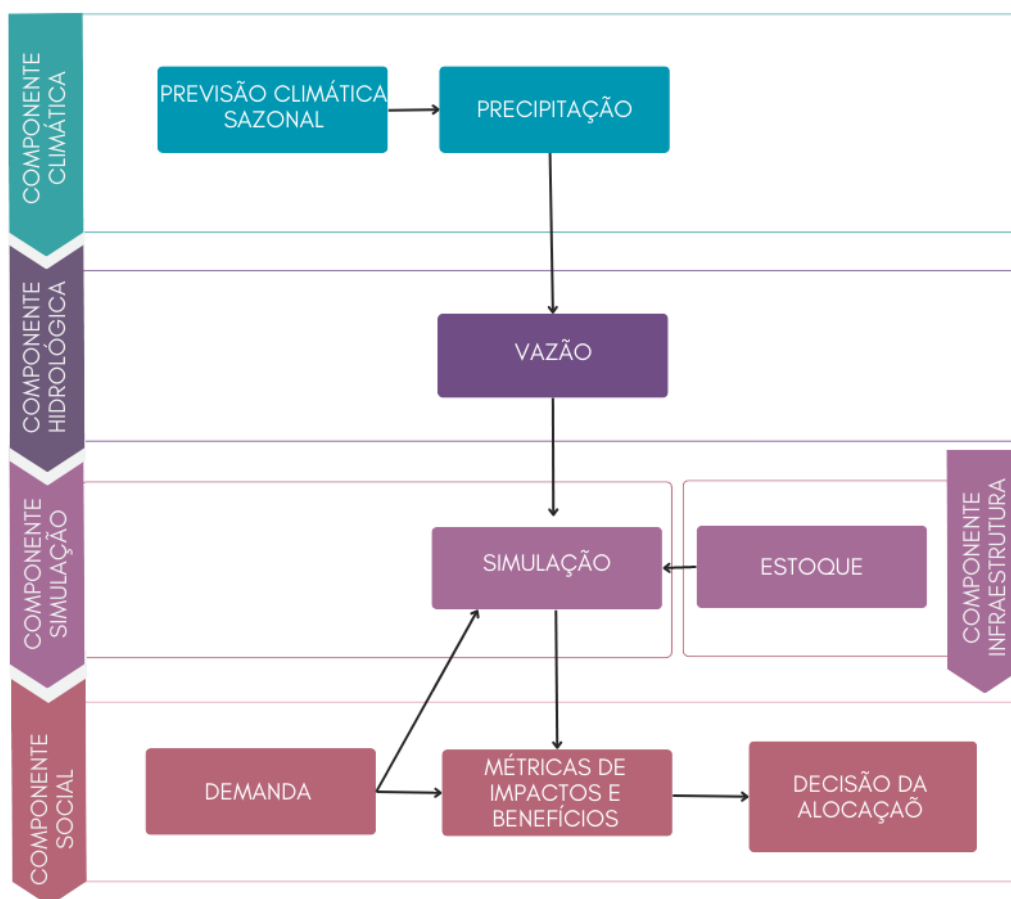
3.2.2.3 *Definição do Modelo Conceitual*

Foi elaborado um modelo conceitual que ilustra as relações entre as variáveis identificadas que influenciam a alocação. O modelo conceitual da decisão da Alocação é composto por cinco subsistemas, ou componentes: Climática, Hidrológica, Infraestrutura, Simulação e Social (Figura 3).

A componente climática agrega as informações relacionadas ao clima, sendo composta pelas variáveis “previsão climática sazonal” e “precipitação”. Essa componente será a responsável por levar as informações à componente hidrológica, neste modelo representada exclusivamente pela variável “vazão”. A componente de infraestrutura é responsável por alimentar o modelo com as informações referentes as obras hídricas. Nosso modelo apresenta uma única variável nesta componente, representada pela variável “estoque”, que representa o volume armazenado no reservatório no momento da tomada da decisão. A componente de simulação do sistema incorporará a variável de “simulação do estoque”. Esta será responsável pela informação a respeito do volume final do período da validade da decisão, ou seja, logo após o período chuvoso e seco.

Por fim, a componente social será responsável por apresentar as diversas possibilidades de retirada de água do reservatório (demanda), uma métrica que possa avaliar os benefícios e os impactos de cada uma das possíveis retiradas e, por fim, a decisão da alocação.

Figura 3- Modelo conceitual da tomada de decisão da alocação de curto prazo



3.2.2.4 Criação do modelo computacional

3.2.2.4.1 Identificação da base de dados

Para a variável “previsão climática sazonal”, utilizou-se a precipitação acumulada trimestral disponibilizada pela Funceme a partir do modelo de circulação geral da atmosfera ECHAM4.6 (ROECKNER et al., 1996) com mês de inicialização em janeiro e previsão para o trimestre fevereiro, março e abril (FMA). O modelo possui uma resolução de T42L19, o que fornece um espaçamento horizontal de aproximadamente, $2,8125^\circ$. Coletou-se a informação do ponto de coordenada de latitude -6° e longitude -39° , onde está inserido o local de aplicação deste estudo, entre os anos de 1981 e 2010 (climatologia). Para a correção do viés sistemático do modelo, ajustou-se os 20 membros da climatologia do modelo a uma distribuição gama com os dados observados de precipitação do mesmo período (BLOCK et. al, 2009).

Os dados de precipitação observados são oriundos da base de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), que apresenta a séria histórica de dados de monitoramento diário de chuva para todo o Brasil. Os dados adquiridos foram interpolados espacialmente pelo método IDW, com expoente 2, para todo o Estado. Assim, preencheu-se uma grade de $0,01$ graus sobre

todo o território cearense, representado o mosaico de precipitações mensais para o Ceará no período de outubro de 1910 a 2019.

Os dados de vazões foram adquiridos através do “Relatório de Cálculo das Afluências aos Reservatórios Estratégicos do Ceará: Definição das Vazões Oficiais” (PROJETO ALOCA, 2021). Essas vazões foram calculadas através da utilização do modelo conceitual Soil Moisture Accounting Procedure (SMAP) em sua versão mensal (LOPES; BRAGA; CONEJO, 1981), utilizando diferentes técnicas de regionalizações.

As variáveis “Alocação Período Chuvoso” e “Alocação Período Seco” (Q_{ret}), são as variáveis de decisão do modelo, e correspondem aos valores de vazões alocáveis para o período. Através da análise e leitura das Atas de Alocação do reservatório Orós, obtiveram-se os diferentes valores alocados entre os anos 2011 e 2021. A partir daí, os dados foram agrupados em 6 classes diferentes:

Classe 1 : $0 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q_{ret} < 1 \text{ m}^3/\text{s}$;

Classe 2 : $1 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q_{ret} < 3 \text{ m}^3/\text{s}$;

Classe 3 : $3 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q_{ret} < 5 \text{ m}^3/\text{s}$;

Classe 4 : $5 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q_{ret} < 7 \text{ m}^3/\text{s}$;

Classe 5 : $7 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q_{ret} < 9 \text{ m}^3/\text{s}$;

Classe 6 : $9 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q_{ret} \leq 11 \text{ m}^3/\text{s}$

Por fim, a variável “Simulação do Estoque” do reservatório contou com a utilização das informações de evaporação do açude Orós, CAV (Relação entre Cota, Área e Volume do reservatório), volumes máximo e mínimo do reservatório, obtidos diretamente da COGERH, além dos dados de vazões e demandas descritas nos parágrafos anteriores.

3.2.2.4.2 Discretização das variáveis

As variáveis “Previsão Climática Sazonal” e “Precipitação” foram divididas em três categorias: Acima, em torno da Normal e Abaixo da normal climatológica. Para esta categorização, utilizou-se a base de dados de precipitação observada descrita na etapa anterior, selecionando-se os valores dos anos entre 1981 e 2010, para os pontos de grades inseridos dentro da bacia da área de estudo. Calculou-se o acumulado da precipitação para os meses FMA, ajustando-os a uma distribuição de probabilidade do tipo Gama. Os limiares das categorias correspondem aos valores dos percentis 33% e 66% desses dados (427,18 mm e 552,55 mm, respectivamente). Assim, se o valor do acumulado FMA for menor que 427,18 mm, os anos são

classificados na categoria abaixo. Se for entre os valores 427,18 mm e 552,55 mm, classificados na categoria Normal, e maior que 552,55 mm, são classificados na categoria acima da normal.

A variável vazão foi dividida nas categorias Seca, Normal e Cheia. Para isto, selecionaram-se os dados de vazão com mesmo período da variável precipitação (1981-2010), calculando para cada ano a média do semestre (janeiro a junho). Ajustaram-se os dados a uma distribuição de probabilidade do tipo Gama e calcularam-se os valores correspondentes aos percentis 33% e 66%, resultando nos valores 16,75 m³/s e 74,35 m³/s, correspondente aos limiares das categorias.

As variáveis “Estoque nos reservatórios”, “Simulação dos estoques de água no fim Período Chuvoso” e “Simulação dos estoques de água no fim Período Seco” foram divididas em seis categorias: Normal, Alerta, Seca, Seca Severa, Seca Extrema e Colapso. Cada categoria representa uma faixa correspondente a frações do volume máximo do reservatório. Assim, a categoria Normal representa os valores acumulados no reservatório entre 70% e 100%. A categoria Alerta, entre 50% e 70%. A categoria seca representa os valores de 30 a 50%. Já a categoria Seca Severa, 10% a 30%. Para a seca extrema, utilizou-se os valores entre o volume mínimo do reservatório e 10%. Por fim, a categoria colapso representa a acumulação abaixo do volume mínimo do manancial. A faixa de valores correspondentes aos mesmo valores utilizados na categorização feita pela COGERH.^{6,7}

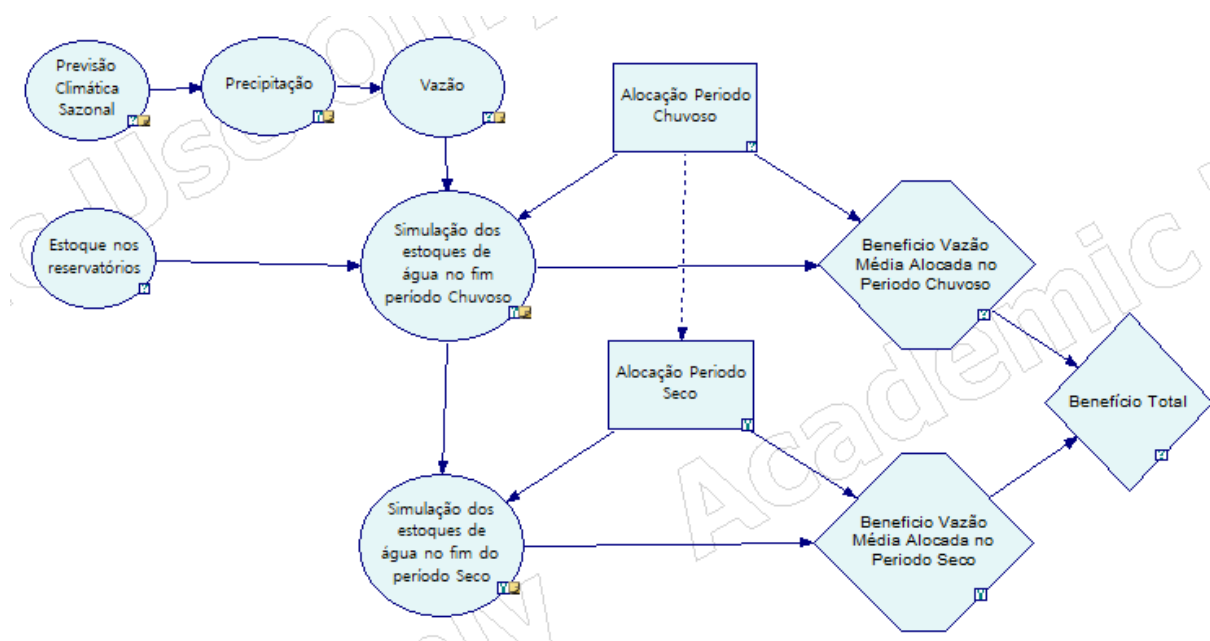
3.2.2.4.3 Definição do modelo de simulação

Neste estudo, optou-se pelo uso do modelador Genie para representar o diagrama de influência devido à sua interface amigável e gratuidade para fins acadêmicos. O software é uma Interface Gráfica do Usuário (GUI) do SMILE (*Structural Modeling, Inference, and Learning Engine*), desenvolvido pela BayesFusion, LLC, que permite a criação de modelos gráficos de raciocínio probabilístico, tais como redes bayesianas e diagramas de influência, representando as relações causais entre variáveis e modo simplificado. A Figura 4 apresenta a rede da tomada de decisão da alocação de curto prazo modelada no software Genie BayesFusion, versão acadêmica 4.0.

Figura 4 - Diagrama de Influência da alocação de água de curto prazo

⁶ Disponível em : <http://www.hidro.ce.gov.br/>. Acesso em: 07 de junho de 2023.

⁷ A categorização é realizada a partir da resolução do CONERH 03/2020.



3.2.2.4.4 Modelo de inferência

O raciocínio probabilístico das redes de influências é inicializado pela observação de evidências. Um nó que possui observação é chamado de nó de evidências, e significa que seu resultado é conhecido. Os nós de evidência estão representados pelas variáveis “previsão climática sazonal”, cuja evidência será dada pela probabilidade de ocorrência em cada categoria de previsão, e “estoque nos reservatórios”, cuja evidência será dada pela categoria do estoque observado no início do período simulado. O impacto das evidências se propaga pela rede, modificando a distribuição de probabilidade de outros nós que estejam relacionados ao nó de evidências através das tabelas de probabilidade condicional.

Tabela de Probabilidade Condicional – CPT

A CPT entre as variáveis “previsão climática sazonal” da precipitação e “precipitação” ocorrida (CPT_PP) foi calculada da seguinte forma:

- 1) Utilizando os dados de precipitação do modelo de previsão climática sazonal, foi calculada a probabilidade das categorias de previsão abaixo da normal, em torno da normal e acima da normal climatológica para o período de 1981-2010. Cada ano desse período foi então classificado com a categoria de maior probabilidade de ocorrência.

- 2) Utilizando os dados de precipitação observada do mesmo período, cada ano foi classificado nas categorias abaixo da normal, em torno da normal e acima da normal climatológica.
- 3) Seja a matriz $CPT_PP = (cpt_pp_{ij})_{m \times n}$, onde m é número de categorias da variável “previsão climática sazonal” e n é o número de categorias da variável “precipitação”. A probabilidade de se observar a categoria j dada que a categoria i foi prevista, será dada por

$$cpt_pp_{ij} = \frac{C_{ij}}{C_j} \quad (1)$$

Onde,

C_{ij} = número de anos observados na categoria j dado que foram previstos na categoria i

C_j = número de anos observados na categoria j

A CPT entre as variáveis “precipitação observada” e “vazão” (CPT_PV) foi calculada da seguinte forma:

- 1) Utilizando os dados de precipitação observada do período de 1981-2010, classificou-se cada ano nas categorias abaixo da normal, em torno da normal e acima da normal climatológica.
- 2) Utilizando os dados de vazões do período de 1981-2010, classificou-se cada ano nas categorias seca, normal e úmido.
- 3) Seja a matriz $CPT_PV = (cpt_pv_{ij})_{m \times n}$, onde m é número de categorias da variável “precipitação” e n é o número de categorias da variável “vazão”. A probabilidade de se observar vazão da categoria j dada que se observou a precipitação na categoria i , será dada por

$$cpt_pv_{ij} = \frac{C_{ij}}{C_j} \quad (2)$$

Onde,

C_{ij} = número de anos observados da vazão na categoria j dado que a precipitação observada na categoria i

C_j = número de anos observados da vazão na categoria j

A CPT entres as variáveis “vazão”, “alocação período chuvoso”, “estoque dos reservatórios” e “simulação dos estoques d’água no período chuvoso” (CPT_VAESC) foi calculada da seguinte forma:

- 1) Utilizando os dados de vazões do período de 1981-2010, classificou-se cada ano nas categorias seca, normal e úmido. Simulou-se o reservatório em cada uma das categorias, utilizando as vazões de cada ano como referência para vazões secas, normal e úmidas.
- 2) Para cada conjunto de anos classificados nas três categorias de vazão, simulou-se o reservatório com horizonte de 5 meses (fevereiro a junho) utilizando a equação do balanço de hídrico, combinando os diferentes cenários de alocação no período úmido (6 cenários) com as diversas possibilidades de estoque inicial. O estoque inicial foi discretizado em valores a cada 5% do seu volume máximo, resultando em 21 possibilidades, totalizando $6 * 21 * Nanos_q$. $Nanos_q$ representa o número de anos classificado em cada categoria q de vazão, cujo somatório equivale a 30 anos (1981-2010). Assim, foram realizadas um total 3780 simulações ($6 * 21 * 30$)
- 3) A equação do balanço de hídrico utilizada é dada por:

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - E_t - R_t \quad (3)$$

Onde, S é o volume armazenado no reservatório; Q o volume de vazão afluente ao reservatório; E o volume de água perdido por evaporação do reservatório; R o volume alocado do reservatório, t é o período mensal da simulação

- 4) Seja a matriz $CPT_VAESC = (cpt_vaesc_{ijkl})_{m \times n \times p \times q}$, onde m é número de categorias da variável “simulação dos estoques d’água no período chuvoso”, n é o número de categorias da variável “estoque inicial do reservatório”, p é número de cenários da variável “alocação período chuvoso” e q é número de categorias da variável “vazão”. A probabilidade de o estoque de água no fim do período chuvoso estar na categoria i , dado que o estoque inicial está na categoria j , o cenário de alocação é k e observou-se vazão na categoria l , será dada por

$$cpt_vaesc_{ijkl} = \frac{C_{ijkl}}{C_j} \quad (4)$$

Onde,

C_{ijkl} = número de anos no fim da simulação com estoque i , dado que o reservatório partiu da categoria j , tendo valor alocado k , com vazão na categoria l ,

C_j = número de anos com estoque inicial do reservatório na categoria j .

A CPT entres as variáveis “simulação dos estoques d’água no período chuvoso”, “alocação período seco”, “simulação dos estoques d’água no período seco” (CPT_SCASS) foi calculada da seguinte forma:

- 1) Simulou-se o reservatório com horizonte de 7 meses (julho a janeiro) utilizando a equação do balanço de hídrico, com vazão afluyente igual a zero, combinando os diferentes cenários de alocação no período seco (6 cenários) com as diversas possibilidades de estoque inicial (6 categorias de estoques). O estoque inicial nesta simulação corresponde aos mesmos estoques finais da simulação anterior. Dessa forma, realizou-se 36 simulações.
- 2) A equação do balanço de hídrico utilizada é dada por:

$$S_{t+1} = S_t - E_t - R_t \quad (5)$$

Onde, S é o volume armazenado no reservatório; E o volume de água perdido por evaporação do reservatório; R o volume alocado do reservatório, t é o período mensal da simulação

- 3) Seja a matriz $CPT_SCASS = (cpt_scass_{ijk})_{m \times n \times p}$, onde m é número de categorias da variável “simulação dos estoques d’água no período seco”, n é o número de categorias da variável “simulação dos estoques d’água no período chuvoso”, p é número de cenários da variável “alocação período seco”. A probabilidade de o estoque de água no fim do período seco estar na categoria i , dado que o estoque de água no fim do período chuvoso está na categoria j , o cenário de alocação é k , será dada por

$$cpt_scass_{ijk} = \frac{C_{ijk}}{C_j} \quad (6)$$

Onde,

C_{ijkl} = número de anos no fim da simulação do período seco com estoque i , dado que o reservatório estava na categoria j no fim do período chuvoso, tendo valor alocado k

C_j = número de anos com estoque do reservatório no fim do período chuvoso na categoria j .

Funções de benefício

A alocação de recursos hídricos é comumente baseada em critérios que visam maximizar sua utilização. Esses critérios podem incluir a minimização de perdas no sistema hídrico (como evaporação e vertimentos), a redução de custos de operação, um sistema de preferências políticas entre usuários (CID; SOUZA FILHO; PORTO, 2023), ou uma maximização de benefícios econômicos. O benefício pode ser expresso por meio de valoração monetária, conforme demonstrado por Souza Filho e Brown (2009).

Neste modelo, apresentamos uma abordagem que utiliza uma matriz que representa as prioridades dos usuários, capaz de capturar as vontades dos tomadores de decisão, atribuindo valores que refletem um sistema de preferências. O Quadro 1 exibe a Matriz de Preferência da Alocação (MPA) que foi construída a partir da soma de duas outras matrizes que representam o Risco e Perda de interesse da decisão (RP) e o Valor Futuro da água (VF). É importante ressaltar que o objetivo principal é demonstrar o potencial de utilizar uma rede de inferências para tomar decisões. Portanto, outros critérios ou preferências dos tomadores de decisão podem ser considerados. Exemplos de outros valores da matriz de preferência da alocação são apresentados no APÊNDICE A.

Assim, seja a matriz de risco e perda de interesse RP de dimensão $m \times n$ e uma matriz de valor futuro da água VF de dimensão $m \times n$, a matriz de preferência da alocação MPA pode ser obtida somando as matrizes RP e VF:

$$MPA_{ij} = RP_{ij} + VF_{ij} \quad (7)$$

Onde:

MPA é a matriz de preferência da alocação.

RP_{ij} é o elemento na i -ésima linha e j -ésima coluna da matriz de risco e perda de interesse RP.

VF_{ij} é o elemento na i -ésima linha e j -ésima coluna da matriz de valor futuro da água VF.

A Matriz de Risco e Perda de Interesse (RP) é uma representação das consequências que um tomador de decisões enfrentará em relação aos valores alocados e ao estado futuro do reservatório. Essa matriz é construída atribuindo uma escala linear para os valores alocados representados nas colunas, variando de 50 a zero, o que representa a perda de interesse do decisor. O valor 50 corresponde a uma alocação de 10 m³/s, enquanto o valor zero representa uma alocação de 0 a 1 m³/s. Para as linhas, é atribuída uma escala exponencial com para o estado futuro do reservatório, variando de -1 a -128. Essa escala representa o risco associado ao reservatório mudar de um estado de seca ao fim do período considerado, atribuindo maiores pesos as categorias com níveis de secas mais elevados. Cada célula i,j da matriz é preenchida somando os valores atribuídos às linhas i e às colunas j correspondentes.

A matriz de valor futuro da água é construída para representar a capacidade futura de tomar a mesma decisão do presente. Para isso, são atribuídos valores a cada combinação de alocação e estado futuro. Partindo da suposição de que cada estado de seca tem um valor de alocação atribuído, essa combinação representa uma preferência igual a zero. Por exemplo, se o reservatório estiver no estado normal, uma retirada entre 9 e 11 m³/s resultaria em acréscimo zero no resultado da preferência. O mesmo ocorre para a combinação "alerta" e "7 a 9 m³/s", e assim por diante, até a combinação "0 a 1 m³/s" e "colapso". Por tanto, essas combinações representam um valor futuro já esperado, não acrescentando nem punindo no cálculo final da preferência. No entanto, se o reservatório passar de um estado de seca para outro mais grave ele será punido seguindo a escala exponencial proposta na matriz de perda de interesse. Por outro lado, se com a mesma alocação do presente, o reservatório subir de categoria de seca ele será beneficiado 1 unidade em relação ao valor anterior. Dessa forma, a matriz de valor futuro da água captura tanto as expectativas de preferência quanto as penalidades associadas a mudanças no estado do reservatório e na capacidade de alocação de água no futuro.

Quadro 1 - Matriz de risco e perda de interesse (RP), valor futuro da água (VF) e Matriz de Preferência da Alocação (MPA)

| <i>Matriz de risco e perda de interesse (RP)</i> | | Valor Alocado | | | | | |
|--|---------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | | 11 a 9 m ³ /s | 9 a 7 m ³ /s | 7 a 5 m ³ /s | 5 a 3 m ³ /s | 3 a 1 m ³ /s | 1 a 0 m ³ /s |
| Estado do futuro do reservatório | <i>escala</i> | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 | 0 |
| Normal | -1 | 49 | 39 | 29 | 19 | 9 | -1 |
| Alerta | -4 | 46 | 36 | 26 | 16 | 6 | -4 |
| Seca | -8 | 42 | 32 | 22 | 12 | 2 | -8 |
| Seca Severa | -16 | 34 | 24 | 14 | 4 | -6 | -16 |
| Seca Extrema | -64 | -14 | -24 | -34 | -44 | -54 | -64 |
| Colapso | -128 | -78 | -88 | -98 | -108 | -118 | -128 |
| <i>Matriz Valor Futuro da Água (VF)</i> | | Valor Alocado | | | | | |
| Estado do futuro do reservatório | | 11 a 9 m ³ /s | 9 a 7 m ³ /s | 7 a 5 m ³ /s | 5 a 3 m ³ /s | 3 a 1 m ³ /s | 1 a 0 m ³ /s |
| Normal | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Alerta | | -4 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Seca | | -8 | -4 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| Seca Severa | | -16 | -8 | -4 | 0 | 1 | 2 |
| Seca Extrema | | -32 | -16 | -8 | -4 | 0 | 1 |
| Colapso | | -64 | -32 | -16 | -8 | -4 | 0 |
| <i>Matriz de Preferência da Alocação (MPA)</i> | | Valor Alocado | | | | | |
| Estado do futuro do reservatório | | 11 a 9 m ³ /s | 9 a 7 m ³ /s | 7 a 5 m ³ /s | 5 a 3 m ³ /s | 3 a 1 m ³ /s | 1 a 0 m ³ /s |
| Normal | | 49 | 40 | 31 | 22 | 13 | 4 |
| Alerta | | 42 | 36 | 27 | 18 | 9 | 0 |
| Seca | | 34 | 28 | 22 | 13 | 4 | -5 |
| Seca Severa | | 18 | 16 | 10 | 4 | -5 | -14 |
| Seca Extrema | | -46 | -40 | -42 | -48 | -54 | -63 |
| Colapso | | -142 | -120 | -114 | -116 | -122 | -128 |

3.2.2.5 Validação do Modelo.

Inicialmente coletou-se as informações referentes as características do sistema Orós, bem com as decisões de operação e alocação realizadas para o período entre 2011 e 2021. O período foi escolhido como forma de validar a rede, haja vista que o modelo foi desenvolvido com dados entre 1981 e 2010.

A validação da rede influência foi realizada simulando a rede montada com o reservatório partindo da condição de acumulação no primeiro semestre, aplicando a probabilidade de cada categoria calculada na previsão climática sazonal e utilizando as vazões operadas para cada um dos 8 anos com dados disponíveis (2013, 2015 a 2021). Assim, considerando que o modelo calcula probabilidade de acumulação ao fim do período úmido e seco, ou seja, duas vezes em cada ano, foram realizadas 16 verificações. Comparou-se o resultado do modelo com o observado através do monitoramento, calculando a verossimilhança das categorias.

3.2.2.5.1 Previsão Climática Sazonal

A probabilidade de ocorrência de cada categoria de previsão entre os anos 2011 e 2021 foi calculada utilizando as saídas do modelo de previsão ECHAM 4.6, com viés corrigido utilizando os anos da climatologia. Para cada ano, calculou-se a probabilidade dos membros do modelo de estarem nas categorias abaixo, representado pelo valor da precipitação do percentil 33%, em torno da média (entre o percentil 33% e 66%), e acima da média, representado pelo valor do percentil 66%. Os valores de precipitação da climatologia correspondem a 427,18 mm e 552,55 mm, para os percentis de 33% e 66%, respectivamente.

3.2.2.5.2 Categoria de acumulação do reservatório e valor alocado

Levantaram-se os dados de acumulação do reservatório nos dias 01/02 para o primeiro semestre e 01/07 para o segundo semestre e classificou-se o reservatório de acordo com o zoneamento descrito em 3.5.

Para os dados de valores alocados, utilizou-se os dados de vazões operadas disponibilizadas nas atas de alocações entre 2011 e 2021. Alguns valores não estavam claros nas atas e foi recuperado através de informações repassadas por técnicos da COGERH. Ainda assim, os dados referentes as vazões operadas no primeiro semestre dos anos 2011, 2012 e 2014 não foram possíveis de recuperar e por esse motivo não aparecem dos resultados. Destaca-se ainda que, como o modelo de DI é discretizado, alguns valores da operação realizada foram arredondados para a classe mais próxima no momento da validação.

3.2.2.6 Cenarização

Após construir e validar o DI, foram criados cenários para avaliar o impacto da melhoria dos dados observados no modelo e verificar sua influência na alocação usando o modelo proposto. Esses cenários testaram diferentes condições e situações, proporcionando uma avaliação abrangente e confiável do modelo. A análise dos resultados desses cenários é crucial para compreender o desempenho do modelo, bem como identificar suas limitações e oportunidades de aprimoramento.

3.2.2.6.1 Melhoria da informação

As redes de influência permitem a utilização de probabilidades a priori para produzir uma inferência sobre as relações entre as variáveis e propagá-las por toda a rede. A passagem de informação entre as variáveis na rede ocorre através da atualização dessas probabilidades a priori. Na atualização das probabilidades a priori, a rede de influência usa a informação prévia sobre as relações entre as variáveis para calcular as probabilidades iniciais. A informação prévia é representada na forma de tabelas de probabilidade condicional, que mostram a probabilidade de cada variável dado o estado das outras variáveis.

Com o objetivo de avaliar a melhoria do modelo de previsão, foram utilizados diferentes cenários que incorporaram modificações na qualidade das informações a priori das variáveis precipitação e vazão. Quatro critérios foram considerados na criação dos cenários: (i) ausência da informação climática; (ii) melhoria do modelo de previsão climática sazonal; (iii) melhoria da modelagem hidrológica; e (iv) menor vazão. A análise desses cenários permitiu avaliar o desempenho do modelo de previsão em diferentes condições e fornecer informações sobre a influência das informações a priori na precisão das previsões de acumulação dos reservatórios.

No cenário ausência de informação climática, o modelo é simulado desconsiderando a previsão climática sazonal e assumindo que a probabilidade de ocorrer umas das três categorias de precipitação é igual para todos (climatologia). Assim, a informação a priori da precipitação é 33% para as categorias abaixo, normal e acima. Já para o cenário melhoria do modelo de previsão climática sazonal, o DI é simulado assumindo que o modelo de previsão climática sazonal possui excelente precisão e acurácia. Assim, para cada ano simulado, a informação a priori da precipitação será 100% na categoria observada no respectivo ano e zero nas outras categorias.

O cenário de melhoria da modelagem hidrológica corresponde ao caso que temos uma excelente habilidade do modelo Chuva-Deflúvio. Nesse caso, para cada ano simulado, a informação a priori da vazão será 100% na categoria observada no respectivo ano e zero nas

outras. Por fim, o cenário de menor vazão, onde o modelo é simulado considerando as vazões mais baixas da última década, representadas pelas vazões de 2016. Esse cenário simula a operação que vem sendo realizado pela nos últimos, onde assume-se vazões baixas, ou próximas a zero, nas simulações de alocação de água dos reservatórios. Assim, a água é alocada puramente com base no armazenamento disponível no momento, com o objetivo de manter uma certa quantidade de água em armazenamento no final do período para cobrir as demandas previstas para os próximos 6 ou 12 meses.

3.2.2.6.2 Impacto do uso da informação

Com o objetivo de demonstrar o potencial da utilização do modelo na decisão da alocação, foi selecionado um ano da série histórica e aplicada ao DI, demonstrando a aplicabilidade do modelo e avaliando os resultados. O impacto da informação foi avaliado para tomada de decisão levando em conta os riscos e as preferências dos usuários.

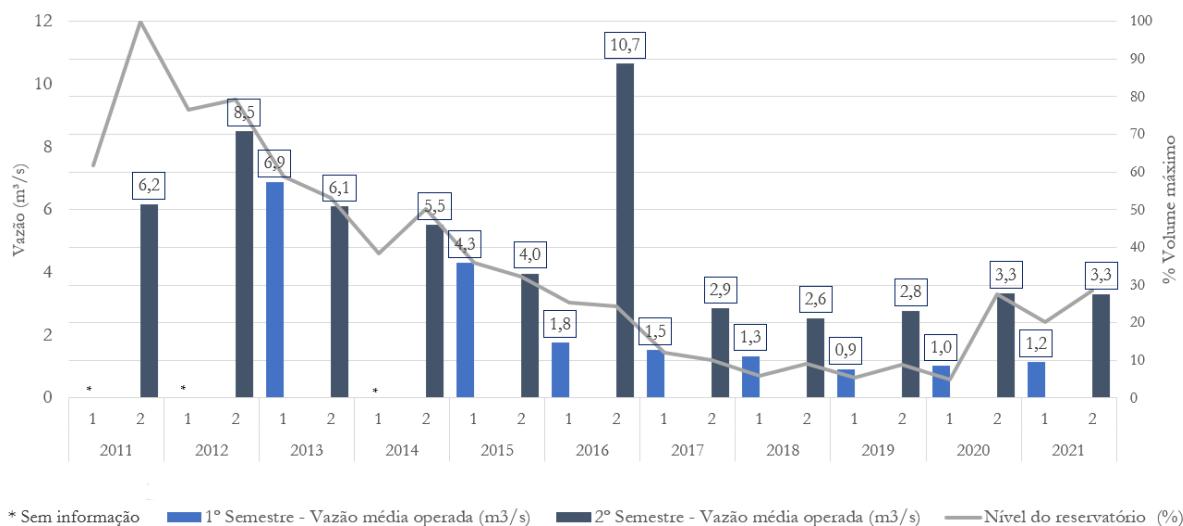
3.3 Resultados e Análises

3.3.1 Validação

A Figura 2 apresenta um histórico das vazões médias alocadas no segundo semestre, e as vazões operadas no primeiro semestre dos anos do período analisado. É possível ainda observar o volume acumulado do reservatório (porcentagem do volume máximo) nestes anos. As vazões operadas referem-se as vazões acordadas para operação no primeiro semestre (entre fevereiro e junho) e as vazões alocadas a decisão para o segundo semestre (julho a janeiro).

Até o ano de 2014, quando o volume do reservatório era superior a 50%, as vazões operadas no segundo semestre eram maiores que 5,5 m³/s. A partir de 2015, houve uma queda significativa nos valores, com os anos de 2018 e 2019 registrando as vazões mais baixas (2,6 e 2,8 m³/s, respectivamente). É importante ressaltar que o ano de 2016 foi marcado pela maior vazão operada no período, com uma média de 10,7 m³/s. Essa elevação na vazão operada está relacionada à necessidade de transferência de água entre os açudes Orós e Castanhão, a fim de suprir a demanda do último açude. Vale destacar que, nesse mesmo ano, o reservatório Castanhão também realizava transferências de água para a Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), o que intensificou os conflitos pelo uso da água nas diferentes regiões (STUDART et al., 2021).

Figura 5 - Histórico das vazões médias operadas (m³/s) e volume acumulado (%) do reservatório Orós dos anos de 2011 a 2021.



Fonte: Atas dos seminários de alocação e reuniões de acompanhamento dos vales do Jaguaribe e Banabuiú entre os anos de 2011 e 2021. Algumas informações não estão disponíveis nas atas e por isso não aparecem no gráfico.

No mesmo período analisado, observa-se uma redução nas vazões operadas durante o primeiro semestre. Em 2013, quando a seca já afetava a bacia, o reservatório liberava cerca de 7 m³/s para atender às demandas. No entanto, a demanda atendida sofreu uma redução significativa, chegando aos valores mais baixos do período em 2019 e 2020 (0,9 e 1,0 m³/s, respectivamente), quando o reservatório estava com menos de 10% de seu volume máximo. Nesse momento, a transferência de água entre os açudes Orós e Lima Campos foi significativamente reduzida, intensificando os conflitos pelo uso da água na região (Ata do XXV Seminário de Alocação Negociada das Águas dos Vales do Jaguaribe e Banabuiú para o ano de 2018.2).

As características do sistema há época da decisão no período entre 2011 e 2021 são apresentadas na Tabela 2. Nela é possível verificar os valores das probabilidades calculadas para cada categoria de previsão, além da precipitação observada na região, e a situação dos reservatórios em cada um dos semestres analisados. Esses dados, juntamente com as vazões operadas apresentadas anteriormente, formam os dados de entradas na validação do modelo Diagrama de Influência.

A Tabela 3 mostra o resultado da validação do DI, exibindo as probabilidades de cada categoria de acumulação prevista pelo modelo, juntamente com a categoria observada no reservatório ao final de cada semestre nos anos de 2013, 2015 a 2021. Além disso, a verossimilhança calculada também é fornecida como medida de avaliação.

Os resultados da simulação demonstram que, em aproximadamente 55% do período analisado, os resultados do modelo indicam a categoria observada como a mais provável. Além disso, a verossimilhança calculada foi de 0,42. É importante ressaltar que, nos períodos em que

o modelo não indica a categoria ocorrida como a mais provável, ele ainda atribui probabilidades acima de 30% para a categoria observada, com exceção dos anos de 2017.2 e 2019.1, nos quais o modelo atribui probabilidades de 16% e 26%, respectivamente, para a categoria que foi observada.

Tabela 2 - Características das variáveis durante o período de 2011 a 2021

| Ano | Semestre | Probabilidade da categoria da Previsão | | Precipitação Observada (mm) | Categoria da precipitação observada | Nível do reservatório (%) ** | Categoria acumulação início do período da decisão | Vazão de alocação (m3/s) | Vazão de operação (m3/s) | Nível do reservatório ao fim período da decisão (%) | Categoria acumulação fim do período da decisão |
|------|----------|--|-------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------------|---|--------------------------|--------------------------|---|--|
| | | Abaixo | Acima | | | | | | | | |
| 2011 | 1 | 33% | 34% | 553,62 | Acima | 61,7 | Alerta | *** | *** | 100,0 | Normal |
| | 2 | * | * | * | * | 100,0 | Normal | 7,7 | 6,2 | 76,6 | Normal |
| 2012 | 1 | 80% | 19% | 322,77 | Abaixo | 76,6 | Normal | *** | *** | 79,3 | Normal |
| | 2 | * | * | * | * | 79,3 | Normal | 9,2 | 8,5 | 58,8 | Alerta |
| 2013 | 1 | 45% | 36% | 250,71 | Abaixo | 58,8 | Alerta | *** | 6,9 | 53,1 | Alerta |
| | 2 | * | * | * | * | 53,1 | Alerta | 8,5 | 6,1 | 38,5 | Seca |
| 2014 | 1 | 44% | 42% | 479,42 | Normal | 38,5 | Seca | 7,0 | *** | 50,1 | Alerta |
| | 2 | * | * | * | * | 50,1 | Alerta | 7,0 | 5,5 | 35,9 | Seca |
| 2015 | 1 | 78% | 21% | 332,60 | Abaixo | 35,9 | Seca | 5,2 | 4,3 | 32,3 | Seca |
| | 2 | * | * | * | * | 32,3 | Seca | 4,0 | 4,0 | 25,2 | Seca Severa |
| 2016 | 1 | 93% | 7% | 245,05 | Abaixo | 25,2 | Seca Severa | 2,5 | 1,8 | 24,4 | Seca Severa |
| | 2 | * | * | * | * | 24,4 | Seca Severa | 11,5 | 10,7 | 12,1 | Seca Severa |
| 2017 | 1 | 20% | 50% | 366,52 | Abaixo | 12,1 | Seca Severa | 3,0 | 1,5 | 10,0 | Seca extrema |
| | 2 | * | * | * | * | 10,0 | Seca extrema | 3,0 | 2,9 | 5,8 | Seca extrema |
| 2018 | 1 | 29% | 31% | 528,41 | Normal | 5,8 | Seca extrema | 1,5 | 1,3 | 9,1 | Seca extrema |
| | 2 | * | * | * | * | 9,1 | Seca extrema | 2,5 | 2,6 | 5,4 | Seca extrema |
| 2019 | 1 | 7% | 50% | 518,10 | Normal | 5,4 | Seca extrema | 1,2 | 0,9 | 8,8 | Seca extrema |
| | 2 | * | * | * | * | 8,8 | Seca extrema | 2,5 | 2,8 | 4,9 | Seca extrema |
| 2020 | 1 | 7% | 26% | 705,96 | Acima | 4,9 | Seca extrema | 1,2 | 1,0 | 27,6 | Seca Severa |
| | 2 | * | * | * | * | 27,6 | Seca Severa | 3,5 | 3,3 | 20,2 | Seca Severa |
| 2021 | 1 | 88% | 12% | 545,19 | Normal | 20,2 | Seca Severa | 1,5 | 1,2 | 28,5 | Seca Severa |
| | 2 | * | * | * | * | 28,5 | Seca Severa | 3,8 | 3,3 | 22,7 | Seca Severa |

* Não se aplica. A previsão climática sazonal é realizada no mês de janeiro para os meses de FEV-MAR-ABR

** O nível do reservatório foi considerado nos dias 01/02 para o 1º semestre e 01/07 para o 2º semestre

*** Não existe informação nas atas das reuniões

Tabela 3 - Validação da Rede de Influência para alocação de água

| Ano | Semestre | Probabilidade da categoria de acumulação ao fim do período da decisão | | | | | | Categoria acumulação fim do período da decisão - Observação | Verossimilhança |
|------------------------|----------|---|-----|-----|-----|-----|----|---|-----------------|
| | | N | A | S | SS | SE | C | | |
| 2013 | 1 | 30% | 62% | 8% | 0% | 0% | 0% | Alerta | 0,62 |
| | 2 | 18% | 29% | 48% | 5% | 0% | 0% | Seca | 0,48 |
| 2015 | 1 | 15% | 16% | 62% | 7% | 0% | 0% | Seca | 0,62 |
| | 2 | 10% | 11% | 44% | 33% | 2% | 0% | Seca Severa | 0,33 |
| 2016 | 1 | 5% | 10% | 20% | 63% | 2% | 0% | Seca Severa | 0,63 |
| | 2 | 2% | 3% | 14% | 39% | 40% | 1% | Seca Severa | 0,39 |
| 2017 | 1 | 6% | 14% | 26% | 52% | 1% | 0% | Seca Severa | 0,52 |
| | 2 | 4% | 7% | 23% | 49% | 16% | 0% | Seca Extrema | 0,16 |
| 2018 | 1 | 4% | 6% | 14% | 44% | 32% | 0% | Seca Extrema | 0,32 |
| | 2 | 3% | 4% | 12% | 40% | 37% | 3% | Seca Extrema | 0,37 |
| 2019 | 1 | 4% | 10% | 12% | 48% | 26% | 0% | Seca Extrema | 0,26 |
| | 2 | 3% | 6% | 13% | 43% | 32% | 3% | Seca Extrema | 0,32 |
| 2020 | 1 | 4% | 7% | 16% | 47% | 26% | 0% | Seca Severa | 0,47 |
| | 2 | 3% | 4% | 13% | 40% | 34% | 6% | Seca Severa | 0,40 |
| 2021 | 1 | 5% | 10% | 21% | 62% | 2% | 0% | Seca Severa | 0,62 |
| | 2 | 3% | 5% | 18% | 53% | 20% | 1% | Seca Severa | 0,53 |
| Verossimilhança | | | | | | | | | 0,42 |

N = Normal, A=Alerta, S=Seca, SS=Seca Severa, SE=Seca Extrema

3.3.2 Cenarização

3.3.2.1 Melhoria da informação

As tabelas 4a e 4b fornecem as probabilidades de acumulação em cada nível do reservatório para cada semestre nos anos considerados, obtidas por meio do modelo de inferência. Além disso, essas tabelas apresentam informações sobre a verossimilhança calculada para diferentes cenários. Esses cenários incluem: ausência de informações climáticas, aprimoramento do modelo de previsão climática sazonal, aprimoramento da modelagem hidrológica e simulação com menor vazão

A verossimilhança é uma medida de probabilidade que indica a quão provável é que a categoria observada seja correta. Ao comparar os resultados do modelo validado com os cenários gerados, podemos avaliar os ganhos e perdas de cada um dos cenários. A Tabela 5

exibe os valores percentuais das verossimilhanças calculadas em relação ao modelo de referência (modelo validado).

Os resultados obtidos mostram que a ausência da informação climática tem impacto negativo a verossimilhança, apresentando uma redução de 6% em relação ao cenário de referência. O cenário de melhoria do modelo de previsão climática sazonal aumentou a verossimilhança da previsão da rede em 6% em comparação ao cenário validado, quanto se utilizou a previsão das categorias de precipitação. A dispersão observada nas respostas do modelo ocorre em parte devido à incerteza na propagação das informações de chuva para a vazão.

O cenário de melhoria da modelagem hidrológica apresentou a maior verossimilhança dentre todos os cenários calculados, atingindo o valor de 0,488 representando um aumento de 17% em relação à verossimilhança do modelo validado. Nesse cenário, os membros apresentaram menor dispersão entre as categorias apontadas.

O cenário simulado com as menores vazões também reduziu a dispersão das probabilidades entre as categorias, por outro lado, apresentou a menor verossimilhança, correspondendo a 0,396, uma diferença significativa de 39%. Este resultado reforça a ideia de que decisões utilizando cenários conservadores para tomada de decisão podem impactos negativamente a chance de utilizar a água visando o aumento dos benefícios. É importante ressaltar que o modelo foi validado utilizando dados de uma década em que a maioria dos anos apresentou vazões na categoria de seca. No entanto, em anos como 2020, em que as previsões indicam condições mais úmidas, o modelo que utiliza a menor vazão prevê uma probabilidade zero do reservatório subir a categoria de seca, enquanto os outros cenários apontam para uma melhora na condição de seca. Essa simulação pode resultar em um elevado grau de arrependimento para o tomador de decisão ao perder a oportunidade de utilizar a água disponível no reservatório.

Tabela 4a- Probabilidade de ocorrência e verossimilhança calculada para os diferentes cenários: Ausência da informação climática, Melhoria do modelo de previsão sazonal.

| Ano | Categoria Observada | Ausência da informação climática | | | | | | | Melhoria do modelo de previsão climática sazonal | | | | | | |
|--------|---------------------|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|----|-----------------|--|-----|-----|-----|-----|----|-----------------|
| | | N | A | S | SS | SE | C | Verossimilhança | N | A | S | SS | SE | C | Verossimilhança |
| 2013.1 | 2 | 35% | 58% | 7% | 0% | 0% | 0% | 0,585 | 1% | 80% | 19% | 0% | 0% | 0% | 0,800 |
| 2013.2 | 3 | 21% | 30% | 45% | 4% | 0% | 0% | 0,452 | 1% | 23% | 66% | 11% | 0% | 0% | 0,657 |
| 2015.1 | 3 | 20% | 20% | 55% | 5% | 0% | 0% | 0,549 | 0% | 3% | 85% | 12% | 0% | 0% | 0,849 |
| 2015.2 | 4 | 13% | 14% | 43% | 28% | 1% | 0% | 0,283 | 0% | 1% | 48% | 47% | 4% | 0% | 0,475 |
| 2016.1 | 4 | 7% | 15% | 26% | 51% | 2% | 0% | 0,514 | 0% | 0% | 8% | 88% | 4% | 0% | 0,880 |
| 2016.2 | 4 | 3% | 5% | 20% | 39% | 33% | 1% | 0,393 | 0% | 0% | 2% | 40% | 57% | 2% | 0,395 |
| 2017.1 | 4 | 7% | 15% | 26% | 51% | 1% | 0% | 0,510 | 0% | 0% | 8% | 88% | 4% | 0% | 0,880 |
| 2017.2 | 5 | 4% | 7% | 24% | 48% | 16% | 0% | 0,162 | 0% | 0% | 4% | 66% | 29% | 1% | 0,292 |
| 2018.1 | 5 | 4% | 6% | 14% | 43% | 34% | 0% | 0,338 | 2% | 3% | 8% | 66% | 21% | 0% | 0,207 |
| 2018.2 | 5 | 3% | 4% | 12% | 39% | 39% | 3% | 0,386 | 2% | 2% | 7% | 56% | 31% | 2% | 0,312 |
| 2019.1 | 5 | 4% | 11% | 13% | 47% | 25% | 0% | 0,253 | 2% | 6% | 7% | 71% | 14% | 0% | 0,140 |
| 2019.2 | 5 | 3% | 6% | 14% | 42% | 32% | 3% | 0,317 | 2% | 3% | 7% | 60% | 26% | 1% | 0,263 |
| 2020.1 | 4 | 4% | 6% | 14% | 43% | 34% | 0% | 0,430 | 9% | 14% | 33% | 39% | 5% | 0% | 0,392 |
| 2020.2 | 4 | 3% | 3% | 11% | 36% | 39% | 8% | 0,365 | 6% | 8% | 27% | 43% | 15% | 1% | 0,426 |
| 2021.1 | 4 | 7% | 15% | 26% | 51% | 2% | 0% | 0,514 | 4% | 9% | 36% | 51% | 0% | 0% | 0,512 |
| 2021.2 | 4 | 4% | 7% | 24% | 48% | 16% | 0% | 0,480 | 3% | 4% | 25% | 52% | 15% | 0% | 0,525 |
| | | | | | | | | 0,389 | | | | | | | 0,441 |

Tabela 4b- Probabilidade de ocorrência e verossimilhança calculada para os diferentes cenários: Melhoria da modelagem hidrológica, vazões baixas.

| Ano | Categoria Observada | Melhoria Modelagem Hidrológica | | | | | | | Menor vazão (2016) | | | | | | |
|--------|---------------------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|----|-----------------|--------------------|-----|-----|-----|------|-----|-----------------|
| | | N | A | S | SS | SE | C | Verossimilhança | N | A | S | SS | SE | C | Verossimilhança |
| 2013.1 | 2 | 0% | 80% | 20% | 0% | 0% | 0% | 0,795 | 0% | 34% | 66% | 0% | 0% | 0% | 0,34 |
| 2013.2 | 3 | 0% | 22% | 66% | 12% | 0% | 0% | 0,662 | 0% | 9% | 53% | 38% | 0% | 0% | 0,53 |
| 2015.1 | 3 | 0% | 0% | 86% | 14% | 0% | 0% | 0,864 | 0% | 0% | 65% | 35% | 0% | 0% | 0,65 |
| 2015.2 | 4 | 0% | 0% | 47% | 49% | 4% | 0% | 0,490 | 0% | 0% | 35% | 54% | 10% | 0% | 0,54 |
| 2016.1 | 4 | 0% | 0% | 5% | 91% | 5% | 0% | 0,909 | 0% | 0% | 0% | 80% | 20% | 0% | 0,80 |
| 2016.2 | 4 | 0% | 0% | 1% | 38% | 59% | 2% | 0,381 | 0% | 0% | 0% | 65% | 33% | 2% | 0,65 |
| 2017.1 | 4 | 0% | 0% | 5% | 91% | 5% | 0% | 0,909 | 0% | 0% | 0% | 89% | 11% | 0% | 0,89 |
| 2017.2 | 5 | 0% | 0% | 2% | 66% | 30% | 1% | 0,304 | 0% | 0% | 0% | 63% | 35% | 2% | 0,35 |
| 2018.1 | 5 | 0% | 0% | 0% | 18% | 82% | 0% | 0,818 | 0% | 0% | 0% | 0% | 100% | 0% | 1,00 |
| 2018.2 | 5 | 0% | 0% | 0% | 15% | 77% | 8% | 0,769 | 0% | 0% | 0% | 0% | 77% | 23% | 0,77 |
| 2019.1 | 5 | 0% | 0% | 0% | 91% | 9% | 0% | 0,091 | 0% | 0% | 0% | 5% | 95% | 0% | 0,95 |
| 2019.2 | 5 | 0% | 0% | 0% | 73% | 26% | 1% | 0,256 | 0% | 0% | 0% | 4% | 86% | 10% | 0,86 |
| 2020.1 | 4 | 13% | 19% | 44% | 25% | 0% | 0% | 0,250 | 0% | 0% | 0% | 0% | 100% | 0% | 0,01 |
| 2020.2 | 4 | 8% | 11% | 36% | 38% | 7% | 0% | 0,376 | 0% | 0% | 0% | 0% | 77% | 23% | 0,01 |
| 2021.1 | 4 | 0% | 0% | 41% | 59% | 0% | 0% | 0,591 | 0% | 0% | 0% | 89% | 11% | 0% | 0,89 |
| 2021.2 | 4 | 0% | 0% | 22% | 60% | 17% | 0% | 0,603 | 0% | 0% | 0% | 66% | 35% | 2% | 0,66 |
| | | | | | | | | 0,488 | | | | | | | 0,396 |

Tabela 5 - Verossimilhanças percentual calculada em relação ao modelo de referência (modelo validado)

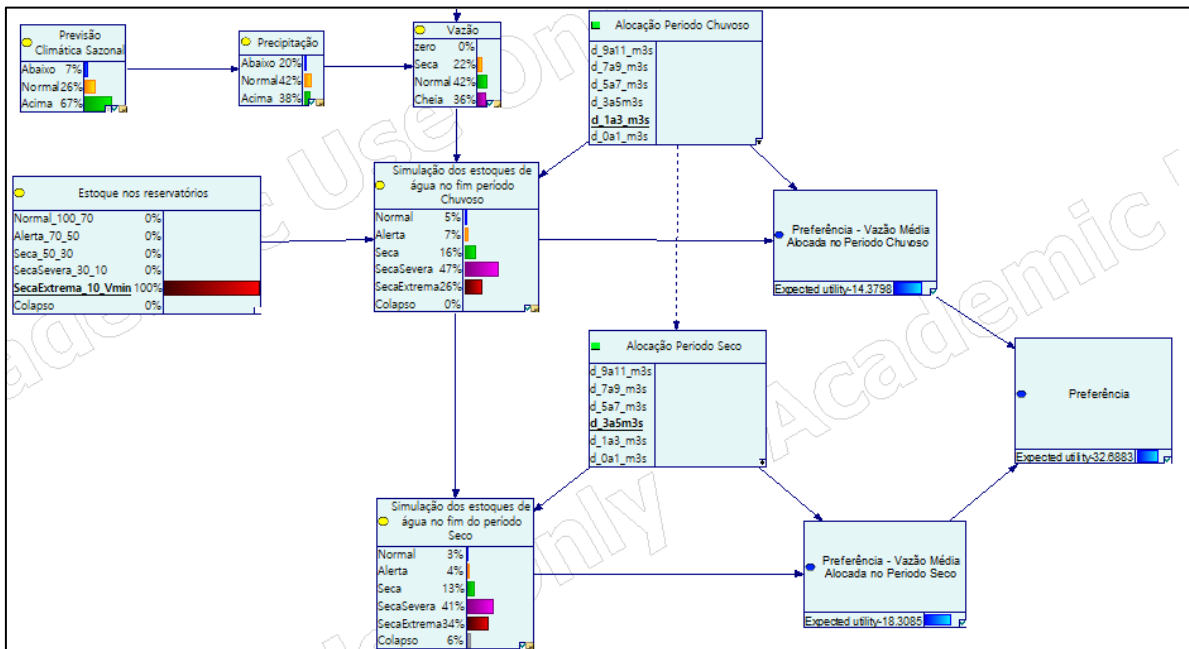
| Cenários | Verossimilhança | Variação |
|--|-----------------|----------|
| Validação (modelo de referência) | 0,416 | 0% |
| Ausência da informação climática | 0,389 | -6% |
| Melhoria do modelo de previsão climática sazonal | 0,441 | 6% |
| Melhoria da modelagem hidrológica | 0,488 | 17% |
| Menor vazão (2016) | 0,396 | -5% |

3.3.2.2 Tomada de decisão baseado no risco

Realizou-se uma simulação com o objetivo de demonstrar o potencial da utilização do modelo para auxiliar a tomada de decisão. Para isso, foram selecionadas informações referentes ao ano de 2020. Neste ano, a previsão climática sazonal indicou uma probabilidade de 7%, 26% e 67% para as categorias abaixo, normal e acima da normal climatológica, respectivamente. O ano apresentou chuvas na categoria acima da normal na região de estudo, no entanto, as vazões foram classificadas como normais. No início da quadra chuvosa, o reservatório Orós estava com um volume de 4,9%, o que corresponde a uma situação de seca extrema. Ao final da quadra chuvosa, o volume do reservatório aumentou para 27,55%, classificado como seca severa. No ano seguinte, o volume atingiu 20,2%, também na categoria de seca severa. É importante ressaltar que a decisão tomada em janeiro, antes do início da quadra chuvosa, foi de 1,5 m³/s, enquanto após a quadra chuvosa, foi de 3,8 m³/s

A Figura 5 apresenta a tela do modelo com a simulação para o ano de 2020. A inferência da previsão climática é propagada pela rede, atualizando as probabilidades condicionais das variáveis Precipitação e Vazão. Como resultado, a propagação da informação apontou uma probabilidade de ocorrência de precipitação de 20% na categoria abaixo da normal, 42% na categoria normal e 38% acima da normal climatológica. Além disso, a probabilidade da variável vazão foi estimada em 22% para a categoria Seca, 42% para a categoria Normal e 36% para a categoria Cheia.

Tabela 6 - Tela do modelo com a simulação para o ano de 2020



A decisão de retirada de água durante o período chuvoso de 1,5 m³/s (categoria d_1a3_m3s) indica uma possibilidade de 47% do reservatório Orós passar para uma categoria superior de seca (Seca Severa) e 26% de permanecer na mesma categoria de seca extrema. No entanto, a situação pode se tornar mais crítica no segundo semestre, quando a retirada de água aumenta para 3,8 m³/s (categoria d_3a5_m3s). Nesse cenário, há uma chance de 41% do reservatório subir para a categoria de seca severa, 34% de permanecer na categoria de seca extrema e 6% do reservatório colapsar.

O modelo, no entanto, nos permite avaliar as diferentes probabilidades de ocorrência de cada categoria do reservatório para as diferentes possibilidades de retirada. A Tabela 7 apresenta as distribuições de probabilidade marginal condicional, saída do modelo para o período úmido.

Tabela 7 - Probabilidade de ocorrência futura de cada categoria do reservatório para diferentes possibilidades de alocação durante o período chuvoso

| Estoque futuro | d_9a11_m3s | d_7a9_m3s | d_5a7_m3s | d_3a5m3s | d_1a3_m3s | d_0a1_m3s |
|----------------|------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| Normal | 5% | 5% | 5% | 5% | 5% | 5% |
| Alerta | 5% | 5% | 7% | 7% | 7% | 11% |
| Seca | 18% | 18% | 16% | 16% | 16% | 14% |
| Seca Severa | 26% | 30% | 36% | 42% | 47% | 49% |
| Seca Extrema | 45% | 42% | 36% | 30% | 26% | 22% |
| Colapso | 2% | 1% | 1% | 1% | 0% | 0% |

Observa-se que para a retirada mais conservadora, variando de 0 a $1\text{m}^3/\text{s}$ (d_{0a1_m3s}), o reservatório possui 49% de chance de subir para a categoria Seca Severa, enquanto possui 22% de permanecer em Seca Extrema e 0% de chegar no Colapso. À medida que as retiradas aumentam, as probabilidades de atingir categorias mais baixas de acumulação aumentam, tendo na decisão d_{3a5_m3s} (retirada entre 3 a $5\text{m}^3/\text{s}$) alguma chance de colapsar, em torno de 1% de probabilidade.

As decisões tomadas nos primeiros semestres influenciam significativamente as possibilidades de colapso ou recuperação do reservatório nos períodos subsequentes. Ao analisar a saída do modelo, podemos observar as distribuições de probabilidade marginal condicional, para cada cenário de retirada no segundo semestre (estação seca), tendo em conta a decisão tomada anteriormente. Para evitar sobrecarregar este trabalho com informações excessivas, decidiu-se focar na distribuição para a decisão d_{1a3_m3s} (Tabela 8), que é a mesma tomada no ano de 2020. Essa decisão é apresentada como um exemplo, tendo em vista que a tabela completa com todas as decisões possíveis seria extensa demais para ser apresentada aqui.

Tabela 8 - Probabilidade de ocorrência futura de cada categoria do reservatório para diferentes possibilidades de alocação durante o período seco, após a decisão de 1 a $3\text{m}^3/\text{s}$ durante o período chuvoso

| Estoque futuro | d_{9a11_m3s} | d_{7a9_m3s} | d_{5a7_m3s} | d_{3a5m3s} | d_{1a3_m3s} | d_{0a1_m3s} |
|----------------|-----------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|
| Normal | 2% | 2% | 3% | 3% | 3% | 3% |
| Alerta | 3% | 3% | 4% | 4% | 5% | 5% |
| Seca | 10% | 11% | 12% | 13% | 14% | 14% |
| Seca Severa | 30% | 35% | 39% | 41% | 44% | 47% |
| Seca Extrema | 44% | 40% | 35% | 34% | 32% | 29% |
| Colapso | 11% | 9% | 8% | 6% | 3% | 2% |

Todos os cenários de decisões apresentaram colapso, tendo o valor variado de 2%, no cenário mais conversador, a 11% no cenário que retira mais água do reservatório. Os cenários d_{0a1_m3s} , d_{1a3_m3s} , d_{3a5m3s} e d_{5a7m3s} possuem a categoria mais provável o cenário de Seca Severa, indicando que, caso a decisão no primeiro semestre fosse d_{1a3_m3s} , o reservatório poderia subir de categoria de seca em qualquer uma dessas retiradas. No entanto, as outras retiradas apontam a categoria mais provável a seca extrema.

Por fim, simulou-se o mesmo ano agora com um cenário de menor vazão dos últimos anos. A Tabela 9 apresenta o resultado do modelo caso ele fosse simulado utilizando o ano de 2016 como cenário de afluência.

Tabela 9- Probabilidade de ocorrência futura de cada categoria do reservatório para diferentes possibilidades de alocação durante o período chuvoso, utilizando um cenário de menores vazões.

| Estoque futuro | d_9_11_m3s | d_7_9_m3s | d_5_7_m3s | d_3a5m3s | d_1a3_m3s | d_0a1_m3s |
|----------------|------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| Normal | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Alerta | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Seca | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Seca Severa | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 5% |
| Seca Extrema | 82% | 84% | 90% | 93% | 100% | 95% |
| Colapso | 18% | 16% | 10% | 7% | 0% | 0% |

As probabilidades dos estados mais graves aumentam significativamente em relação a simulação anterior, tendo somente no cenário d_0a1_m3s a possibilidade de aumentar o nível do reservatório. Nos cenários d_7_9_m3s e d_9_11_m3s o reservatório tem chances de chegar ao colapso superior a 10%. A Tabela 10 mostra o resultado caso a decisão tomada no primeiro semestre fosse d_1a3_m3s.

Tabela 10 - Probabilidade de ocorrência futura de cada categoria do reservatório para diferentes possibilidades de alocação durante o período seco, após a decisão de 1 a 3m³/s durante o período chuvoso, utilizando um cenário de menores vazões.

| Estoque futuro | d_9_11_m3s | d_7_9_m3s | d_5_7_m3s | d_3a5m3s | d_1a3_m3s | d_0a1_m3s |
|----------------|------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| Normal | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Alerta | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Seca | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Seca Severa | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Seca Extrema | 58% | 66% | 69% | 77% | 90% | 92% |
| Colapso | 42% | 34% | 31% | 23% | 10% | 8% |

Observa-se que, nos cenários com retiradas mais elevadas, a probabilidade do reservatório atingir a categoria de Colapso é mais alta, enquanto nos cenários com alocações mais baixas, a probabilidade do reservatório permanecer na categoria de Seca Extrema é maior. As chances do reservatório colapsar aumentam significativamente, variando de 8% no cenário de d_0a1_m3s a 42% no cenário d_9_11_m3s. Independentemente do cenário considerado, é importante ressaltar que o risco de colapso do reservatório é significativo e possivelmente seria levado em consideração ao tomar a decisão.

O risco de colapso indicado nas simulações apresentou-se maior no cenário que se considerou somente as menores vazões dos últimos anos. Esse fato reforçaria a tomada de decisão com valores mais baixos de retirada devido os riscos de o reservatório secar. Ao simular o reservatório com a previsão climática, percebe-se que existem chances de o reservatório

augmentar de volume, o que poderia permitir uma decisão mais ousada em relação às vazões de retirada. Independentemente do tipo de simulação (menores vazões ou considerando a previsão sazonal), o modelo é capaz de simular com facilidade essas diferentes opções, não exigindo o uso de tabelas e gráficos e várias simulações de retiradas.

3.3.2.3 Tomada de decisão baseada no sistema de preferência

O mesmo ano de 2020 foi analisado utilizando a métrica de preferência da alocação para tomar a decisão. Quatro cenarizações foram realizadas com o intuito de verificar como a métrica criada poderia influenciar a decisão: utilização da previsão climática sazonal, ausência da informação climática, melhoria do modelo de previsão climática sazonal e menores vazões.

A Tabela 11 apresenta os resultados calculados, a partir do sistema de preferências utilizado, para as diferentes possibilidades de decisão de alocação nos os cenários simulados no período chuvoso e seco. É possível ver em destaque na tabela a decisão que traz o maior valor de preferência. Os resultados revelam que diferentes decisões podem ser tomadas dependendo da qualidade da informação prévia.

O cenário que incorpora a previsão climática sazonal indicou que o maior resultado aconteceria caso a decisão no primeiro semestre tomada fosse 3 a 5 m³/s no segundo semestre de 5 a 7 m³/s, com resultado gerado de -28. No cenário em que não existe a informação da previsão, a incerteza relacionada a precipitação apresenta maior dispersão dos membros, o que leva o modelo a indicar de alocação de 1 a 3 m³/s durante o período chuvoso e de 5 a 7 m³/s no período seco. Essa decisão reflete um resultado de -40,1, valor menor que o cenário anterior onde se levou em conta a previsão.

A melhoria do modelo de previsão climática possibilita um resultado ainda maior para o tomador de decisão. Neste caso, o modelo indicou uma retirada de valores altos do reservatório, tendo no primeiro semestre o valor de 9 a 11 m³/s e no segundo semestre 7 a 9 m³/s. Este fato é ocasionado pela alta probabilidade do modelo subir da categoria de seca extrema para a seca, mesmo com altos valores de retirada.

Por fim, o resultado gerado no cenário em que se utiliza as menores vazões da série histórica são os mais baixos de todos os cenários analisados. Os valores apontam para um resultado de -115, sendo a decisão da alocação indicada como 1 a 3 m³/s nos dois períodos do ano.

Tabela 11 – Resultado gerado em cada decisão durante o período chuvoso e seco com base em diferentes cenários de simulações.

| Previsão climática | | Alocação Período Seco | | | | | |
|--------------------------|------------|-----------------------|-----------|--------------|----------|-----------|-----------|
| | | d_9a11_m3s | d_7a9_m3s | d_5a7_m3s | d_3a5m3s | d_1a3_m3s | d_0a1_m3s |
| Alocação Período Chuvoso | d_9a11_m3s | -47,9 | -37,2 | -36,7 | -38,8 | -40,9 | -47,9 |
| | d_7a9_m3s | -41,1 | -30,7 | -30,4 | -32,6 | -34,7 | -41,7 |
| | d_5a7_m3s | -38,5 | -28,6 | -28,4 | -30,8 | -33,3 | -40,1 |
| | d_3a5m3s | -37,4 | -28,1 | -28,0 | -30,6 | -33,5 | -40,1 |
| | d_1a3_m3s | -38,7 | -29,8 | -29,9 | -32,5 | -35,6 | -42,2 |
| | d_0a1_m3s | -41,4 | -33,2 | -33,6 | -36,5 | -39,9 | -46,5 |

| Ausência da informação climática | | Alocação Período Seco | | | | | |
|----------------------------------|------------|-----------------------|-----------|--------------|----------|-----------|-----------|
| | | d_9a11_m3s | d_7a9_m3s | d_5a7_m3s | d_3a5m3s | d_1a3_m3s | d_0a1_m3s |
| Alocação Período Chuvoso | d_9a11_m3s | -62,2 | -50,3 | -49,4 | -51,1 | -52,6 | -59,7 |
| | d_7a9_m3s | -54,5 | -42,8 | -42,0 | -43,8 | -45,4 | -52,4 |
| | d_5a7_m3s | -52,5 | -41,3 | -40,7 | -42,6 | -44,4 | -51,3 |
| | d_3a5m3s | -51,7 | -41,1 | -40,5 | -42,6 | -44,8 | -51,5 |
| | d_1a3_m3s | -50,6 | -40,5 | -40,1 | -42,3 | -44,7 | -51,3 |
| | d_0a1_m3s | -54,2 | -44,8 | -44,6 | -47,1 | -49,8 | -56,4 |

| Melhoria do modelo de previsão climática sazonal | | Alocação Período Seco | | | | | |
|--|------------|-----------------------|-------------|-----------|----------|-----------|-----------|
| | | d_9a11_m3s | d_7a9_m3s | d_5a7_m3s | d_3a5m3s | d_1a3_m3s | d_0a1_m3s |
| Alocação Período Chuvoso | d_9a11_m3s | 16,3 | 20,5 | 18,1 | 13,7 | 8,5 | 1,2 |
| | d_7a9_m3s | 15,7 | 19,7 | 17,3 | 12,8 | 7,5 | 0,2 |
| | d_5a7_m3s | 14,5 | 18,0 | 15,5 | 10,8 | 5,3 | -1,9 |
| | d_3a5m3s | 10,8 | 14,0 | 11,4 | 6,6 | 1,0 | -6,1 |
| | d_1a3_m3s | 3,2 | 6,4 | 3,8 | -1,0 | -6,8 | -13,9 |
| | d_0a1_m3s | 0,9 | 3,0 | -0,1 | -5,3 | -11,5 | -18,7 |

| Menores Vazões | | Alocação Período Seco | | | | | |
|--------------------------|------------|-----------------------|-----------|-----------|----------|---------------|-----------|
| | | d_9a11_m3s | d_7a9_m3s | d_5a7_m3s | d_3a5m3s | d_1a3_m3s | d_0a1_m3s |
| Alocação Período Chuvoso | d_9a11_m3s | -159,2 | -139,9 | -136,0 | -135,8 | -134,8 | -141,9 |
| | d_7a9_m3s | -147,3 | -128,1 | -124,3 | -124,0 | -122,9 | -130,0 |
| | d_5a7_m3s | -140,5 | -121,5 | -117,9 | -117,4 | -115,8 | -122,9 |
| | d_3a5m3s | -142,7 | -123,8 | -120,2 | -119,7 | -117,8 | -125,0 |
| | d_1a3_m3s | -140,3 | -121,6 | -118,2 | -117,5 | -115,0 | -122,3 |
| | d_0a1_m3s | -143,1 | -124,9 | -121,6 | -121,0 | -118,8 | -126,0 |

3.4 Discussão

A abordagem sócio-natural na gestão de águas busca integrar os aspectos sociais e naturais envolvidos na utilização, conservação e governança dos recursos hídricos, reconhecendo que esses aspectos são interdependentes e acoplados. Ela visa compreender e considerar os valores, necessidades e percepções dos usuários, sociedade civil e poder público, bem como os processos hidrológicos que ocorrem na bacia, a fim de promover uma gestão sustentável e equitativa dos recursos hídricos. Nesse contexto, os diagramas de influência são ferramentas valiosas para representar as relações entre esses elementos. Neste estudo propomos uma metodologia para a tomada de decisão através da criação de um modelo de suporte à decisão para a alocação de águas de curto prazo, utilizando uma abordagem sócio-natural através da construção de um diagrama de influência. O diagrama de alocação proposto é composto por nós e arestas que representam as variáveis e suas relações mútuas. Nesse diagrama, os aspectos naturais são representados pelas variáveis de previsão climática, precipitação e vazão, enquanto as componentes sociais são representadas pela infraestrutura hidráulica de acumulação e pelas decisões de alocação.

A interação complexa entre essas variáveis tem um impacto significativo na disponibilidade hídrica de curto prazo. Dessa forma, a quantidade de água alocada é uma variável de decisão que afetará diretamente a segurança hídrica da bacia. É importante ressaltar que as decisões tomadas no curto prazo podem ter efeitos de longo prazo, conforme destacado por Di Baldassarre (2019) e Medeiros e Silvapalan (2021).

A análise da alocação de águas no Ceará revelou uma mudança no padrão de consumo das demandas da bacia ao longo dos 10 anos analisados. No início do período, a disponibilidade hídrica incentivou a alocação de grandes volumes de água no reservatório, mesmo durante os períodos chuvosos. Durante os primeiros anos da seca que ocorreu no período de 2012 a 2017 (Pontes Filho et al., 2022), as alocações de água do reservatório mantiveram-se em valores acima de 7 m³/s, indicando que a seca meteorológica não foi imediatamente percebida na região. Somente em 2015, quando a seca hidrológica já estava em curso, ocorreu uma redução na alocação de água do reservatório, conforme também apontado por Estácio et al. (2022).

No entanto, as consequências desta seca parecem ter alterado o comportamento dos usuários da bacia, levando a decisões mais conservadoras baseadas apenas na capacidade de acumulação atual dos mananciais. Essa abordagem conservadora, que não leva em consideração as previsões de chuvas acima da média na região, como a do ano de 2021, reflete

o modo de como as decisões foram realizadas na primeira reunião de alocação da bacia do Jaguaribe em 1994 (SOUZA FILHO, 2022).

O modelo de redes de inferência foi capaz de representar as categorias mais prováveis de acumulação no período analisado. O modelo sugeriu que a melhoria da informação, seja ela a informação climática ou a informação hidrológica, aumentariam o poder de previsibilidade da rede. Os resultados obtidos na simulação indicam que o risco de colapso do reservatório é maior no cenário em que são consideradas as menores vazões, ou quase nulas, o que influenciaria a decisão por valores de retirada mais baixo para evitar o esgotamento do reservatório.

Contudo, a simulação realizada incorporando informação da previsão climática sugere que há chances de aumento de volume no reservatório, o que poderia permitir uma decisão mais ousada em relação às vazões de retirada. As decisões conservadoras, utilizando vazões afluentes baixas, como a que é atualmente utilizada, produz uma perda no custo de oportunidade da água estocada no manancial. Este foi reforçado Sankarasubramanian et al. (2009) em um estudo que trabalhou a melhoria a incorporação da previsão climática em um modelo de alocação. A melhoria da informação hidrológica também melhorou a previsibilidade em relação ao uso da climatologia. De fato, o objetivo da previsão de vazão é minimizar a incerteza ao usar a série histórica, tanto na estimativa do valor médio quanto na redução da variabilidade das vazões usadas para criar um cenário de alocação (SOUZA FILHO, 2005).

Destacamos que o modelo proposto se diferencia de outros modelos de previsão hidrológica aplicados na mesma região de estudo, como Sankarasubramanian et al. (2009), Souza Filho e Lall (2004) ou Block et al. (2009) pelo fato de não ser uma metodologia que agregue uma cascata de modelos. Nosso modelo integra em um único modelo toda uma cadeia de decisão, perpassando pelas diferentes componentes que integrariam a tomada de decisão da alocação, incluindo a avaliação do risco e antecipação do conflito. A análise de risco desempenha um papel fundamental nos estudos hidrológico sendo essencial para embasar políticas de infraestrutura emergencial ou acionar os seguros e compensações financeiras (SILVA, 2015, SANKARASUBRAMANIAN et al., 2009).

A opção de simulação de diversos cenários de alocações permite a antecipação do conflito em relação ao uso de água. A capacidade de antecipar conflitos é a habilidade de prever ou identificar potenciais conflitos antes que eles ocorram, sendo crucial para evitar impactos negativos. Isso, no entanto, requer uma compreensão das dinâmicas interpessoais, análise de situações e conhecimento das questões envolvidas. Os setores de irrigação e abastecimento urbano frequentemente entram em conflito devido à quantidade de água disponível e às

necessidades futuras. Em períodos de escassez, a demanda pode exceder a oferta, levando a restrições de uso, como racionamentos. Essas restrições afetam o modo de vida das pessoas e podem envolver diminuição da área irrigada, restrições de acesso à água para novos usuários e impactos na produção industrial e nos serviços.

3.5 Conclusão

O desenvolvimento de um modelo de alocação de água utilizando uma abordagem socio-hidrológica é de extrema importância para a gestão eficiente dos recursos hídricos. Neste estudo, exploramos alguns aspectos desse modelo e as contribuições que ele pode oferecer para o processo de tomada de decisão.

Uma das características desse modelo é sua capacidade de acoplar informações quantitativas e qualitativas, fornecendo uma base para a tomada de decisão em recursos hídricos. O modelo proposto leva em consideração não apenas os dados quantitativos relacionados à precipitação, vazão ou disponibilidade de água, mas também aspectos qualitativos, como as preferências dos tomadores de decisão. Desde a informação de previsão climática até um sistema de preferência, o modelo é capaz de integrar toda a cadeia causal da alocação de curto prazo fornecendo informações para um processo decisório que incorpore a incerteza e os riscos.

É preciso ressaltar, no entanto, que a melhoria das informações utilizadas no modelo é essencial para garantir a confiabilidade das inferências realizadas. A coleta de mais dados, a incorporação de conhecimento especializado e o uso de técnicas avançadas, como o aprendizado de máquina, podem contribuir para aprimorar a previsibilidade e confiabilidade das inferências feitas pelo modelo.

Outro ponto importante é a natureza lógica e visual do diagrama de inferência utilizado para construir o modelo. Essa característica facilita a compreensão e a contribuição de especialistas e não especialistas no processo de desenvolvimento, permitindo uma maior diversidade de perspectivas e conhecimentos. Para obter uma maior aceitação e aplicabilidade do modelo, é fundamental envolver as partes interessadas em seu desenvolvimento. Através de uma abordagem participativa, as partes interessadas têm a oportunidade de contribuir com suas perspectivas e conhecimentos, tornando o modelo mais completo, inclusivo e legitimado pelos envolvidos.

Por fim, a alocação de água é um instrumento fundamental para a negociação de conflitos entre diferentes setores e usuários. Seja entre regiões, entre usos de irrigação e abastecimento urbano, ou entre usuários de um mesmo setor, a alocação de água desempenha

um papel central na busca pela equidade e sustentabilidade. O modelo desenvolvido neste estudo fornece uma base para abordar esses conflitos, podendo considerar diferentes interesses e necessidades, e promovendo uma gestão mais eficiente e equitativa dos recursos hídricos.

4 MODELAGEM COLABORATIVA PARA CONSTRUIR UMA POLÍTICA DE SALVAGUARDAS PARA GESTÃO DE SECAS EM SISTEMAS DE RESERVATÓRIOS⁸

4.1 Introdução

A gestão da seca desempenha um papel crucial na redução dos impactos negativos da escassez de água e da variabilidade climática. Historicamente, a gestão da seca tem sido realizada de forma reativa, com foco em respostas de emergência e ênfase na gestão de crises. No entanto, essa abordagem é ineficiente em comparação com a gestão de riscos, que se concentra em planos de preparação e ações de mitigação da seca (GUTIÉRREZ et al. 2014; WILHITE et al., 2014; CAMPOS, 2015; RUBIO-MARTIN et al., 2020). As respostas para mitigar a vulnerabilidade à seca podem ocorrer a longo prazo, por meio da construção de reservatórios (DI BALDASSARRE et al., 2018), ou a curto prazo, por meio de restrições de demanda durante períodos de baixa vazão ou transferência entre sistemas (JAEGER et al., 2019).

A gestão de riscos de seca depende de indicadores para detectar as condições em um local e acionar medidas de mitigação (STEINEMANN, 2003; ZANIOLO et al., 2018). Vários indicadores têm sido usados para caracterizar a seca, como o Índice Padronizado de Precipitação (MCKEE et al., 1993; ADNAN et al., 2018), Índice Padronizado de Evapotranspiração e Precipitação (SHUKLA; WOOD 2008; VICENTE-SERRANO et al., 2010; ADNAN et al., 2018) uma combinação de índices (SHAH; MISHRA, 2020), além de índices baseados nos níveis de armazenamento de reservatórios (ESTRELA et al., 2006; YASA et al., 2018). Zaniolo et al. (2018) apresentaram um modelo para o desenvolvimento automático de índices de seca que é aplicável até mesmo em sistemas de água altamente regulados.

Nas regiões que frequentemente enfrentam períodos secos, a operação do sistema de reservatórios geralmente é baseada na restrição estratégica de água (TU et al., 2003) para garantir que haja água disponível para uso futuro, os operadores reduzem as liberações de água quando os reservatórios atingem determinados níveis (LUND; REED, 1995; LOUCKS; BEEK,

⁸ Este capítulo foi publicado em inglês no *Journal of Water Resources Planning and Management* em janeiro de 2023.

2005; KUMAR; KASTHURIRENGAN, 2018). Essa política operacional, chamada de salvaguarda, em inglês *hedging*, cria um equilíbrio entre atender às necessidades de múltiplos usuários de água e manter uma reserva para uso quando a disponibilidade de água for menor. A principal característica da política de salvaguarda é a redução na frequência e nos custos de grandes falhas, ao mesmo tempo em que aumenta as falhas menores (SHIH; REVELLE, 1995; DRAPER; LUND, 2004; YOU; CAI, 2008; KUMAR; KASTHURIRENGAN, 2018; SUN et al., 2018; ASHRAFI, 2021).

Embora seja utilizado uma ampla modelagem matemática, as políticas de salvaguardas de reservatórios vão além de uma questão numérica e devem considerar a complexidade da alocação de água (por exemplo, o sistema socioecológico e os interesses concorrentes das partes envolvidas) para serem efetivamente implementadas (SHIH; REVELLE, 1995; LANGSDALE et al., 2013; VAN DEN BELT; BLAKE, 2015).

Várias abordagens têm sido utilizadas para definir regras ótimas de *hedging* para a gestão de secas em sistemas de reservatórios (PENG et al., 2015; ASHOFTEH et al., 2017; SUN et al., 2018; YAN et al., 2018; CHANG et al., 2019; JIN; LEE, 2019; ASHRAFI, 2021; BAYESTEHE; AZARI, 2021). A maioria das pesquisas concentra-se em definir os melhores gatilhos (ou seja, índices de seca) ou responder matematicamente a perguntas como "quando fazer restrição?" e "quanta restrição fazer?", minimizando a vulnerabilidade do sistema (ou seja, déficit máximo em um único período) ou maximizando os benefícios econômicos (NEELAKANTAN; SASIREKA, 2015).

Para melhorar os modelos numéricos, com o objetivo de obter resultados aceitos pelas partes interessadas, abordagens de modelagem colaborativa, conhecidas como modelagem com visão compartilhada (em inglês, *shared vision management*), têm sido aplicadas na gestão de recursos hídricos (LANGSDALE et al., 2013; PALMER et al., 2013; VON STACKELBERG; NEILSON, 2014; VAN DEN BELT; BLAKE, 2015; BROWN et al., 2015). Recentemente, uma abordagem de modelagem colaborativa foi aplicada na Grande Barragem do Renascimento Etíope (*Grand Ethiopian Renaissance Dam*) para melhorar a eficiência da operação do reservatório em períodos secos e úmidos, aumentando a resiliência e os benefícios econômicos para a região (BASHEER et al., 2021). Em comparação com os sistemas clássicos de suporte à decisão (SSDs), nos quais modelos computacionais são desenvolvidos para auxiliar as decisões das partes interessadas (KOUTSOYIANNIS et al., 2002; ALEMU et al., 2011), na modelagem colaborativa os modelos são construídos com a participação das partes interessadas na maioria dos processos de modelagem (SANDOVAL-SOLIS et al., 2013). Além da modelagem colaborativa, técnicas de tomada de decisão robusta

(TDR), como a tomada de decisão robusta com múltiplos objetivos (MORDM) (KASPRZYK et al., 2013), são capazes de incluir as preferências das partes interessadas na otimização de sistemas sob profunda incerteza, e a sua aplicação na operação de reservatórios está bem estabelecida (HERMAN et al., 2015; KWAKKEL et al., 2016).

Este capítulo apresenta uma abordagem de modelagem colaborativa para definir curvas de salvaguardas para a operação de reservatórios. As duas questões de *hedging* (Quanto e quando) são respondidas incluindo as partes interessadas na definição dos riscos toleráveis e, em seguida, aplicando ferramentas de otimização multiobjetivo para determinar os parâmetros das curvas de salvaguardas. Essas curvas incorporam as preferências dos usuários e gestores de água e podem ser usadas para a gestão de secas em sistemas nos quais a alocação de água é descentralizada e participativa.

A abordagem colaborativa proposta é baseada em um estudo de caso da região Jaguaribe-Metropolitana, no estado do Ceará, Brasil, uma região marcada por secas recorrentes e um processo de alocação descentralizada e participativa, estabelecido na Política Estadual de Recursos Hídricos do Ceará (CEARÁ, 2010). No Ceará, as decisões de alocação de água a curto prazo são implementadas por meio de audiências públicas (SOUZA FILHO, 2005), um mecanismo de alocação baseado nas preferências dos usuários. Esse processo de alocação coloca o Ceará em uma posição pioneira em termos de alocação de água no Brasil (AQUINO et al., 2013; SILVA et al., 2013).

A metodologia proposta foi desenvolvida para um sistema de dois reservatórios com transferência de água entre eles. Entretanto, a metodologia pode ser aplicada a vários sistemas de reservatórios usando modelos reservatórios equivalentes (ARVANITIDIS; ROSING, 1970; KOUTSOYIANNIS; ECONOMOU, 2003a; BRANDÃO, 2010; MUKHOPADHYAY et al., 2021). Isso foi feito no estudo de caso, onde o uso de dois reservatórios equivalentes permitiu a aplicação da abordagem proposta a um sistema de sete reservatórios.

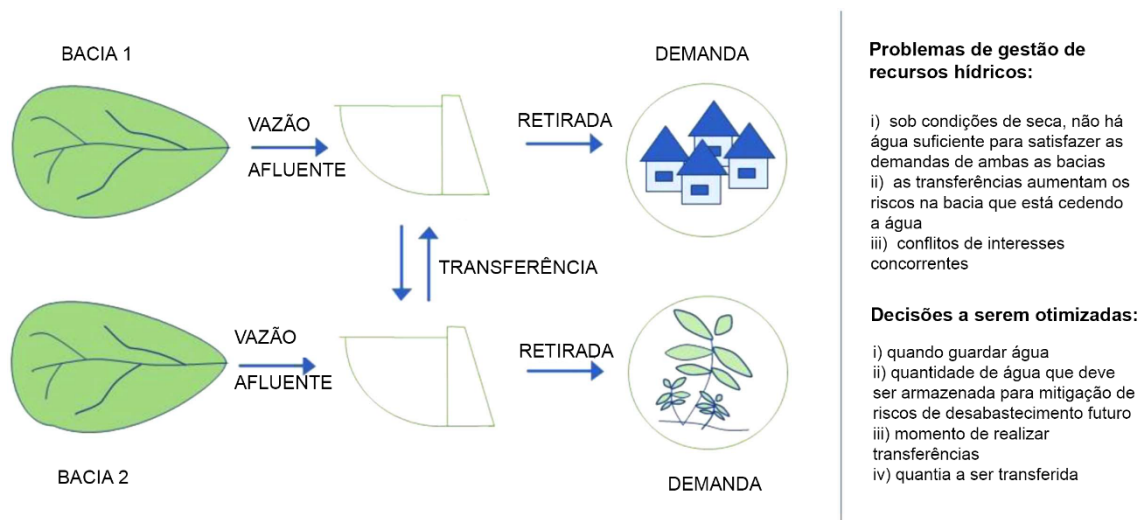
Reservatórios equivalentes são uma simplificação comum usada para superar a "maldição da dimensionalidade" (KOUTSOYIANNIS; ECONOMOU, 2003a), adicionando as características de um sistema complexo de vários reservatórios em um reservatório hipotético único, resultando em um número reduzido de variáveis a serem otimizadas. Koutsoyiannis e Economou (2003b) e Mukhopadhyay et al. (2021) mostraram que, para maximização de liberação, determinação de confiabilidade e maximização das produções de energia hidrelétrica, o modelo de reservatório equivalente tem desempenho semelhante a um modelo desagregado. Discutir os impactos dessa simplificação na política resultante do estudo de caso é um objetivo

específico desta pesquisa.

4.2 Metodologia

Esta abordagem é proposta para auxiliar na gestão de longo prazo de secas em um sistema de reservatórios de duas bacias (Figura 6), onde há uma transferência controlada de água entre elas (ou seja, a água pode ser transferida de uma bacia para outra como uma decisão de alocação de água). Nesse tipo de sistema, os valores de transferência de água e os valores de racionamento de demanda (ou seja, uma parte da demanda de água que não deve ser atendida para priorizar o armazenamento de água para períodos futuros) devem ser definidos em cada bacia para os diferentes estados do sistema (por exemplo, estados de seca).

Figura 6 - Esquema de um sistema de reservatórios com transferência entre duas bacias



A abordagem proposta reduz conflitos usando práticas de modelagem colaborativa para permitir que as partes interessadas definam colaborativamente riscos aceitáveis e valores de transferência razoáveis. A operação do sistema é posteriormente otimizada para atender a esses critérios, resultando em uma regra de *hedge* politicamente viável. A modelagem colaborativa é o termo usado para descrever todas as abordagens que integram as partes interessadas na modelagem, com processos participativos para informar decisões sustentáveis sobre recursos naturais (LANGSDALE et al., 2013). Essa abordagem pode resultar em um equilíbrio de interesses, redução de custos e atrasos legais e aumento da sustentabilidade da política adotada. Para alcançar isso de forma eficaz, as partes interessadas devem estar diretamente envolvidas no desenvolvimento de modelos, cenários e políticas, bem como na

avaliação de seu desempenho (BASCO-CARRERA et al., 2017). Princípios, exemplos e práticas corretas de modelagem colaborativa podem ser encontrados em Langsdale et al. (2013).

Os procedimentos de pesquisa e a estratégia metodológica são divididos em três partes principais: (1) definição colaborativa de riscos toleráveis pelos usuários e gestores de água; (2) definição das curvas de salvaguarda otimizando o sistema de reservatórios para atender aos riscos aceitáveis; e (3) simulação e validação das regras de operação com salvaguarda. Na abordagem proposta, as partes interessadas participam diretamente das etapas (1) e (3). Elas são responsáveis por fornecer informações sobre as transferências de água e as proporções e frequências de racionamento que serão otimizadas na etapa (2). Elas também avaliam o desempenho das políticas geradas e, se necessário, redefinem os riscos.

4.2.1 Definição de riscos toleráveis

Para garantir a eficiência dos processos participativos, as partes interessadas são questionadas sobre os seus interesses, e a metodologia e os resultados esperados são explicados, bem como as decisões que serão necessárias e a forma como isso definirá a política resultante. Em seguida, pede-se que preencham a Figura 7 com: (i) a frequência de tempo admitida da bacia em cada estado de seca; (ii) os coeficientes de racionamentos para cada bacia em cada estado de seca; (iii) as transferências de água entre as bacias para cada estado de seca (os valores são positivos se a transferência for da bacia um para a bacia dois, e negativos se não for).

A frequência de tempo admitida da bacia em cada estado de seca é definida como a porcentagem máxima de tempo que os tomadores de decisão aceitam que a bacia esteja em cada estado de seca. O coeficiente de racionamento é definido como a porcentagem da demanda total da bacia que não deve ser satisfeita em cada estado de seca, podendo também ser considerado como uma limitação à retirada de água. Assim, a Figura 7 representa uma matriz de compromisso entre o abastecimento de água e os estados de seca. Os estados de seca, juntamente com as respectivas taxas de racionamento e frequência, foram considerados as formas mais simples e claras para os agentes definirem o risco tolerável e compreenderem o seu impacto na operação do sistema.

Figura 7 – Tabela de preenchimento para definição de riscos toleráveis de escassez de água e valores limite de transferência de água para um sistema de reservatórios com transferência de água entre duas bacias.

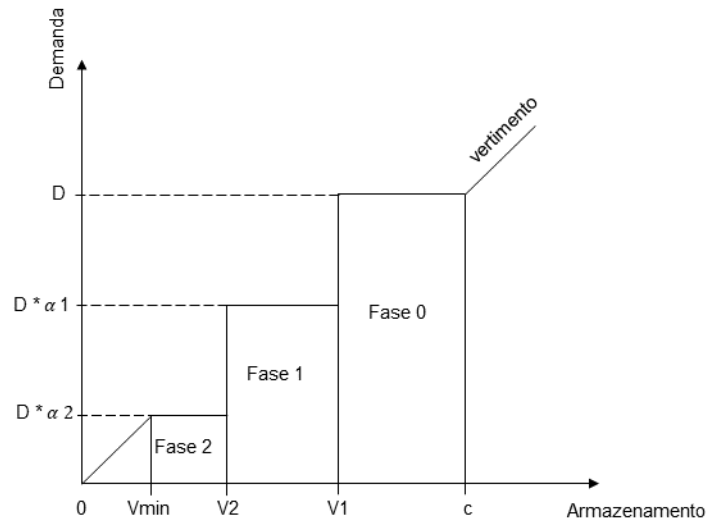
| | | Frequência de Racionamento % | | |
|--------------------------|------------------|--|------------------|------------------|
| Sistema de Reservatórios | | Estado de Seca 0 | Estado de Seca 1 | Estado de Seca 2 |
| Sistema 1 | | | | |
| Sistema 2 | | | | |
| | | | | |
| | | Fração de racionamento | | |
| Sistema de Reservatórios | | Estado de Seca 0 | Estado de Seca 1 | Estado de Seca 2 |
| Sistema 1 | | | | |
| Sistema 2 | | | | |
| | | | | |
| | | Trade-off de Transferência de água (m ³ /s) | | |
| | | Sistema 2 | | |
| | | Estado de Seca 0 | Estado de Seca 1 | Estado de Seca 2 |
| Sistema 1 | Estado de Seca 0 | | | |
| | Estado de Seca 1 | | | |
| | Estado de Seca 2 | | | |

4.2.2 Modelo de operação de reservatórios com salvaguardas

O modelo é baseado na regra operação com salvaguarda discreta proposta por Shih e ReVelle (1995) para um único reservatório com liberação mensal. O critério de desempenho adotado pelo modelo clássico dos autores é maximizar o número de meses sem racionamento. No entanto, no modelo proposto, a otimização busca minimizar a diferença entre as frequências de tempo nas fases de racionamento e aquelas definidas como admissíveis pelas partes interessadas na Figura 7. O modelo proposto também adiciona as transferências entre bacias em função do estado de seca em cada reservatório, conforme também definido na mesma figura. Assim, os dois reservatórios são operados em conjunto como um sistema, sendo um modelo de dois reservatórios, diferente do modelo clássico de reservatório único.

O modelo é detalhado nas equações 1 a 20 para um sistema de dois reservatórios com três fases de racionamento (0 - sem racionamento; 1 - primeira fase de racionamento (ou estado de seca 1; 2 - segunda fase de racionamento, ou estado de seca 2) que são definidas por dois gatilhos de armazenamento atuais (Figura 8).

Figura 8 - Regra de operação com salvaguarda discreta.



A função objetivo definida na equação 1 minimiza a diferença quadrática entre as frequências das fases de racionamento definidas e simuladas, que são determinadas para cada reservatório pelos pesos w_1 e w_2 . Ela pode ser tratada como uma função objetivo única, como mostrado na equação 8, ou como uma função multiobjetivo, onde ambos os termos da função devem ser minimizados em vez da minimização de sua soma. A vantagem da abordagem multiobjetivo é que permite a avaliação dos compromissos de atribuição de água entre as bacias.

$$\min w_1 * \sum_{b=1}^2 \left(\frac{n_{1,b}}{N} - f_{1,b} \right)^2 + w_2 * \sum_{b=1}^2 \left(\frac{n_{2,b}}{N} - f_{2,b} \right)^2 \quad (8)$$

Onde,

$n_{1,b}$ = são as variáveis de decisão, ou seja, o número de períodos em que o reservatório i está na fase de racionamento b ; desconhecido.

N = número total de períodos de simulação; conhecido.

$f_{i,b}$ = a frequência definida em que o reservatório i está na fase b de racionamento; conhecida da Figura 7.

w_i = pesos da função objetivo do reservatório i ; conhecidos.

As equações 9 a 12, juntamente com a restrição dos números inteiros, garantem que as variáveis y são 1 quando o armazenamento atual do reservatório é inferior ao respectivo gatilho de armazenamento, e 0 caso contrário.

$$y_{1,i,t} \geq \frac{(V_{1,i,p} + \varepsilon) - S_{i,t}}{M} \quad (9)$$

$$y_{1,i,t} \leq 1 - \frac{S_{i,t} - (V_{1,i,p} + \varepsilon)}{M} \quad (10)$$

$$y_{2,i,t} \geq \frac{(V_{2,i,p} + \varepsilon) - S_{i,t}}{M} \quad (11)$$

$$y_{2,i,t} \leq 1 - \frac{S_{i,t} - (V_{2,i,p} + \varepsilon)}{M} \quad (12)$$

onde:

$V_{1,i,p}$ = valor de armazenamento abaixo do qual a primeira fase de racionamento é implementada no reservatório i para o mês p ; o resultado do modelo; desconhecido.

$V_{2,i,p}$ = valor de armazenamento abaixo do qual a segunda fase de racionamento é implementada no reservatório i para o mês p ; o resultado do modelo; desconhecido.

$y_{1,i,t}$ = 1 se o armazenamento do reservatório i for inferior a $V_{1,i,p}$ durante o período t ; 0, caso contrário; desconhecido.

$y_{2,i,t}$ = 1 se o armazenamento do reservatório i for inferior a $V_{2,i,p}$ durante o período t ; 0, caso contrário; desconhecido.

$S_{i,t}$ = valor do armazenamento no reservatório i no início do período t ; desconhecido.

M = número grande; dado.

ε = número pequeno; dado.

O mesmo ocorre nas equações 14 e 15 para a variável z que indica se há vertimento nos reservatórios. A equação 13 representa a alteração de armazenamento no reservatório i durante o período t , sem considerar a limitação de capacidade; desconhecida. O pequeno número ε evita a possibilidade das variáveis binárias (y , z) assumirem dois valores quando $V_{b,i,p} = S_{i,t}$ (para a variável y) e $C_i = S_{i,t} + \delta_{i,t}$ (para a variável z).

$$\delta_{i,t} = I_{i,t} - E_{i,t} - R_{i,t} - T_{i,t} \quad (13)$$

$$z_{i,t} \geq \frac{(S_{i,t} + \delta_{i,t} + \varepsilon) - C_i}{M} \quad (14)$$

$$z_{i,t} \leq 1 - \frac{C_i - (S_{i,t} + \delta_{i,t} + \varepsilon)}{M} \quad (15)$$

onde:

C_i = capacidade do reservatório i ; conhecida.

$\delta_{i,t}$ = a alteração do armazenamento no reservatório i durante o período t , sem considerar a limitação de capacidade; desconhecido.

$I_{i,t}$ = afluência no reservatório i durante o período t ; desconhecido.

$E_{i,t}$ = perdas por evaporação no reservatório i durante o período t ; desconhecido.

$R_{i,t}$ = liberação de água no reservatório i durante o período t ; desconhecido.

$T_{i,t}$ = transferência de água do reservatório i durante o período t ; desconhecido.

$z_{i,t}$ = 1 se houver vertimento no reservatório i durante o período t ; 0, caso contrário; desconhecido.

A equação 16 é o balanço de massa de água e é igual à capacidade do reservatório sempre que há vertimento ($z_{i,t} = 1$). Assume-se que as perdas por infiltração são negligenciáveis. A equação 17 representa a evaporação, como o produto da taxa de evaporação e a área de superfície do reservatório no início do mês.

$$S_{i,t+1} = S_{i,t} + \delta_{i,t} + z * (C_i - S_{i,t} - \delta_{i,t}) \quad (16)$$

$$E_{i,t} = e_{i,p} * A_{i,t} \quad (17)$$

onde:

$e_{i,p}$ = taxa de evaporação (em profundidade/mês) no reservatório i durante o mês p ; conhecido.

$A_{i,t}$ = área da superfície de água do reservatório i no início do período t ; função de $S_{i,t}$; desconhecida.

A Equação 18 associa cada valor de transferência da Figura 7 aos respectivos estados de seca em ambos os reservatórios. A Equação 19 define a liberação como D_i quando não há racionamento ($y_{1,i,t} = 0$) e como $D * \alpha_{i,b}$ quando o armazenamento atual do reservatório i está na fase de racionamento b . As Equações 20 e 21 calculam a frequência com que cada reservatório permaneceu em cada fase de racionamento. Essas frequências calculadas são utilizadas no cálculo da função objetivo.

$$\begin{aligned} T_{1,t} = -T_{2,t} = & (1 - y_{1,1,t} * y_{1,2,t}) * Tr_{0,0} + (y_{1,1,t} - y_{1,1,t} * y_{1,2,t}) * Tr_{1,0} \\ & + (y_{2,1,t} - y_{2,1,t} * y_{2,2,t}) * (Tr_{2,0} - Tr_{1,0}) + (y_{1,2,t} - y_{1,1,t} * y_{1,2,t}) * Tr_{0,1} \\ & + (y_{2,2,t} - y_{2,1,t} * y_{2,2,t}) * (Tr_{0,2} - Tr_{0,1}) + (y_{1,1,t} * y_{1,2,t}) * Tr_{1,1} \\ & + (y_{2,1,t} * y_{2,2,t}) * (Tr_{2,2} - Tr_{1,1}) \quad (18) \end{aligned}$$

$$R_{i,t} = D_{i,p} * (1 - y_{1,i,t} * \alpha_{i,1} - y_{2,i,t} * (\alpha_{i,2} - \alpha_{i,1})) \quad (19)$$

$$n_{i,1} = \sum_{t=1}^{t=N} (y_{1,i,t} - y_{2,i,t}) \quad (20)$$

$$n_{i,2} = \sum_{t=1}^{t=N} y_{2,i,t} \quad (21)$$

onde:

$Tr_{1,2}$ = transferência de água entre as bacias durante a fase de racionamento r_1 no reservatório 1 e a fase de racionamento r_2 no reservatório 2; conhecida a partir da Figura 7.

$D_{i,p}$ = valor da demanda total de referência do reservatório i para o mês p ; conhecido.

$\alpha_{i,b}$ = a taxa de racionamento da demanda total do reservatório i na fase de racionamento b ;

conhecido a partir da Figura 7.

A equação 22 define o limite inferior do armazenamento atual como 0. A equação 23 separa os gatilhos de armazenamento por, pelo menos, uma porcentagem β . Isto evita que os gatilhos de dois volumes estejam muito próximos, e β pode ser definido por um valor razoável antes da otimização ou definido como 0 e ajustado após a otimização se os gatilhos estiverem muito próximos. A equação 24 define o valor do armazenamento inicial como uma porcentagem definida da capacidade de cada reservatório. A Equação 25 é a restrição inteira para as variáveis binárias. A equação 26 determina que se o estado do sistema no período $t - 1$ e no período $t + 1$ estão ambos na fase 0 do racionamento, então o período atual também deve estar na fase 0; esta restrição impede que o sistema fique apenas um mês sob racionamento. A equação 27 impede que o sistema passe diretamente da fase 0 de racionamento para a fase 2 de racionamento.

$$S_{i,t} \geq 0 \quad (22)$$

$$V_{1,i,p} \geq (1 + \beta) * V_{2,i,p} \quad (23)$$

$$S_{i,1} = \gamma_i C_i \quad (24)$$

$$y_{1,i,t}, y_{2,i,t}, z_{i,t} \in \{0,1\} \quad (25)$$

$$y_{1,i,t} \leq y_{1,i,t-1} + y_{1,i,t+1} \quad (26)$$

$$y_{2,i,t} \leq y_{1,i,t-1} \quad (27)$$

onde:

β = um valor de separação; dado.

γ_i = porcentagem de armazenamento inicial do reservatório i ; dado

4.3 Estudo de caso

Para ilustrar a aplicação da metodologia proposta, foi analisado o sistema de abastecimento de água Jaguaribe-Metropolitano. Este sistema, situado no centro-nordeste do Estado do Ceará, no Brasil (Figura 9), é composto por cinco bacias hidrográficas. Os reservatórios estratégicos são: (i) Castanhão, Orós e Banabuiú, na bacia do Jaguaribe, e (ii) Gavião, Pacoti/Riachão, Pacajus e Aracoiaba, na bacia Metropolitana. As duas regiões hidrográficas são interligadas por dois canais, o Eixão das Águas e o Trabalhador. O abastecimento urbano da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) é o principal uso da bacia Metropolitana, enquanto a bacia do Jaguaribe tem como principal finalidade a irrigação. As decisões de transferência de água entre as duas regiões (do Jaguaribe para a Metropolitana) resultam em conflitos pelo uso da água (SILVA et al., 2019). A alocação de água nesse sistema é, portanto, um processo político e ocorre por meio da negociação participativa entre usuários e gestores.

Os atores selecionados foram seis especialistas da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Estado (COGERH), três dos quais atuam na gestão da bacia do Jaguaribe e os demais na gestão da bacia Metropolitana. A participação colaborativa foi realizada por meio de três encontros em setembro de 2017. Na primeira reunião, foram apresentados aos técnicos os objetivos do estudo e a metodologia que estava sendo aplicada para incorporar explicitamente suas preferências no modelo de operação dos reservatórios. Eles também definiram, em consenso, que a operação do sistema deveria ser baseada em cinco estados de seca, conforme descrito na Tabela 12. Os estados de seca estão relacionados com os impactos sociais/econômicos/políticos do seu referido racionamento.

Figura 9 – Mapa de localização do Sistema Jaguaribe Metropolitano no estado do Ceará, Brasil.

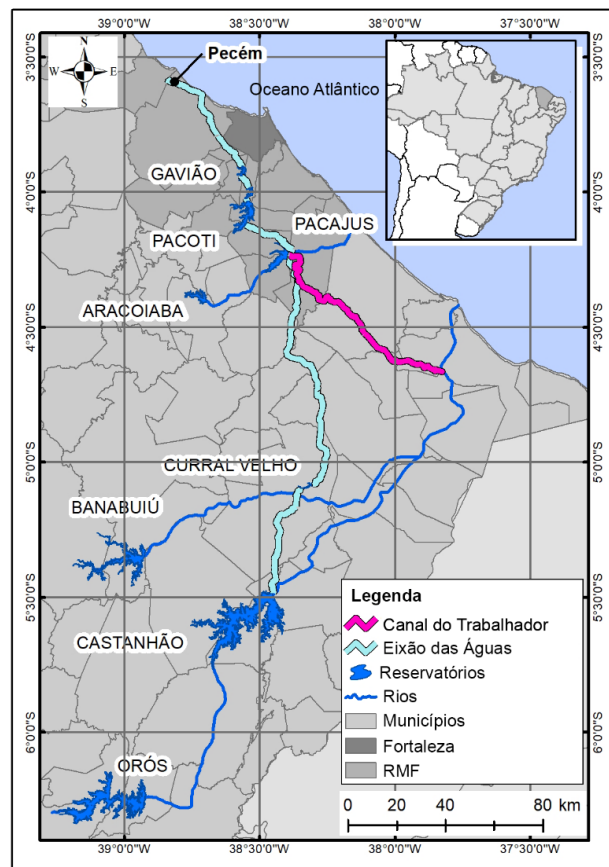


Tabela 12 - Descrição dos estados de seca do sistema Jaguaribe-Metropolitano.

| Código | Estado de Seca | Descrição |
|--------|----------------|---|
| S1 | Normal | Fase sem racionamento. Com o propósito melhor gerir os recursos hídricos, essa fase funciona como uma preparação para o estado de alerta. É caracterizada pela realização de algumas atividades rotineiras. |
| S2 | Alerta | Fase com racionamento de impacto mínimo. Esta é uma fase de preparação administrativa e operacional para o início de uma seca. Esse estado não deve |

| | | |
|----|--------------|---|
| | | afetar nenhum agente social e deve ser restrito às instituições de gestão pública e abastecimento. |
| S3 | Seca | Fase com racionamento de impacto moderado. Os gestores implementam campanhas de comunicação, como informações para os consumidores e a mídia, e ações. Eles também começam a monitorar a situação de risco (por exemplo, monitoramento intensivo do consumo de água e qualidade, e avaliação periódica da situação e desenvolvimento esperado). Nessa etapa, os gestores procuram reduzir o consumo de água por meio de campanhas educativas e aumentar a disponibilidade de água para alguns usos em detrimento de outros. |
| S4 | Seca Severa | Fase com racionamento elevado. O consumo de água de todos os setores econômicos/sociais deve ser reduzido e limitações de uso de água devem ser implementadas. |
| S5 | Seca Extrema | Racionamento de impacto máximo. O consumo de água deve ser limitado para garantir as necessidades básicas da população. Esse racionamento causa impactos sociais e econômicos de longo prazo. O sistema deve ser projetado para evitar entrar nesse estado. |

Na segunda reunião, os técnicos discutiram e definiram as taxas e frequências de racionamento toleráveis para cada um dos estados de seca delineados na reunião anterior. Também foram definidos os valores possíveis das transferências entre bacias considerando os impactos de cada estado de seca no sistema. A terceira reunião foi realizada após o procedimento de otimização e foi pedido aos participantes que escolhessem e validassem a melhor política a partir do conjunto de soluções ótimas geradas pelo algoritmo de otimização.

4.3.1 Dados

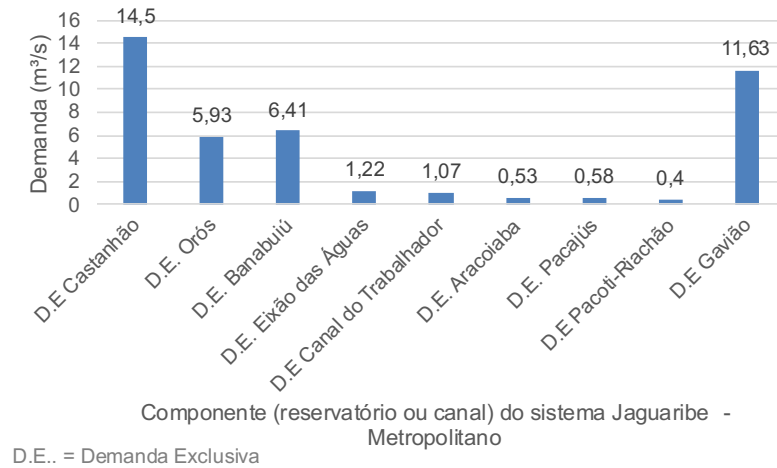
Os dados utilizados nesse estudo são informações sobre vazões afluentes aos reservatórios, taxas de evaporação e curvas cota-área-volume, bem como as demandas operacionais de cada reservatório que compõe o sistema Metropolitano de Jaguaribe.

Os dados de vazões afluentes foram obtidos a partir do relatório de regionalização de vazões para as bacias dos reservatórios do Estado do Ceará, publicado pela UFC/COGERH (2013). Neste relatório, as séries de vazões foram obtidas utilizando o modelo *soil moisture accounting procedure* (SMAP) com discretização mensal, ajustado a um modelo regional para estimar os parâmetros para as bacias dos reservatórios. Esses dados compreendem uma série mensal de vazões afluentes ao reservatório de janeiro de 1912 a dezembro de 2012.

As taxas de evaporação, as curvas cota-área-volume e as demandas de referência dos reservatórios para cada reservatório foram obtidas da COGERH. A Figura 10 apresenta as demandas exclusivas (DE) de cada componente (reservatório/canal) do sistema estudado. A demanda total de cada bacia foi considerada como a soma das demandas exclusivas de cada um

de seus componentes.

Figura 10 - Demanda (m^3/s) do sistema Jaguaribe–Metropolitano.



4.3.2 Reservatórios equivalentes

Para reduzir o custo computacional, os três principais reservatórios da bacia do Jaguaribe (Castanhão, Orós e Banabuiú) foram agregados no reservatório equivalente do Jaguaribe, e os cinco principais reservatórios da bacia Metropolitana (Aracoiaba, Pacajús, Pacoti, Riachão e Gavião) foram adicionados ao reservatório equivalente Metropolitano. Uma alternativa para lidar com a maldição da dimensionalidade seria aplicar o algoritmo de otimização de programação dinâmica dual estocástica (SDDP) (PEREIRA; PINTO, 1991; Raso et al., 2019), porém o SDDP requer linearidade, convexidade e separabilidade, o que também exigiria simplificações ou hipóteses complexas de serem validadas (RASO et al., 2019).

As afluências, as taxas de evaporação líquida, a curva área-armazenamento e as demandas totais dos reservatórios equivalentes foram calculadas conforme descrito a seguir. As vazões do reservatório equivalente foram consideradas iguais à soma das vazões de cada um dos reservatórios que o compõem (equação 28):

$$I_{eqvk,j} = \sum_{i=1}^{n_k} I_{i,j} \quad (28)$$

onde, $I_{eqvk,j}$ representa a afluência ao reservatório equivalente k no mês j; $I_{i,j}$ é a afluência ao reservatório i no mês j; n_k é o número de reservatórios que compõem o reservatório equivalente k.

A taxa média mensal de evaporação líquida dos reservatórios equivalentes foi

calculada tomando a média das taxas mensais de cada um dos reservatórios que os compõem (equação 29):

$$e_{eqvk,j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n_k} e_{i,j} \quad (29)$$

em que $e_{eqvk,j}$ é a taxa média de evaporação líquida no reservatório equivalente k no mês j; $e_{i,j}$ é a taxa média de evaporação líquida no reservatório única i no mês j.

Para determinar a curva área-armazenamento do reservatório equivalente, os reservatórios componentes foram agrupados de acordo com uma prioridade de esvaziamento definida, criando cotas de referência. O volume máximo e mínimo de cada reservatório foi colocado neste sistema de cotas, e em seguida os volumes foram distribuídos no sistema de referência. Assim, para cada cota de reservatório equivalente, existe um volume associado de cada reservatório. A área para cada volume de cada reservatório é calculada pela relação área-volume. O volume e a área do reservatório equivalente serão então calculados pela soma dos volumes e áreas de cada uma das cotas do sistema de referência.

As demandas dos reservatórios equivalentes foram calculadas através da soma das demandas de cada um dos reservatórios que as compõem (equação 30):

$$D_{eqv} = \sum_{i=1}^{n_k} D_i \quad (30)$$

onde D_{eqv} é a demanda total de água do reservatório equivalente k; D_i é a demanda total do reservatório componente i.

4.3.3 Procedimento para a construção de curvas de salvaguardas

Foram definidas cinco fases de racionamento para cada sistema (0, 1, 2, 3, 4). A extensão do modelo descrita nas equações 8 a 13 tem um custo computacional elevado: para evitar a carga computacional, um procedimento de simplificação que representa os gatilhos de armazenamento como funções dos gatilhos da primeira estação é incorporado pela equação 31:

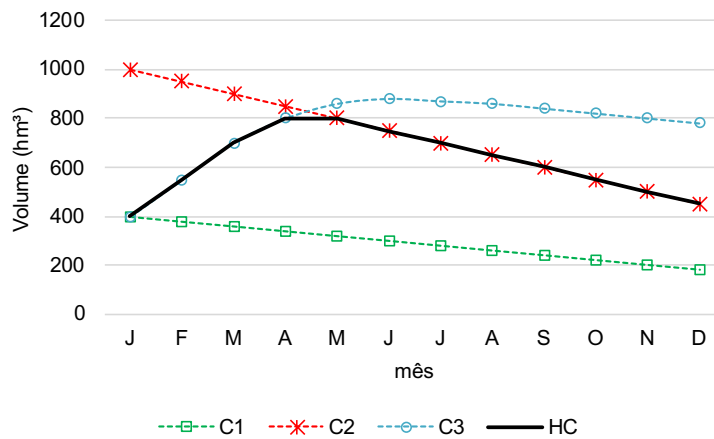
$$V_{j,i,p} = f(V_{j,i,1}) \quad (31)$$

Onde, $V_{j,i,p}$ é o valor de armazenamento abaixo do qual o estado de seca $j \in [1,4]$ é implementada no reservatório i para o mês $p \in [2,12]$. O armazenamento no início do primeiro mês é usado como referência porque, no caso estudado, ele marca o fim da estação seca e o início da estação chuvosa, que é a época do ano com armazenamentos mínimos nos reservatórios.

Assim, em vez de um problema de otimização com 96 parâmetros ($V_{j,i,p}$), passa a ser um problema com oito parâmetros ($V_{j,i,1}$). As funções foram definidas pelo procedimento gráfico esquematizado na Figura 11 e são descritas a seguir. A curva de salvaguarda do primeiro

estado de seca é inicialmente construída a partir de uma curva de disponibilidade (C1), tomando o gatilho de armazenamento da primeira estado de seca para o primeiro mês ($V_{1,i,1}$) como ponto de partida de armazenamento. A equação do balanço hídrico com afluência zero, transferência mensal zero e o valor da primeira retirada do estado de seca é utilizada para calcular a acumulação dos onze meses subsequentes. Esta curva indica o limite inferior de acumulação do reservatório, a partir do limiar $V_{1,i,1}$.

Figura 11 – Procedimento gráfico para construção das curvas de salvaguarda



Uma segunda curva (C2) é construída tomando o armazenamento no final da estação com o mesmo valor $V_{1,i,1}$. A equação de balanço é utilizada para calcular os onze meses anteriores, desconsiderando novamente as afluências e transferências entre reservatórios. C2 indica o limite superior da curva meta e tem como objetivo aproximar os valores do último e do primeiro mês da curva, suavizando a passagem de um ano para o outro. Partindo novamente do ponto $V_{1,i,1}$, na primeira época, constrói-se uma terceira curva (C3) utilizando a equação do balanço de massa de água, sendo a afluência igual ao volume correspondente a um dado quartil da série histórica de caudais. Neste trabalho, o valor da afluência de um mês foi igual à mediana dos seus valores históricos. A equação do balanço hídrico considerou a retirada mensal igual à curva da fase um do racionamento. A curva de salvaguarda resultante (HC) será definida utilizando os valores correspondentes, mês a mês, pelo máximo entre C1 e C3, e pelo mínimo entre este resultado (CR) e C2.

$$CR = \text{máximo}(C1, C3) \quad (32)$$

$$HC = \text{mínimo}(CR, C2) \quad (33)$$

As fases de racionamento, ou estados de secas, subsequentes são construídas repetindo o procedimento adotado em (i) a (iv) e considerando os seus valores de

armazenamento iniciais ($V_{j,i,1}$). As curvas resultantes dão os valores de $V_{j,i,p}$ em função dos valores do armazenamento inicial ($f(V_{j,i,1})$).

Este procedimento é possibilitado por características climáticas conhecidas do sistema: a existência de apenas duas estações (chuvosa [janeiro a junho] e seca [julho a dezembro]), e a intermitência dos rios que não correm durante a estação seca. O primeiro período do procedimento deve ser o primeiro mês da estação chuvosa (janeiro para o sistema Jaguaribe-Metropolitano). O procedimento pode ser otimizado com as equações 8 a 13 e a equação 26 por métodos heurísticos para encontrar os oito parâmetros ótimos que são relevantes para os quatro valores de gatilho do primeiro período para cada reservatório.

Neste estudo, foi utilizado o algoritmo de otimização multiobjetivo, *Multiobjective Shuffled Complex Evolution* Metropolis (MOSCEM), desenvolvido por Vrugt et al. (2003). O MOSCEM é utilizado para resolver problemas de otimização multiobjetivo para modelos hidrológicos, utilizando o conceito de dominância de Pareto para evoluir de uma população inicial de pontos para um conjunto de soluções possíveis (VRUGT et al., 2003).

Utilizamos uma otimização multiobjetivo de modo que cada termo da função objetivo (equação 8), que representa o desempenho do modelo em cada reservatório, possa ser tratado como um objetivo individual, de modo que se possa construir uma curva de Pareto que mostre o *tradeoff* existente da alocação de água entre as duas bacias diferentes.

O algoritmo MOSCEM inicia o processo de otimização definindo os limites máximo e mínimo dos valores que os parâmetros iniciais podem ter. Em seguida, a partir de uma distribuição de probabilidade definida, são gerados diferentes conjuntos de parâmetros que irão definir uma população de soluções possíveis. Após a avaliação das funções objetivo, os conjuntos de parâmetros são hierarquizados pelos critérios de dominância e não dominância (VRUGT et al., 2003; BRAVO et al., 2009). No final da simulação/otimização, são apresentados diferentes conjuntos de parâmetros com desempenho semelhante, juntamente com as respectivas simulações do sistema, e as partes interessadas devem decidir qual o conjunto mais adequado para a alocação de água do sistema.

4.3.4 Simulação de funcionamento do sistema desagregado

O desempenho da política de operação resultante foi avaliado através da simulação do sistema desagregado isolado. A simulação considerou:

Os gatilhos de armazenamento para o sistema de reservatórios desagregados, realizados da seguinte forma: i) para os reservatórios da bacia do Jaguaribe, os gatilhos de armazenamento para cada reservatório isolado foram os mesmos, em frações máximas de

armazenamento, definidos para o reservatório equivalente; ii) na bacia Metropolitana, as fases de racionamento foram definidas como na simulação agregada, ou seja, pela soma dos volumes acumulados em cada um dos reservatórios que fazem parte desta bacia.

A frequência da atualização do estado de seca: Decidiu-se pela atualização do estado de seca em duas vezes por ano. O estado de seca inicialmente é atualizado em abril segue até julho (primeiro mês da estação seca), quando é tomada uma nova decisão sobre o nível de seca e, conseqüentemente, a retirada, a continuidade ou a intensificação das restrições de uso, até março do ano seguinte, quando será tomada uma nova decisão sobre o nível de racionamento do sistema. Esta estratégia foi adotada para que existam apenas dois coeficientes de racionamento no mesmo ano.

4.4 Resultados

O número e o nome de cada fases de racionamento/estado de seca, os valores da frequência tolerável da bacia em cada estado de seca, os índices de racionamento para cada bacia em cada estado de seca e as transferências de água entre as bacias para cada estado de seca definidas em consenso para o sistema Jaguaribe-Metropolitano são apresentados na Tabela 13 e na Tabela 14.

Tabela 13 - Definição dos valores de riscos toleráveis para escassez de água no sistema de abastecimento de água do Jaguaribe-Metropolitano realizados por técnicos da COGERH.

| Reservatório | Normal | Alert | Seca | Seca Severa | Seca Extrema |
|--------------------------------|--------|-------|------|-------------|--------------|
| a | | | | | |
| <i>Frequência de falha (%)</i> | | | | | |
| Jaguaribe | 66 | 41 | 21 | 6 | 0 |
| Metropolitano | 33 | 18 | 8 | 3 | 0 |
| <i>Fração de Racionamento</i> | | | | | |
| Jaguaribe | 0,00 | 0,05 | 0,15 | 0,50 | 0,95 |
| Metropolitano | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 0,25 | 0,35 |

Tabela 14 - Definição dos valores de transferência de água (m³/s) em função dos diferentes estados de seca no sistema de abastecimento de água do Jaguaribe-Metropolitano realizados por técnicos da COGERH

| | | Metropolitano | | | | |
|------------------|--------|----------------------|-------|------|-------------|--------------|
| | | Normal | Alert | Seca | Seca Severa | Seca Extrema |
| | | a | | | | |
| Jaguaribe | Normal | 0,00 | 4,50 | 8,10 | 9,00 | 9,00 |
| | Alerta | 0,00 | 4,50 | 8,10 | 9,00 | 9,00 |
| | Seca | 0,00 | 2,25 | 8,10 | 7,20 | 6,75 |

| | | | | | |
|--------------|------|------|------|------|------|
| Seca Severa | 0,00 | 0,00 | 7,20 | 6,75 | 6,30 |
| Seca Extrema | 0,00 | 0,00 | 6,75 | 6,30 | 5,85 |

Os participantes admitiram maiores frequências de racionamento na bacia do Jaguaribe do que na bacia Metropolitana. No Jaguaribe, eles decidiram que, durante dois terços do tempo, o sistema não estaria no estado normal (ou seja, haverá algum racionamento na bacia durante dois terços do tempo). Na bacia Metropolitana, optaram por ser mais cautelosos com os racionamentos, decidindo que esta bacia deveria estar no estado normal (ou seja, sem racionamento) durante dois terços do tempo.

Os índices de racionamento definidos pelos atores também foram maiores na bacia do Jaguaribe, por exemplo, em estado de Seca Severa, o índice de racionamento foi de 95% da demanda total da bacia, enquanto na bacia Metropolitana, para o mesmo estado de seca, o racionamento pretendido foi de 35%. Além disso, em ambas as bacias, os atores optaram para que o sistema não ultrapassasse o estado de Seca Extrema em nenhum momento, pois isso representaria um colapso total do sistema, resultando em falta de água, para todos os usos, na região.

Em relação às transferências de água, os agentes optaram por não realizar transferências de água entre as bacias quando a bacia Metropolitana estiver nos estados Normal ou de Alerta e a bacia do Jaguaribe estiver nos estados de Seca Severa ou Extrema. Em todos os outros momentos, haverá transferência de água da bacia do Jaguaribe para a bacia Metropolitana. Os valores de transferência diminuem à medida que a seca se intensifica na região doadora (bacia do Jaguaribe).

O reservatório equivalente de Jaguaribe (REJ) apresentou vazão regularizada Q90 próxima a 50 m³/s, enquanto o reservatório equivalente Metropolitano (REM) foi de 15 m³/s. A vazão Qfirme (ou seja, vazão máxima que o reservatório é capaz de liberar sem ocorrer falhas) dos reservatórios foi de 27,5 m³/s e 8,5 m³/s para o REJ e REM, respectivamente. Como as demandas dos reservatórios equivalentes são de 29,1 m³/s e 13,2 m³/s, a garantia seria de aproximadamente 99% e 93% para o REJ e REM, respectivamente.

O sistema Jaguaribe-Metropolitano foi otimizado para os parâmetros definidos na Tabela 13 e na Tabela 14 para encontrar as curvas de salvaguarda dos reservatórios equivalentes. A função objetivo minimiza a diferença entre as frequências de racionamento resultante e desejada para cada estado de seca e para cada reservatório. Minimizar a função objetivo para apenas um reservatório implicaria aumentar o valor da função (ou seja, um valor não ótimo)

para o outro reservatório. Portanto, há um *trade-off* entre a função objetivo de cada reservatório. A Tabela 15, Tabela 16 e Tabela 17 mostram o resultado do algoritmo de otimização e os valores das funções objetivo, a frequência de racionamento em cada nível e os parâmetros otimizados. Os três conjuntos de parâmetros dados pelo algoritmo de otimização podem ser implementados na operação real do sistema. A diferença entre cada conjunto de parâmetros resulta em uma troca de risco de falta de água entre cada bacia: o conjunto ótimo que minimiza a frequência de racionamento para a bacia Metropolitana implica em um aumento da frequência de racionamento para a bacia do Jaguaribe. Assim, as partes interessadas devem definir qual conjunto de parâmetros ótimos é o mais viável para o sistema.

Na terceira reunião, os participantes identificaram a melhor das três políticas ótimas, escolhendo aquela em que o valor da função objetivo 1 era o menor, que era a política em que a frequência de racionamento estava mais próxima do que eles haviam proposto para a bacia do Jaguaribe. Isso se deve ao fato de a bacia do Jaguaribe ter um armazenamento muito maior do que a bacia Metropolitana.

Tabela 15 - Saída do algoritmo de otimização: parâmetros ótimos

| Resultado | $V_{1,1,1}$ | $V_{2,1,1}$ | $V_{3,1,1}$ | $V_{4,1,1}$ | $V_{1,2,1}$ | $V_{2,2,1}$ | $V_{3,2,1}$ | $V_{4,2,1}$ |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | 0,77 | 0,52 | 0,43 | 0,26 | 0,70 | 0,37 | 0,27 | 0,15 |
| 2 | 0,80 | 0,57 | 0,26 | 0,18 | 0,51 | 0,33 | 0,26 | 0,15 |
| 3 | 0,66 | 0,42 | 0,35 | 0,27 | 0,56 | 0,42 | 0,31 | 0,22 |

Tabela 16 - Saída do algoritmo de otimização: funções objetivas

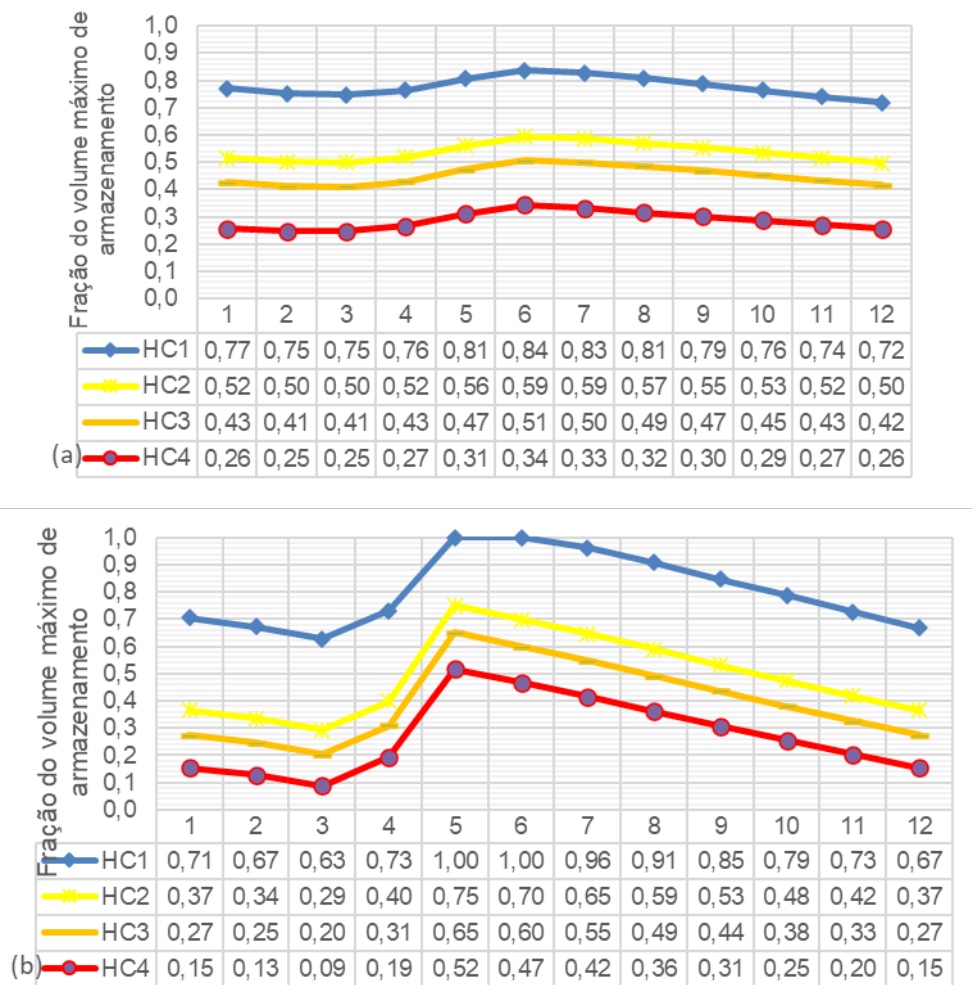
| Resultado | $FO1 = \sum_{b=1}^{b=4} \left(\frac{n_{1,b}}{N} - f_{1,b} \right)^2$ | $FO2 = \sum_{b=1}^{b=4} \left(\frac{n_{2,b}}{N} - f_{2,b} \right)^2$ |
|-----------|---|---|
| 1 | 0,006 | 0,010 |
| 2 | 0,026 | 0,002 |
| 3 | 0,027 | 0,001 |

Tabela 17 - Saída do algoritmo de otimização: frequência de falhas

| Resultado | Sistema Jaguaribe | | | | | Sistema Metropolitana | | | | |
|-----------|-------------------|-----|-----|----|----|-----------------------|-----|-----|----|----|
| | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 |
| 1 | 71% | 36% | 23% | 3% | 0% | 43% | 16% | 8% | 3% | 0% |
| 2 | 75% | 46% | 9% | 2% | 0% | 31% | 15% | 11% | 4% | 0% |
| 3 | 61% | 26% | 16% | 7% | 0% | 33% | 18% | 11% | 4% | 0% |

A Figura 12 mostra, respectivamente, as curvas de salvaguarda resultantes para os reservatórios Jaguaribe (a) e Metropolitano (b). A otimização foi eficaz para o desempenho dos parâmetros, conforme determinado pelas frequências de racionamento de cada estado de seca, que se aproximam daquelas definidas pelo consenso na Tabela 13 e na Tabela 14.

Figura 12 – Curva de Salvaguardas resultantes para os reservatórios equivalentes (a) Jaguaribe; e (b) Metropolitano, com base nas definições de técnicos da COGERH.



Para a política selecionada, o reservatório Metropolitano esteve em estado normal 57% do tempo e esteve abaixo da seca severa 3% do tempo simulado. A regra de salvaguarda para Jaguaribe forneceu valores no estado de seca extrema em torno de 25% do volume máximo, e o sistema Metropolitano, curvas de estado normal iguais ao volume máximo nos meses de maio e junho. Para que sejam geradas curvas em níveis de acumulação de reservatórios mais baixos, deve-se permitir a frequência de racionamentos menores para este reservatório.

Para melhor avaliar o impacto desta regra de *hedging*, foi simulado o sistema

Jaguaribe-Metropolitano com seus reservatórios desagregados. A Figura 13 mostra a relação entre os armazenamentos mensais dos reservatórios equivalentes e dos sistemas desagregados estudados. Para o sistema Jaguaribe (Figura 13a), a relação entre os volumes mensais apresenta coeficiente de determinação R^2 de 0,9. As distâncias entre os armazenamentos mensais dos sistemas desagregados e equivalentes foram calculadas através do erro médio quadrático (RMSE) e do erro médio quadrático normalizado (NRMSE). Os valores resultantes do RMSE e do NRMSE foram, respectivamente, 730,84 e 8,23%. O RMSE (Eq. 34) e o NRMSE (Eq. 35) são definidos como:

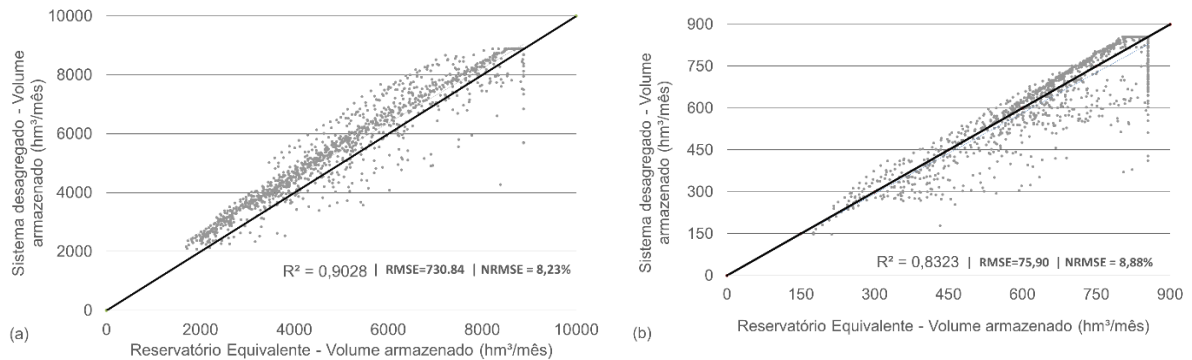
$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (\hat{V}_t - V_t)^2}{T}} \quad (34)$$

$$\text{NRMSE} = \frac{1}{\hat{V}} \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (\hat{V}_t - V_t)^2}{T}} \times 100 \quad (35)$$

Onde, \hat{V}_t e V_t são os armazenamentos mensais resultantes respectivamente dos sistemas equivalente e desagregado. \hat{V} é a diferença entre os valores máximo e mínimo acumulados durante o período T (número de meses) das simulações.

Os erros encontrados na simulação do Sistema Jaguaribe ocorrem em diferentes níveis de armazenamento e acredita-se que esteja relacionado com a construção da curva volume-armazenamento do reservatório equivalente, uma vez que neste sistema existem reservatórios em série agregados a reservatórios em paralelo, dificultando a aproximação das duas curvas. Para o Sistema Metropolitano (Figura 13b), resultou em $R^2=0,83$, com erro quadrático médio de $\text{RMSE}=75,90$ e erro percentual $\text{NRMSE}=8,88\%$. Neste caso, o principal erro ocorreu nos valores de maior armazenamento, em grande parte devido aos vertedouros que ocorrem nos reservatórios desagregados e que não são computados quando se utiliza o reservatório equivalente. O uso do reservatório equivalente implica a redução das variáveis a serem otimizadas em contrapartida ao aumento da incerteza no armazenamento.

Figura 13 - Relação entre os armazenamentos mensais dos reservatórios equivalentes e dos sistemas desagregados estudados: a) Sistema Jaguaribe. b) Sistema Metropolitano



Os valores de garantia resultantes dos dois modelos (Equivalente e Desagregado) são apresentados na Tabela 18. Ambas as simulações resultaram em valores de garantia semelhantes. Para valores baixos de armazenamento (estados de Seca, Seca Severa e Seca Extrema), o sistema Metropolitano obteve garantia igual nas duas simulações, com uma diferença de garantia de 6,7% entre as duas simulações no estado normal. No sistema Jaguaribe, as diferenças atingiram o valor de 12% no estado de Alerta, tendo o estado de Extrema Seca a mesma garantia nas duas simulações.

Tabela 18 - Garantia de cada estado de seca para simulações do Reservatório Equivalente e Reservatórios Desagregados.

| Estado de Seca | Jaguaribe | | | Metropolitano | | |
|----------------|--------------------------|--------------------------|-----------|--------------------------|--------------------------|-----------|
| | Reservatório Equivalente | Reservatório desagregado | Diferença | Reservatório Equivalente | Reservatório desagregado | Diferença |
| Normal | 29% | 23% | 6% | 57% | 50% | 7% |
| Alerta | 64% | 52% | 12% | 84% | 86% | -2% |
| Seca | 77% | 68% | 9% | 92% | 92% | 0% |
| Seca Severa | 97% | 91% | 6% | 97% | 97% | 0% |
| Seca Extrema | 100% | 100% | 0% | 100% | 100% | 0% |

A Tabela 19 mostra a falha em cada nível de seca para todos os reservatórios dos sistemas Jaguaribe e Metropolitano para a simulação dos reservatórios desagregados. Como a definição do estado de seca dos reservatórios da bacia Metropolitana foi feita com base na soma dos volumes acumulados no mês de todos os reservatórios, a frequência de racionamento é a mesma para todos os reservatórios.

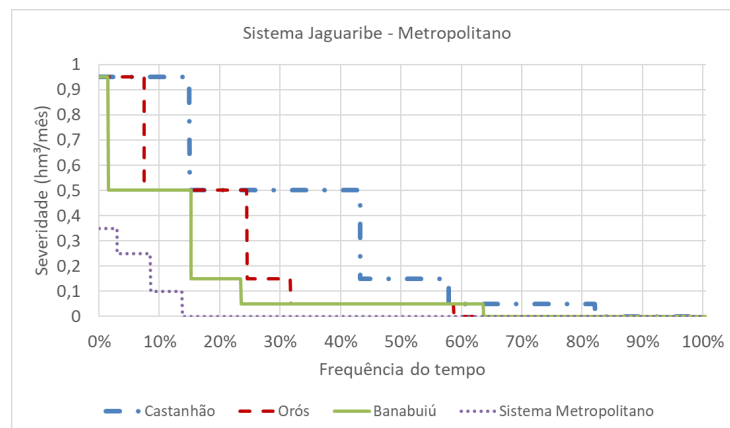
O reservatório Castanhão apresentou a maior frequência de racionamento de todo o sistema. Este reservatório apresenta algum tipo de racionamento em 81,4% do período

simulado. Os reservatórios da Região Metropolitana, no entanto, apresentam cerca de 86,4% do tempo em estado normal ou de alerta, o que significa atendimento completo às demandas da região (não há racionamento quando o reservatório está nesses estados). Um estado de seca mais intenso ocorre em cerca de 3% do tempo simulado. A severidade dessa regra de hedging pode ser vista na Figura 14, indicando o percentual de tempo em que o reservatório deixou de atender parte de suas demandas.

Tabela 19 - Frequência de racionamento dos reservatórios do sistema Jaguaribe e Metropolitan por estado de seca.

| Reservatório | Normal | Alerta | Seca | Seca Severa | Seca Extrema |
|----------------------|--------|--------|-------|-------------|--------------|
| Sistema Jaguaribe | 77,2% | 48,3% | 31,9% | 8,9% | 0% |
| Castanhão | 81,4% | 57,4% | 42,8% | 14,9% | 0% |
| Orós | 58,2% | 31,4% | 24,3% | 7,4% | 0% |
| Banabuiú | 63,1% | 23,3% | 15,1% | 1,5% | 0% |
| Sistema Metropolitan | 49,5% | 13,6% | 8,4% | 3,0% | 0% |

Figura 14 - Severidade da regra de *hedging* para os reservatórios do sistema Jaguaribe-Metropolitano.



A resiliência, considerando a definição de Hashimoto et al. (1982), dos reservatórios à regra de salvaguarda dada é mostrada na Tabela 20. Os reservatórios da MRF levam em média 17 meses para retornar ao estado normal após um nível mais baixo e levam aproximadamente sete meses para retornar ao estado de seca após estarem em seca severa. O reservatório Castanhão permanece em estado de seca extrema por uma média de 13 meses, antes de retornar ao estado de seca severa. Quando sai do estado normal, leva, em média, 247 meses para retornar a ele.

Tabela 20 - Resiliência (em meses) dos reservatórios no sistema para cada estado de seca.

| | Normal | Alerta | Seca | Seca Severa | Seca Extrema |
|-----------------------|--------|--------|------|-------------|--------------|
| Sistema Jaguaribe | 104 | 27 | 26 | 12 | 0 |
| Castanhão | 247 | 46 | 29 | 13 | 0 |
| Orós | 50 | 35 | 29 | 13 | 0 |
| Banabuiú | 77 | 26 | 20 | 6 | 0 |
| Sistema Metropolitano | 17 | 9 | 9 | 7 | 0 |

As vulnerabilidades dos sistemas são apresentadas na Tabela 21. A vulnerabilidade representa a quantidade de água que deixa de ser ofertada para atender a demanda em cada estado de seca. O açude Castanhão apresentou uma vulnerabilidade de 9507,4 hm³. Esse déficit ocorreu em 45 meses, resultando em uma média de 6,5 m³/s durante o período em que ocorreu. No Sistema Metropolitano, a vulnerabilidade total representou 240hm³, resultando em uma média de 4,4 m³/s durante os 21 meses em que ocorreu. As vulnerabilidades do Sistema Jaguaribe foram cerca de 230% maiores que no Sistema Metropolitano, demonstrando que as falhas admitidas e o racionamento imposto na região tornam o sistema Jaguaribe mais vulnerável que o Metropolitano.

Tabela 21 - Vulnerabilidade dos reservatórios no sistema para cada estado de seca

| | Máximo (hm ³) | Duração (mês) | Período médio (hm ³ / mês) | Período médio (m ³ /s) |
|-----------------------|------------------------------|------------------|--|--------------------------------------|
| Sistema Jaguaribe | 1690,6 | 45,0 | 37,6 | 14,5 |
| Castanhão | 9507,4 | 561,0 | 16,9 | 6,5 |
| Orós | 1487,1 | 165,0 | 9,0 | 3,5 |
| Banabuiú | 1392,3 | 264,0 | 5,3 | 2,0 |
| Sistema Metropolitano | 240,0 | 21,0 | 11,4 | 4,4 |

4.5 Discussão

A participação das partes interessadas nos processos de modelagem é fundamental para as abordagens de modelagem colaborativa (LANGSDALE et al., 2013) e foi integrada com sucesso na definição de regras de salvaguarda de sistemas de reservatórios pela metodologia proposta. As preferências das partes interessadas foram explicitamente incorporadas no processo de otimização das regras de salvaguarda.

Nesta pesquisa, a consulta colaborativa foi apenas com gestores de recursos hídricos e especialistas da COGERH, a aplicação pode ser estendida à consulta pública,

conforme exigido pelo processo de alocação de água, para definir outros valores de preferência e, conseqüentemente, a construção de outras curvas de salvaguarda.

As regras de salvaguarda aqui definidas podem também ser incorporadas num plano de seca (ESTRELA et al., 2006), que serviria de guia para a tomada de decisões em tempos de escassez. As curvas de *hedging* definidas também poderiam atuar como gatilhos de seca (ARAÚJO JUNIOR, 2020) para um conjunto de ações e medidas, visando reduzir os impactos do aumento da escassez hídrica.

As partes interessadas optaram por um maior racionamento na região de Jaguaribe, o que impacta significativamente o atendimento das demandas de irrigação. A região Metropolitana sofre menos restrições, o que significa maior garantia no atendimento de sua demanda. A opção dos atores por minimizar o racionamento na bacia Metropolitana é explicada pelos impactos socioeconômicos que a falta de água traria para a região Metropolitana de Fortaleza, que é a região mais populosa e economicamente importante do Estado do Ceará. Ainda, os atores optaram por não esgotar completamente o sistema, o que traria enormes prejuízos devido à falta de água para todos os usos na região.

As simulações realizadas indicaram a necessidade de transferências de água das bacias do Jaguaribe para a Metropolitana devido à alta demanda instalada na Metropolitana. O aumento do consumo de água na bacia do Jaguaribe importaria falhas no atendimento de suas demandas em algum momento. Assim, a transferência de água para a região metropolitana é uma troca de riscos entre as duas bacias: a garantia da água para a Metropolitana imporá riscos de falhas na bacia do Jaguaribe. De fato, isso pode ser percebido quando se analisam as vulnerabilidades entre os dois sistemas. Os valores das simulações para os reservatórios de Jaguaribe ultrapassaram 200% em relação aos valores do Sistema Metropolitana.

A utilização de reservatórios equivalentes permitiu reduzir o número de variáveis a otimizar, à custa do aumento da incerteza do armazenamento, o que resultou em quase 10% de diferença entre as simulações. No entanto, para volumes baixos, as diferenças entre as simulações de reservatórios equivalentes e desagregados tornam-se baixas. Este facto é corroborado por Mukhopadhyay et al., (2021) ao associarem o aumento dos erros aos vertimentos e outras perdas menores em reservatórios isolados que não podem ser efetivamente representados na abordagem equivalente. Apesar das diferenças, a utilização do reservatório equivalente não prejudica a modelagem, dado que as regras obtidas utilizando o reservatório equivalente foram simuladas com os reservatórios desagregadas e os seus resultados foram validados pelos *stakeholders*. Cabe ressaltar que, caso os *stakeholders* não concordem com alguma das políticas ótimas apresentadas, ou caso suas preferências resultem em um modelo

inviável, uma nova rodada de discussão deve ser realizada para que eles possam propor outros valores de racionamento e garantia.

Por último, é importante ressaltar que a metodologia aqui apresentada difere de uma abordagem puramente matemática. A principal vantagem da metodologia proposta é o fato de garantir uma regra de salvaguarda politicamente viável, com possibilidades de se tornar um instrumento de gestão de conflitos. No entanto, tem um custo de desempenho que depende da capacidade de negociação e do conhecimento tácito das partes interessadas. As regras de salvaguarda resultantes não são o ótimo matemático, embora possam ser consideradas um ótimo social, uma vez que refletem os riscos sociais viáveis e aceitáveis de acordo com a visão das partes consultadas. A abordagem proposta é uma boa alternativa quando a aplicação das regras matematicamente ótimas falha por razões políticas ou outros interesses.

4.6 Conclusão

Definir uma política de operação de reservatórios que permita a interação entre alocação de longo e curto prazo é de grande importância para a gestão eficiente, equitativa e sustentável dos recursos hídricos. Assim, uma metodologia colaborativa foi proposta para a construção de regras de salvaguardas, através da definição de estados de seca que promovem a participação conjunta de usuários e gestores de água, que decidem sobre um sistema de preferências de riscos e transferência de água entre hidrossistemas. A modelagem colaborativa permite definir quais parâmetros ótimos serão usados na política de salvaguarda, a partir dos resultados do modelo de otimização que fornece diferentes parâmetros, com desempenhos similares.

As preferências das partes interessadas foram resumidas na forma de frequência temporal nos estados de seca do sistema, coeficientes de racionamento de demanda e transferência de água entre bacias, que foram usados como entrada para o modelo. Além disso, as partes interessadas participaram da escolha e validação da política de operação de reservatório a partir do conjunto de regras ótima, tornando o processo de otimização de curvas de salvaguardas não apenas matemático, mas considerando aspectos sociais e políticos na decisão.

Incorporar as preferências das partes interessadas no modelo é importante para garantir que elas entendam e incorporem as regras construídas, de modo que possam ser utilizadas na operação real do sistema, tornando a participação social útil e efetiva. Uma maneira de aumentar as chances dessa incorporação é, como propusemos, envolver as partes interessadas em todas as fases da modelagem, desde a elaboração dos valores de entrada do

modelo até a validação e aceitação da regra construída.

A metodologia foi aplicada ao sistema Jaguaribe-Metropolitano com bons resultados. Poderia ser aplicada na operação real do sistema, pois as frequências de racionamento encontradas na simulação foram próximas às frequências definidas pelo consenso dos gestores. A regra de operação resultante demonstrou que alcançar garantias especificadas pelo usuário exigiria curvas em frações elevadas do volume máximo. Se esses valores não forem aceitos pelos gestores e usuários por serem considerados altos, uma nova simulação e processo de otimização deve ser realizado, aumentando as frequências de racionamento admitidas em cada nível de seca.

Embora a metodologia seja definida para um sistema de reservatórios de duas bacias com uma transferência de água, esse formato pode ser aplicado a vários sistemas de reservatórios usando transformações simples, como os reservatórios equivalentes mostrados no estudo de caso. A metodologia também pode ser estendida para incluir sistemas maiores e mais complexos com mais bacias e transferências, porém o processo colaborativo da definição em consenso dos valores aceitáveis de riscos e transferências pode ser mais desafiador. Estudos futuros devem incorporar incertezas climáticas (por exemplo, projeções de mudanças climáticas e previsões sazonais de vazão) à metodologia colaborativa proposta.

5 SECA EM JOGO: UMA FERRAMENTA PARA PROMOVER E APRIMORAR A PARTICIPAÇÃO SOCIAL NA CONSTRUÇÃO DE PLANOS PROATIVOS DE SECA⁹

5.1 Introdução

As secas são fenômenos sócio-naturais complexos, potencialmente mortais e economicamente custosos. A gestão das secas é tradicionalmente realizada de forma reativa, com medidas e respostas muitas vezes ineficientes e que são pensadas no calor do momento. Visando romper com esse paradigma reativo, a gestão proativa de secas se apresenta como uma alternativa que visa minimizar os impactos das secas, através de ações preparatórias e preventivas, em vez de apenas responder aos seus efeitos negativos quando estes se manifestam (WILHITE et al., 2000).

Um aspecto chave na construção de planos proativos para a gestão das secas é a participação social (SOUZA FILHO et al., 2023). A participação dos atores locais é fundamental para descrever e compreender os impactos sentidos nos eventos do passado e pensar medidas que melhor se adequem à realidade local. Nesse sentido, abordagens participativas permitem aumentar a troca de conhecimento, identificar problemas e soluções, construir confiança entre as partes interessadas e se beneficiar da incorporação do conhecimento científico nas decisões a serem tomadas (KAINER et al., 2009). Portanto, os(as) cientistas devem agir como facilitadores de um processo de aprendizado social juntamente com os atores locais, os quais possuem conhecimento essencial da sua própria realidade (Shackleton et al., 2009).

A sócio-hidrologia desenvolve uma compreensão ampla das interações e feedbacks entre processos naturais, técnicos e sociais na gestão da água, uma vez que permite a participação de atores e partes interessadas na construção e entendimento das relações entre a gestão de água e os diversos setores da sociedade (DI BALDASSARRE et al., 2019). Segundo Sivapalan e Blöschl (2015) os modelos sócio-hidrológicos podem auxiliar na gestão de recursos hídricos de maneiras distintas. Entre elas, podem facilitar a participação de todas as partes interessadas, garantindo que as suas necessidades e expectativas sejam consideradas durante a tomada de decisões, além de ajudar os tomadores de decisão através da geração e avaliação de

⁹ Este capítulo foi submetido em inglês ao *Journal of Hydrology* em julho de 2023.

diferentes cenários futuros, permitindo que eles encontrem o caminho mais adequado para alcançar os seus objetivos.

A participação das partes interessadas no gerenciamento dos recursos hídricos, em especial em períodos críticos de secas, é fundamental para garantir decisões mais justas e equitativas (CARR et al., 2012). No entanto, a participação efetiva pode ser desafiadora devido a vários fatores, como desequilíbrios de poder, falta de confiança, assimetrias de conhecimentos, recursos limitados (DI BALDASSARRE et al, 2019) e desigualdades sociais (ABERS et al., 2009)

Nesse contexto, jogos sérios têm sido usados como uma ferramenta para aumentar a participação das partes interessadas e promover a colaboração entre os diferentes setores de usuários envolvidos na gestão de recursos hídricos. Esses combinam jogos de RPG (Role-playing game), exercícios de política e jogos empresariais, e têm como objetivo fornecer aprendizagem social, tomada de decisão (BARRETEAU et al., 2021) e o "princípio da simetria" (RICHARD-FERROUDJI; BARRETEAU, 2012).

5.1.1 Uso de jogos na gestão de recursos hídricos

O uso de jogos sérios no contexto da gestão de recursos hídricos tem recebido significativa atenção nos últimos anos. Vários desses jogos foram desenvolvidos e implementados, oferecendo soluções inovadoras e envolventes para questões complexas em torno da gestão da água. Nesse campo, jogos sérios têm sido aplicados com o objetivo de promover a aprendizagem social e a interação entre atores (CHAN et al., 2017; AKHTAR et al., 2019; BATHKE et al., 2019). Além disso, para Richard-Ferrouddji e Barreteau (2012), jogos sérios permitem integrar participantes com níveis heterogêneos de conhecimento e remover essas assimetrias da aprendizagem durante o jogo. Portanto, os autores entendem que jogos sérios são ferramentas do processo e nunca um produto final.

Nesse sentido, por meio de um jogo sério, Bathke et al. (2019) promoveram aprendizado social, diálogo entre setores e participação das partes interessadas no processo de planejamento recursos hídricos relativos a eventos extremos. Den Haan et al. (2020) utilizaram um jogo sério para aprimorar a participação das partes interessadas, servindo como uma atividade quebra-gelo que facilitou a compreensão das complexidades da gestão da água. Mariano e Alves (2020) empregaram um jogo sério para identificar fatores que influenciam a tomada de decisões de atores em comunidades periurbanas, utilizando-o como uma ferramenta de modelagem socio hidrológica.

Barreteau et al. (2021) apresentam exemplos de jogos sérios utilizados em diferentes contextos socioecológicos, incluindo gestão de recursos hídricos, pesca, agricultura,

uso da terra e mudanças climáticas. Os autores discutem as principais vantagens e desvantagens dos jogos sérios como método de pesquisa, incluindo a capacidade de explorar cenários complexos, envolver stakeholders e fornecer insights para a tomada de decisões. Mas também destacam as limitações dos jogos, como a necessidade de simplificar a realidade para torná-la jogável e a dificuldade de avaliar a validade dos resultados. Spyropoulos et al. (2022) desenvolveram um jogo sério para aumentar a conscientização sobre a gestão de cheias, usando estudantes como diferentes partes interessadas para simular cenários do mundo real. O jogo visava educar os participantes e promover uma compreensão das complexidades da gestão de cheias.

Em geral, os jogos sérios discutidos acima servem como exemplos do potencial desse tipo de jogo em facilitar a colaboração, a tomada de decisão e a participação das partes interessadas na gestão da água. Nesse sentido, Rodela et al. (2019) classificaram três categorias de jogos sérios aplicados na governança natural e ambiental: (i) jogos para pesquisa, que visam coletar dados e informações; (ii) jogos educacionais, que visam educar e treinar; e (iii) jogos como intervenção, que visam desencadear e facilitar processos de mudança e aprendizagem social, com jogadores atuando como partes interessadas em vez de aprendizes ou testadores.

Apesar dos ganhos de participação social, construir e aplicar jogos sérios ainda é um processo repetitivo, longo e custoso (ABRAMI et al., 2012). Um dos poucos exemplos de jogos sérios aplicados ao planejamento de secas foi realizado por Poděbradská et al. (2020), que desenvolveram um jogo chamado “*Ready for Drought?*” cujo objetivo é aprimorar a aprendizagem sobre impactos da seca para universitários e profissionais da área. De acordo com a classificação de Rodela et al. (2019), “*Ready for Drought?*” pode ser encaixado como um jogo educacional, criado para treinar profissionais da área, mas ainda não objetiva melhorar a participação social na construção de planos proativos de seca.

Desse modo, nós desenvolvemos um jogo sério com o propósito de estimular a participação ativa dos atores locais na construção de um plano proativo de seca em hidrossistemas. O “Seca em Jogo” é considerado um jogo de intervenção, conforme definido por Rodela et al. (2019), porque proporciona a oportunidade de trocar informações, compartilhar conhecimentos e refletir criticamente sobre um problema, visando estimular e facilitar mudanças significativas. O jogo sério é apresentado como uma ferramenta para modelagem sócio-hidrológica, pois, além de facilitar a participação das partes interessadas na gestão de águas, é capaz de simular processos hidro-sociais que ocorrem num determinado local.

Portanto, o objetivo deste artigo é propor uma ferramenta metodológica para aprimorar o processo participativo na gestão proativa de secas. Neste artigo apresentamos o

“Seca em Jogo” desde a sua criação até a sua aplicação em dois hidrossistemas no estado do Ceará, localizado na região Nordeste do Brasil. Também exploramos as percepções dos participantes ao usar essa ferramenta para facilitar a participação de partes interessadas na construção de um plano proativo para lidar com a seca. A metodologia do "Seca em Jogo" inclui elementos de jogo, simulações e promove um processo participativo para oferecer uma experiência lúdica e educativa, que estimula o pensamento crítico e ações proativas em relação à seca e à gestão de recursos hídricos.

Ao capacitar e engajar os atores locais através de uma ferramenta divertida, busca-se reduzir as assimetrias de conhecimento e permitir que todos os atores possam colaborar como agentes de mudança e compreender as implicações de suas decisões no futuro da bacia hidrográfica.

5.2 Design do jogo

O "Seca em Jogo" é resultado de um programa de treinamento promovido pelo Instituto de Pesquisa em Meteorologia e Recursos Hídricos, em parceria com o Centro de Pesquisa Agrícola para o Desenvolvimento Internacional (CIRAD) da França, como parte da contribuição do “Projeto Sertões”. Durante o programa de treinamento, os pesquisadores da Funceme foram apresentados aos jogos sérios, suas aplicações, e foram convidados a criar um jogo sério. O "Seca em Jogo" é uma melhoria desta versão inicial de um jogo sério e foi adaptado às necessidades do desenvolvimento de planos de gestão proativa de seca.

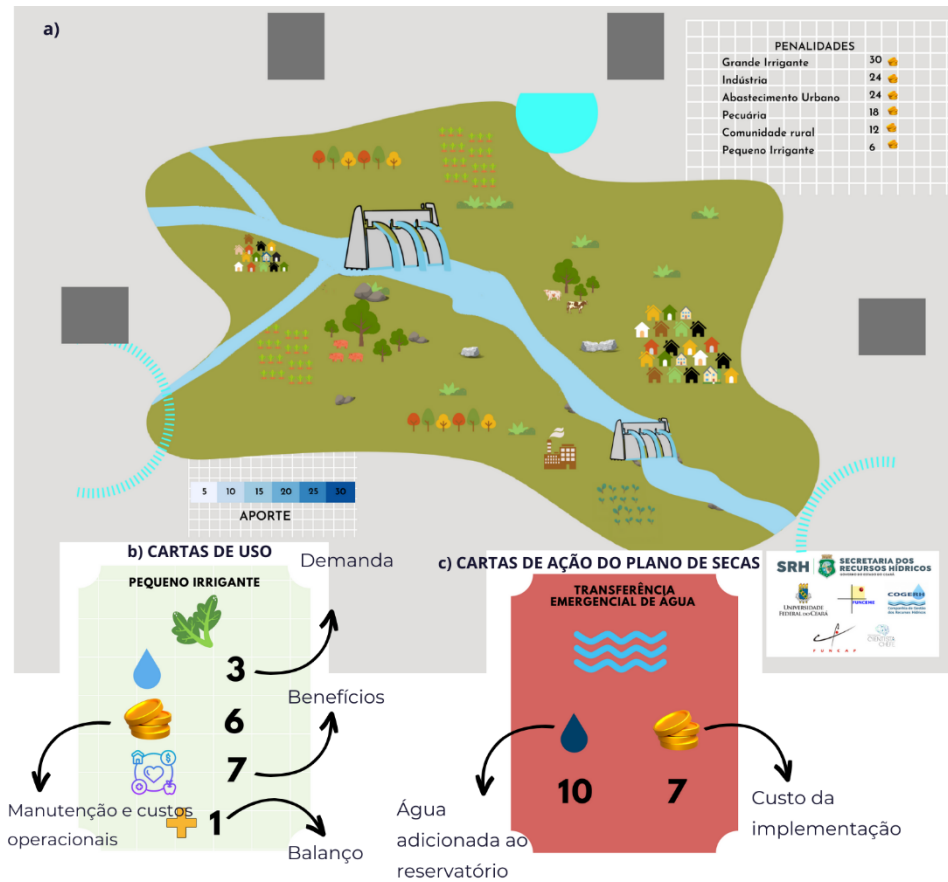
Os planos de secas são uma iniciativa do governo do estado do Ceará, através da Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap), para melhorar a resiliência a eventos de seca e são coordenados por um programa chamado Cientista-Chefe de Recursos Hídricos, um projeto que visa integrar a universidade e as políticas públicas. Em paralelo a outras iniciativas, este projeto tem como objetivo elaborar planos proativos de gestão de seca para hidrossistemas e regiões hidrográficas no estado do Ceará, contando com uma equipe multidisciplinar composta por hidrólogos, hidrogeólogos e sociólogos. Durante a formulação desses planos surgiu a necessidade de aprimorar o engajamento social e a compreensão dos principais conceitos relacionados ao planejamento proativo de seca. Conseqüentemente, surgiu a necessidade de desenvolver um jogo sério que possibilitasse a participação ativa e facilitasse a transmissão de conhecimento de maneira agradável e facilmente compreensível.

Para projetar o jogo, os seguintes aspectos foram considerados: partes interessadas, linguagem acessível, interface amigável, fácil jogabilidade e visualização lúdica sobre como um plano de seca funciona na prática.

O design do jogo concentrou-se em seu objetivo social: conscientizar os jogadores sobre a importância do planejamento e da tomada de decisões antecipadas na gestão de recursos hídricos, especificamente em relação ao esgotamento de reservatórios durante as secas. O jogo permite que os jogadores experimentem as consequências de suas decisões em um ambiente simulado, sem o risco de prejuízos ou danos reais. Nesta seção, vamos descrever, brevemente, os elementos e as configurações do jogo.

Os elementos do jogo são constituídos por: tabuleiro, “cartas de Usos” e “Cartas de Ação do Plano de Seca”, apresentados na Figura 15. O tabuleiro apresenta uma bacia hidrográfica fictícia. Ela é composta por dois reservatórios e diferentes usuários. O intuito é que ela possa representar diferentes configurações do mundo real, representando os conflitos que possam existir em distintos locais: conflitos entre usuários de jusante e montante, entre diferentes setores usuários, ou pela transferência de água entre bacias. As cartas de uso são compostas por seis categorias de usuários: Abastecimento Urbano, Abastecimento Rural, Pequeno Irrigante, Grande Irrigante, Pecuária e Indústria, conforme os principais usos identificados nos hidrossistemas cearenses. Cada carta apresenta a quantidade de água que será consumida no reservatório, o custo financeiro e os benefícios decorrentes do desenvolvimento de uma determinada atividade. Cada categoria de usuário tem à sua disposição três opções de carta de uso, diferenciando-se, uma das outras, de acordo com a quantidade de água a ser consumida, os custos e os benefícios associados. Por fim, as “Cartas de Ação do Plano de Seca” representam ações que podem ser tomadas em cada estado de seca. Elas possuem um custo de implementação que, em contrapartida, irão acrescentar água ao reservatório e minimizar o impacto da seca.

Figura 15 - Elementos do jogo: a) tabuleiro; b) exemplo de Cartas de Uso; e, c) exemplo de Cartas de Ação do Plano de Seca.



O jogo é composto por dois cenários distintos: no primeiro, os jogadores utilizam os recursos hídricos da bacia de forma livre; no segundo, as ações são guiadas pelas medidas previstas em um plano de secas, promovendo o uso conjunto dos recursos na bacia.

Cada jogador escolhe uma posição no jogo. Enfatiza-se ser importante que escolham posições que não ocupam em seu dia a dia, a fim de assumirem papéis diferentes dos seus. O facilitador explica que o jogo tem uma abordagem coletiva, em que todos os jogadores ganham ou perdem juntos. Para iniciar o jogo, o facilitador lê as instruções para os jogadores, fornecendo informações contextuais sobre as condições do reservatório, bem como os objetivos e regras das rodadas. O primeiro cenário é iniciado e, após 10 rodadas, representando 10 anos hidrológicos, se o reservatório ainda tiver água, todos os jogadores ganham. Caso contrário, ou seja, se os jogadores esvaziarem o reservatório antes da 10ª rodada, todos perdem. A Figura 16 ilustra as etapas do jogo.

Primeira rodada do primeiro cenário: é explicado que a estação chuvosa chegou ao fim e que o reservatório está com 80% de sua capacidade máxima. Cada jogador, então, coloca sua "Carta de Uso" com a demanda máxima de água. O facilitador soma a demanda e retira a

quantidade correspondente de água do reservatório. Em seguida, os jogadores verificam o saldo entre o custo operacional e o retorno financeiro. A rodada é encerrada quando os jogadores recebem dinheiro fictício pelos benefícios obtidos no ano atual. Para monitorar e controlar a capacidade do reservatório, o facilitador registra a capacidade no início e após a retirada da demanda de água pelos usuários.

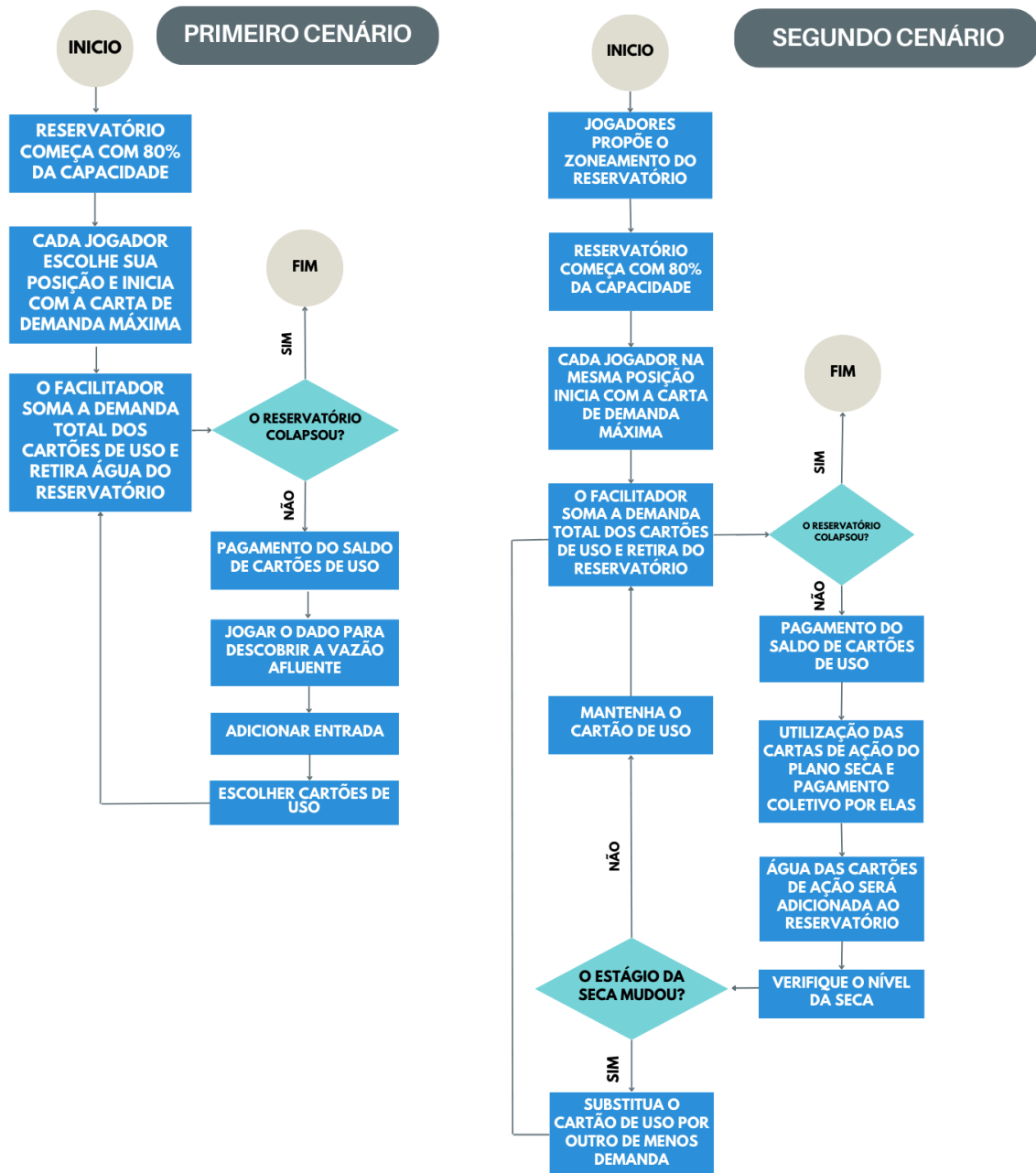
Segunda rodada do primeiro cenário - o jogo continua com o lançamento de um dado, que determina a quantidade aleatória de água que entrará no reservatório, simulando assim a variabilidade da afluência hídrica. Essa água é adicionada à quantidade acumulada no reservatório e os jogadores avaliam a disponibilidade hídrica e discutem se desejam trocar suas “Cartas de Uso”. A rodada termina novamente com o balanço financeiro, e esse processo se repete até completar as 10 jogadas, ou até que o reservatório entre em colapso.

O segundo cenário do Jogo Seca tem como objetivo introduzir os conceitos de um Plano Proativo de Secas. Nesta parte, os facilitadores explicam que o reservatório pode ser dividido em zonas para servir como gatilhos à tomada de decisões, como, por exemplo, quando reduzir o consumo de água ou quais ações serão acionadas. Assim, os estados de seca predeterminam as “Cartas de Usos” e o uso das “Cartas de Ação do Plano de Seca”.

Os jogadores devem chegar a um acordo e definir os níveis, divididos em três estados: Normal, Alerta e Seca. É enfatizado que, quanto mais baixos os níveis de seca definidos para o reservatório, mais tempo levará para que os usuários adotem medidas mais restritivas. Isso significa que os usuários irão usar mais água antes de restringir seu uso. Por outro lado, a capacidade de reação será menor quando um determinado estado for atingido. Dessa forma, os jogadores se conscientizam de que suas escolhas afetam a quantidade de água disponível para ser consumida e o risco ao qual estarão sujeitos em tempos de escassez.

A diferença entre o primeiro e o segundo cenários é que, neste último, com a implantação do plano de seca, as “Cartas de Usos” estão automaticamente vinculadas ao estágio de seca do reservatório. A carta com a demanda máxima pode ser usada exclusivamente no estágio normal, a carta com saldo nulo é automaticamente usada quando o reservatório atinge o estágio de alerta e a carta com saldo negativo é implementada quando no estágio de seca. Isso simboliza acordos pré-definidos durante a elaboração de um plano de secas sobre quais usos são permitidos em cada estado de seca na bacia.

Figura 16 - Fluxograma das etapas do Seca em Jogo para os cenários 1 e 2



Assim como no primeiro cenário, na primeira rodada o reservatório está a 80% de sua capacidade máxima ao final da estação chuvosa. Cada jogador coloca a demanda máxima para as Cartas de Uso. O facilitador soma a demanda e o valor é retirado do reservatório. Os jogadores consultam o saldo entre o custo operacional e o retorno financeiro. O fim da rodada ocorre quando os stakeholders recebem o dinheiro fictício pelos benefícios no ano corrente. O facilitador anota a capacidade do reservatório no início e após a retirada da demanda de água dos usuários.

Neste cenário, o dado não é mais jogado e a vazão afluente é a mesma em cada rodada do primeiro cenário. O objetivo dessa regra é relacionar o segundo cenário apenas aos estágios de seca definidos e às cartas de ação do Plano de Seca. O facilitador e os jogadores verificam o estágio atual de seca na segunda rodada. Se os jogadores alcançarem outro estágio de seca, eles trocam as “Cartas de Uso”, de acordo com o nível do reservatório, e implementam as “Cartas de Ação do Plano de Seca”. Os jogadores devem discutir e decidir, coletivamente, quem pagará pela ação e quanto. O facilitador, além de somar a demanda e a retirar do reservatório, registra a capacidade do reservatório no início, o fluxo de água e a retirada da demanda na rodada atual, de acordo com as “Cartas de Uso” utilizadas. Os jogadores avançam e percebem que, em cada rodada, há mais água no reservatório do que no cenário anterior. O jogo termina quando eles alcançam a mesma rodada em que o reservatório colapsou no primeiro cenário e percebem que isso não aconteceu no segundo cenário. No final do jogo, os jogadores são convidados a refletir sobre a experiência do jogo, em termos de diferenças entre tomar decisões sem planejamento prévio e sem ações coletivas. Refletem ainda sobre os conflitos de interesse e como a implementação de um Plano de Seca pode facilitar a gestão, definindo as regras e as ações a serem tomadas em todos os estágios de seca.

Além disso, os jogadores debatem e avaliam os níveis definidos para a zona do reservatório. Se estes forem muito baixos, o estado normal persistirá por mais tempo, mas as ações terão pouco efeito para manter o reservatório com água por mais tempo. Por outro lado, se os níveis de estágio de seca forem muito altos, o próximo estágio de seca será atingido mais rapidamente e, conseqüentemente, a restrição do uso da água será aplicada mais cedo.

Os jogadores também são convidados a discutir o risco que cada jogador carrega e se colocar no lugar do outro. Desse modo, podem entender as decisões dos outros jogadores, o que é importante para a colaboração entre os usuários de água, no sentido de que todos possam usar o recurso compartilhado de forma mais justa e sustentável. Podem, ainda, compreender posições e interesses afins e/ou divergentes e manifestar, de forma livre, suas opiniões e seus interesses nos usos das águas.

5.3 Aplicação do Seca em Jogo

5.3.1 Características da área de aplicação

A iniciativa de desenvolver planos de seca proativos veio do governo do estado do Ceará, especialmente após a ocorrência de um dos eventos de seca mais severos já registrados, a seca de 2012-2018 (PONTES FILHO et al., 2020). O estado do Ceará está localizado em sua quase totalidade na região semiárida do Brasil, caracterizada por baixos níveis de precipitação

(menos de 800 mm por ano), altas taxas de evaporação e solos rasos, o que torna a região vulnerável às secas (MARENGO et al., 2017). A região vem aumentando suas capacidades para lidar com as secas, tanto em termos de infraestrutura - com o desenvolvimento de uma grande rede de reservatórios plurianuais - quanto em termos de gestão, com o desenvolvimento de processos participativos de tomada de decisão e a operação de reservatórios com o apoio de sistemas de alerta precoce (CAMPOS, 2015; SOUZA FILHO et al., 2003). Essas capacidades desenvolvidas no estado foram importantes na mitigação dos impactos da recente seca. Mas ainda é necessário avançar para melhorar o planejamento proativo das futuras secas (GUTIÉRREZ et al., 2014). Diante dessa necessidade, o estado começou a investir no desenvolvimento de planos proativos de seca.

A elaboração do Plano de Gestão Proativa de Seca de Hidrossistemas tem como princípio fundamental a participação dos atores sociais que vivem e atuam no território, em especial as Comissões Gestoras de Sistemas Hídricos. Essa participação é garantida pela legislação brasileira e se tornou uma prática importante na política atual. É um elemento fundamental para que o planejamento seja de fato um instrumento capaz de sistematizar e refletir sobre os efeitos negativos das secas, antecipando as ações necessárias para enfrentar os desafios que esses efeitos apresentam.

As comissões gestoras são formadas por representantes dos usuários de água do hidrossistema, da sociedade civil organizada e do poder público. Essas comissões são responsáveis, dentre outras coisas, pela tomada de decisão em relação à gestão dos recursos hídricos em suas bacias. Apesar da experiência em tomar decisões coletivas, a comissão de usuários desconhece os principais conceitos trazidos no plano de secas, como a cenarização da seca, a proatividade das ações e o zoneamento dos reservatórios como gatilhos de ações.

O Seca em Jogo foi aplicado em dois hidrossistemas localizados no Estado do Ceará: Sistema Fogareiro-Quixeramobim, na Bacia do Banabuiú, e Sistema Tejuçuoca, na Bacia do Curu. Ambos enfrentam problemas frequentes com secas, o que gera conflitos diversos entre usuários de montante e jusante, bem como entre usuários de diferentes usos e distintas visões acerca da partilha da água. Normalmente, a gestão da seca é reativa, com a proibição de alguns tipos de uso na bacia e a tentativa de garantir a segurança hídrica das áreas urbanas.

5.3.2 Jogabilidade

Nesta seção, vamos apresentar os resultados do jogo aplicado com as Comissões Gestoras. O sucesso do jogo depende do engajamento dos jogadores. Aplicamos o “Seca em Jogo” em dois grupos compostos por usuários de diferentes setores de atividades, membros de

comissões gestoras dos açudes e técnicos da COGERH, totalizando 32 pessoas. Seguindo Barreteau et al. (2021), dividimos a aplicação do jogo em três etapas: Pré-jogo, Jogando e Pós-jogo.

5.3.2.1 *Pré-jogo*

A aplicação do Seca em Jogo corresponde a um dos elementos da metodologia para construção de planos proativos de seca. No primeiro momento, os atores locais são estimulados a relatar as vulnerabilidades vivenciadas pela população durante os últimos eventos de seca, os conflitos ocasionados ou potencializados e as memórias que essa experiência deixa para os atores sociais que a vivem. Em um segundo momento, os facilitadores se reúnem novamente com esses mesmos atores locais para criar um plano de ação para os próximos eventos de seca. No entanto, antes de começar a construir o plano de ação, o jogo é aplicado, servindo como uma ferramenta para quebrar o gelo, reduzir as assimetrias de conhecimento, engajar os atores no processo participativo e abordar os conceitos que serão necessários durante a construção do próprio plano.

Neste momento, explicamos brevemente o contexto e o objetivo do jogo. Os jogadores sentam-se ao redor de uma mesa, onde estão o tabuleiro, as cartas e todos os elementos do jogo. O facilitador lê a introdução sobre o jogo para envolver os participantes. Em seguida, explica as regras e convida os participantes a assumirem posições diferentes das que exercem na vida real. A intenção é estimular a empatia e experimentar diferentes perspectivas, posições e necessidades. Ao se colocarem no lugar de outros atores, os facilitadores e jogadores podem perceber diferentes visões e opiniões sobre os usos da água, normas e julgamentos morais em relação ao que seria considerado uso desperdiçador e uso econômico do recurso hídrico disponível. A etapa pré-jogo é curta, garantindo que os jogadores estejam motivados e dando tempo para que observem o tabuleiro e as cartas.

5.3.2.2 *Jogando*

Nesta etapa, os jogadores conhecem as regras e são capazes de jogar o jogo. Esta etapa consome mais tempo e a duração do jogo depende do dado e do fluxo de entrada de água no reservatório. Se o fluxo médio for alto, os jogadores terão mais rodadas. Caso contrário, o reservatório entrará em colapso em algumas rodadas. Em ambos os casos, o objetivo de aprendizado social é atingido.

Os facilitadores perceberam que o jogo atua como quebra-gelo e, ao quebrar a estrutura padrão de ensino e aprendizagem, baseada em um palestrante na frente e uma audiência passiva recebendo informações, o jogo cria uma estrutura descentralizada, que

permite a aprendizagem ativa e facilita a participação, abrindo oportunidades de fala para todos os participantes. Durante o jogo, os participantes compartilham suas experiências com a seca e observam diferenças e semelhanças com o mundo real (Figura 17).

A aplicação do jogo se destacou como uma atividade inovadora, que utiliza uma abordagem lúdica para abordar um assunto complexo e relativamente novo, como a gestão proativa de secas, mesmo para atores familiarizados com o processo de gestão de recursos hídricos. Nesse sentido, o jogo funcionou como uma ferramenta interativa e envolvente que permitiu reflexão e aprendizagem social baseadas na participação. O jogo permitiu que os jogadores experimentassem diferentes estratégias e tomassem decisões, analisando suas consequências em tempo real.

Os facilitadores também perceberam que o jogo tem um caráter inclusivo e diverso, permitindo que pessoas de diferentes faixas etárias e níveis educacionais participem ativamente e aprendam sobre gestão de secas, de maneira eficaz e interativa. Nesse sentido, o jogo proporciona, além de um componente participativo, o exercício de democratização de conhecimentos técnico-científicos, numa linguagem acessível e com implicações práticas na vida dos participantes.

Figura 17 - a) Aplicação do jogo com a comissão gestora do Sistema Fogareiro-Quixeramobim; b) Aplicação do jogo com os usuários de água do Sistema Tejuçuoca.



5.3.2.3 Pós-jogo

A última etapa tem grande importância porque estimula várias discussões. Trabalhamos com conceitos abordados pelo plano de seca para promover a compreensão do assunto. O jogo promoveu a percepção da importância do planejamento proativo da seca, com a definição de gatilhos e ações. Seca em Jogo cria oportunidades para os interessados pensarem e dialogarem coletivamente e verem como as decisões individuais levam a consequências coletivas. Os jogadores discutiram as diferenças e semelhanças com o mundo real, o risco que cada jogador carrega, a colaboração entre os usuários de água para que todos possam utilizar o

recurso compartilhado de forma mais justa e equitativa. Permitiu, de outro modo, apresentar situações veladas de conflitos e pontos de vista divergentes, ao sinalizar sobre como determinados atores agem e tomam suas decisões. Esses elementos são relevantes não apenas para o planejamento em si, mas para identificação de outras nuances que permeiam os contextos de seca no hidrossistema.

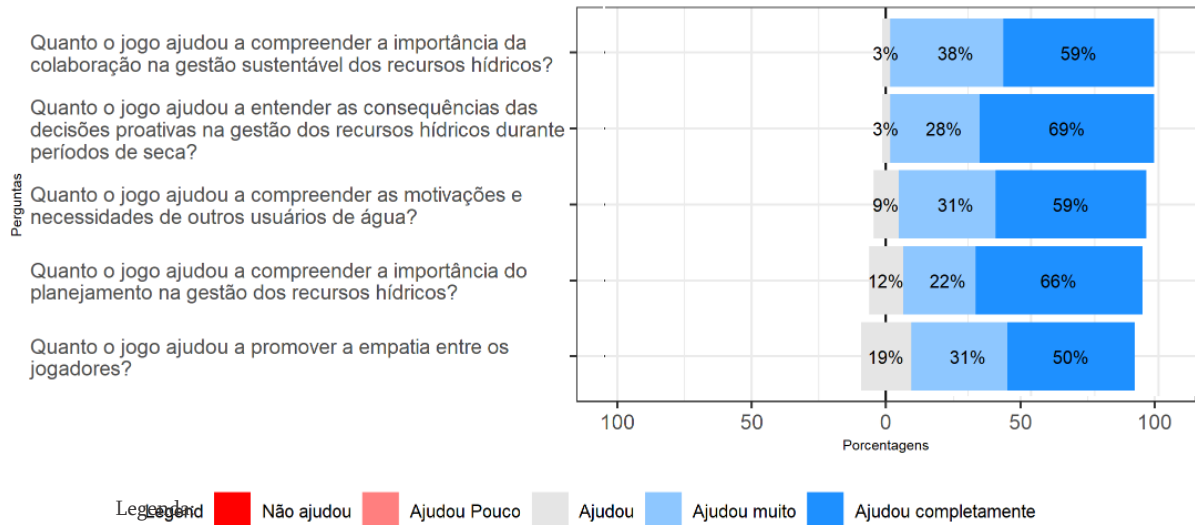
Após as discussões finais, os 32 stakeholders responderam a um formulário sobre sua experiência com o jogo. As principais impressões são apresentadas na Figura 18. Esses resultados indicam que o jogo teve um impacto positivo em relação aos aspectos avaliados pelos participantes e denotam a possibilidade de uso de jogos, como o Seca em Jogo, em processos mais elaborados de capacitação e planejamento participativo na gestão de recursos hídricos.

Os participantes foram perguntados se o jogo os ajudou a entender a importância da colaboração na gestão de recursos hídricos, tendo a maioria dos participantes (97%) respondido que o jogo os “ajudou muito” ou “ajudou fortemente”. Sobre entender as consequências de decisões preventivas durante a seca, a maioria dos participantes (91%) respondeu que o jogo “ajudou muito” ou “ajudou fortemente”. Além disso, os participantes foram questionados sobre como o jogo os ajudou a entender as motivações e necessidades de outros usuários de água, e 97% responderam que o jogo "ajudou muito" ou "ajudou fortemente".

A grande maioria dos participantes, cerca de 88%, respondeu que o jogo os “ajudou muito” ou “ajudou fortemente” sobre a compreensão da importância do planejamento na gestão de recursos hídricos. Ainda, para 19% o jogo “ajudou” a promover empatia entre os jogadores, 31% “ajudou muito” e metade dos participantes respondeu que o jogo “ajudou fortemente” a promover empatia entre os participantes.

O "Seca em Jogo" foi bem recebido pelos participantes, que o consideraram uma ferramenta interessante, lúdica, criativa e didática para aprimorar a tomada de decisões em relação à gestão dos recursos hídricos. A interatividade e a fácil compreensão do jogo foram elogiadas, bem como sua capacidade de prender a atenção dos participantes. Foi enfatizado que a necessidade de cada setor usuário deve ser considerada e que cada ação deve ser planejada em conjunto com todos os usuários. A percepção geral foi que o jogo permitiu uma melhor compreensão da realidade e da importância do uso consciente da água, além de possibilitar a tomada de decisões coletivas e a compreensão dos principais pontos e características do plano de gestão de secas.

Figura 18 - Impressões gerais do jogo conforme questionário aplicado no “Pós-jogo” com base em uma escala Likert de 5 pontos. A classificação “Ajudou completamente” conta como 5 e “Não ajudou” como 1.



Os participantes apresentaram opiniões variadas sobre a necessidade de melhorias do jogo sério. Alguns afirmaram que o jogo já atende a todas as necessidades de compreensão e que não precisa de melhorias, enquanto outros sugeriram mudanças, como uma explicação mais detalhada dos papéis de cada um no jogo e uma adaptação para o sistema de abastecimento local. Além disso, houve sugestões para facilitar a dinâmica de execução, a fim de que todos possam participar igualmente e compreender melhor a temática.

O feedback dos jogadores foi em sua maioria positivo e encorajador. Vários jogadores expressaram ter gostado do jogo e o consideraram uma atividade que facilita a compreensão dos diversos conceitos relacionados à gestão de secas. Em geral, os participantes concordaram que o jogo é uma ferramenta didática útil e interessante, mas que sempre há espaço para melhorias e aprimoramentos. O depoimento de um dos jogadores, após a realização do jogo, atesta os aspectos aqui destacados,

“Esse jogo nos ajudou a fazer exercício de reflexão e ao mesmo tempo também de discutir as tomadas de decisões e algumas execuções de planejamento dentro da percepção de como é que a gente poderia fazer o gerenciamento dos nossos reservatórios, bem como também direcionamento do consumo de água, seja para o consumo humano, seja para o consumo de poluição no nosso município (...). Então é um estímulo positivo pra que o trabalho em equipe materialize os

planejamentos e as estratégias. A gente poder fazer o melhor uso e uma melhor gestão dos recursos hídricos.” (Representante do Sindicato dos Trabalhadores Rurais Agricultores e Agricultoras Familiares de Quixeramobim, março, 2023).

Em geral, os jogadores demonstraram interesse, curiosidade e envolvimento com o jogo e a temática abordada. Mais que isso, o jogo proporciona que conceitos científicos e termos técnicos, muitas vezes de difícil compreensão, sejam vividos ludicamente na experiência coletiva, promovendo partilhas e colaboração entre os participantes.

5.4 Discussões e conclusões

Apresentamos um jogo sério denominado "Seca em Jogo", mostrando sua jogabilidade e aplicação em duas regiões marcadas pelo fenômeno da seca. O jogo visa estimular a participação ativa de seus jogadores na construção do plano de gestão proativo de secas no hidrossistema em que vivem, atuando como ferramenta de aprendizado social e estratégia de participação e envolvimento social na discussão dos diversos conceitos utilizados na gestão da seca. Além disso, o jogo permite que os atores entendam seus papéis como agentes de mudança e compreendam as implicações de suas decisões no futuro da bacia hidrográfica.

A simulação de cenários do hidrossistema por meio do Seca em Jogo permite uma percepção sobre as consequências da implantação de medidas de gestão da seca e como elas afetam a disponibilidade de água na região. Sivapalan e Blöschl (2015) apontam a potencialidade de prever os resultados de possíveis decisões como uma das características de um modelo sócio-hidrológico. Isso é importante para que os usuários possam compreender as implicações de suas decisões e se preparar melhor para lidar com desafios relacionados à gestão de recursos hídricos.

Uma das vantagens do Seca em Jogo é a sua capacidade de permitir que usuários exerçam papéis diferentes dos que exercem na realidade, colocando-se no papel do outro e facilitando a negociação de conflitos. Isso pode ser especialmente útil para promover a gestão de recursos hídricos, conforme apontado por Medema et al. 2016, pois permite que os usuários sintam as dores dos outros usuários, experimentem estratégias diferentes e tomem consciência que suas decisões individuais impactam a coletividade. Algumas simplificações foram realizadas para a criação do jogo, como, por exemplo, a que todos os jogadores ganham ou perdem juntos. Essa condição impõe uma situação de cooperativismo que, muitas vezes, se

distancia da realidade. No entanto, acreditamos que essa simplificação não seja um problema, haja vista que o objetivo do jogo é o aprendizado social.

As discussões geradas durante as sessões de aplicação do jogo permitiram aos participantes evoluírem seus pensamentos em busca de melhor compreensão do assunto, sendo a aprendizagem social apontada como uma das grandes contribuições deste jogo. Barreteau et al. (2021) destaca que jogos sérios permitem aos participantes “jogarem juntos”, o que significa que pessoas de diferentes status sociais concordam em interagir diretamente. Isso possibilita uma aprendizagem ativa e facilita a participação, permitindo que pessoas de diferentes faixas etárias e níveis educacionais se envolvam e aprendam sobre planejamento proativo de secas, rompendo com barreiras que impediriam sua participação numa metodologia tradicional.

Medema et al. 2020 investigaram o potencial dos jogos sérios em uma bacia transfronteiriça, mostrando como os participantes de diferentes nacionalidades puderam aprender uns com os outros aumentando a eficácia da gestão na região. Em nossa aplicação, mesmo os jogadores tendo origem, muitas vezes, na mesma cidade, as diferenças sociais e econômicas foram suficientes para marcarem essa troca de experiência e aprendizado. Mesmo porque a posição que esses atores ocupam no hidrossistema faz com que experimentem de forma desigual os efeitos da seca. Além disso, o jogo também serviu como quebra-gelo, rompendo a estrutura hierárquica de ensino e aprendizagem, colaborando para processos mais horizontais e participativos.

Ao usar uma abordagem lúdica para abordar um assunto complexo e relativamente novo, como o gerenciamento proativo de secas, os jogos sérios podem ajudar a mudar a percepção dos usuários sobre a importância desse problema. Os resultados deste estudo sugerem que o Seca em Jogo pode ser interpretado como uma ferramenta para modelagem sócio-hidrológica, com potencial para facilitar a gestão dos recursos hídricos, aprimorar a aprendizagem social e fornecer uma estrutura de conhecimento para lidar com desafios ambientais complexos.

Acreditamos que o "Seca em Jogo" sirva de instrumento para promover a gestão sustentável da água e o desenvolvimento de uma sociedade mais consciente e participativa em relação aos recursos hídricos, estando alinhado com diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU. Dentre os ODS relacionados, destacamos: o Objetivo 6, que busca garantir água potável e saneamento para todos, conscientizando os jogadores sobre a importância da gestão sustentável da água e do uso racional desse recurso compartilhado; o Objetivo 12, que tem como meta o consumo e produção responsáveis, estimulando a reflexão sobre o consumo de água e suas implicações e fomentando a adoção de

práticas mais responsáveis e sustentáveis em relação ao uso dos recursos naturais; o Objetivo 13, que visa a ação contra a mudança global do clima, uma vez que a intensificação da frequência e da severidade das secas é um dos impactos negativos das mudanças climáticas. Ao facilitar a criação de estratégias proativas para a gestão das águas em situações de estresse hídrico, o jogo se torna uma iniciativa importante para a mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Por fim, o Objetivo 17, que diz respeito às parcerias e meios de implementação, está relacionado à proposta do jogo, que envolve a participação de diversos atores sociais, como usuários de água, gestores públicos e sociedade civil organizada, buscando uma abordagem participativa e colaborativa para a gestão dos recursos hídricos.

A aplicação do formulário sugere que o jogo teve um impacto positivo em relação aos aspectos avaliados pelos participantes. O jogo proporcionou compreensão e facilitou as discussões sobre o processo de planejamento, visando a próxima etapa de desenvolvimento de um plano de ação para mitigar os efeitos da seca e aumentar o potencial de uso do plano de seca. O jogo alcançou seus objetivos ao promover discussões aprofundadas que contribuíram para o desenvolvimento de um plano de seca proativo, oferecendo uma metodologia que aproxima a sociedade civil do planejamento governamental e sendo facilmente replicável.

Conforme apontado por Richard-Ferroudji and Barreteau (2012), jogos sérios como o Seca em Jogo não são um “produto final”. Em nosso caso ele é parte do processo de construção dos planos proativos de secas, viabiliza o aprendizado social, o engajamento/envolvimento dos participantes no planejamento de secas e promove a discussão sobre ações que vão embasar um plano de ações.

De modo geral, os facilitadores perceberam uma evolução considerável na etapa de construção dos planos proativos de seca de quando não existia a aplicação prévia do Seca em Jogo para quando houve a sua aplicação. Relatos como "Lembram quando durante o jogo fizemos isso?" foram frequentes, demonstrando que o jogo cumpriu seu objetivo de promover a aprendizagem social e gerar uma maior consciência coletiva sobre como utilizar o novo instrumento de planejamento. Houve uma melhoria nas propostas de ações para o plano proativo, uma vez que os atores estavam mais engajados e conscientes da importância desse instrumento.

Mais pesquisas são necessárias para explorar todo o potencial dos jogos sérios como modelo sócio-hidrológico e identificar as estratégias mais eficazes para usar jogos sérios no contexto da gestão proativa de secas.

6 CONCLUSÃO

Esta tese tem por objetivo aprimorar as ferramentas de participação social na gestão de recursos hídricos por meio de modelagem colaborativa que incorpore a criação de sistemas de preferências de usuários e gestores de água para a tomada de decisão de alocação de águas em reservatórios durante secas, assim como, capacitar os agentes sociais envolvidos no processo de alocação por meio de jogo sério. Os resultados foram alcançados por meio de pesquisas que resultaram em três artigos científicos.

No primeiro artigo, foi proposto o desenvolvimento de uma metodologia para a modelagem de um sistema sócio-natural que permitisse a tomada de decisão na alocação de recursos hídricos através de diagramas de influência. A metodologia foi capaz de integrar variáveis quantitativas e qualitativas, indo desde a informação de previsão climática sazonal até um sistema de preferência para a decisão, integrando toda a cadeia causal da alocação de curto prazo e fornecendo informações para um processo decisório que incorporasse a incerteza, os riscos e os benefícios das decisões.

A construção do diagrama de influência perpassa pelo acoplamento do modelo de previsão climática sazonal, correção do viés do modelo de previsão-precipitação, modelagem hidrológica chuva-vazão e modelo de simulação de reservatórios acoplado a um modelo de tomada de decisão. As diversas simulações realizadas permitiram a construção das matrizes de probabilidade condicional que foram incorporadas no modelo.

A natureza lógica e visual do diagrama de inferência utilizado para construir o sistema de suporte a decisão facilita a compreensão e a contribuição de especialistas e não especialistas no processo de desenvolvimento, permitindo uma maior diversidade de perspectivas e conhecimentos. A melhoria das informações utilizadas no modelo é essencial para garantir a confiabilidade das inferências realizadas. A coleta de mais dados, o uso de técnicas avançadas, como o aprendizado de máquina, e a incorporação de conhecimento especializado podem contribuir para aprimorar a previsibilidade das inferências feitas pelo modelo.

O modelo desenvolvido neste estudo estabelece uma base para abordar os conflitos relacionados ao uso da água, levando em consideração diferentes interesses e necessidades, e promovendo uma gestão mais eficiente e equitativa dos recursos hídricos. No entanto, para aumentar a aceitação e aplicabilidade do modelo, é essencial envolver as partes interessadas em seu processo de desenvolvimento. Por meio de uma abordagem participativa, as partes

interessadas têm a oportunidade de contribuir com suas perspectivas e conhecimentos, enriquecendo o modelo de forma abrangente, inclusiva e legitimada pelos envolvidos.

Diante disso, no segundo artigo, propomos uma metodologia de modelagem colaborativa que pudesse incorporar a preferência dos usuários e gestores de recursos hídricos no desenvolvimento de uma política ótima de operação de reservatórios com salvaguardas. O modelo proposto permite a interação entre a alocação de curto e longo prazo, ao definir a capacidade de atendimento do reservatório com base em critérios que consideram a aceitação das partes interessadas em relação a possíveis falhas de atendimento.

A modelagem colaborativa permitiu definir parâmetros que podem ser usados na política de operação de um sistema de reservatórios através da otimização de preferências dos usuários, deixando de lado a otimização clássica que visa minimizar somente vertimentos ou evaporações dos reservatórios, tornando o processo de otimização das curvas guias de operações não apenas matemático, mas considerando aspectos sociais e políticos na decisão. Destaca-se que as funções objetivos desempenham um papel crucial na determinação dos riscos pelo tomador de decisões. É importante ressaltar que o modelo tentará atender às demandas estabelecidas pelas partes, mesmo que essas demandas não sejam respaldadas por justificativas técnicas. Portanto, é essencial a identificação dos atores que tenham legitimidade para tomar a decisão e que essas partes interessadas reflitam sobre suas preferências reais, a fim de tornar o processo equitativo e eficiente.

Neste estudo, aplicamos a metodologia participativa com técnicos da COGERH com o intuito de realizar uma prova conceitual do método. A COGERH exerce um papel importante nas decisões de alocação uma vez que como órgão de gerenciamento,

“elabora e apresenta pareceres técnicos, cenários de alocação de água, dados de oferta e demanda. Faz ainda a mobilização social dos atores e apoia (financeira e tecnicamente) as ações dos órgãos colegiados com quem dialoga. Ocupa ainda a posição de mantedor e provedor de infraestrutura (mesma que essa última não seja sua finalidade). Além dessas posições, a Companhia assume a posição de advogada da transferência de água para a RMF como uso prioritário” (AQUINO, 2019, p. 207).

Destacamos ainda que a metodologia aqui apresentada está sendo aplicada na construção de planos proativos de secas realizadas no âmbito do projeto Cientista Chefe de Recursos Hídricos. Até o momento, a aplicação da metodologia foi feita com as comissões

gestoras de três hidrossistemas no território cearense: Hidrossistema Patu, Fogareiro-Quixeramobim e Tejuçuoca e demonstrou boa aceitação por parte desses atores.

A maneira de aumentar as chances de implementação da política de operação criada é, como propusemos, envolver as partes interessadas em todas as fases da modelagem, desde a elaboração dos valores de entrada do modelo até a validação e aceitação da regra construída. Dessa forma, propomos no terceiro artigo uma ferramenta metodológica para aprimorar o processo participativo na gestão de recursos hídricos.

O "Seca em Jogo" proporciona a oportunidade de trocar informações, compartilhar conhecimentos e refletir criticamente sobre um problema da gestão proativas de secas, visando estimular e facilitar mudanças na governança da água numa bacia hidrográfica. O jogo sério é uma ferramenta para modelagem sócio-hidrológica, pois, além de facilitar a participação das partes interessadas na gestão de águas, é capaz de simular processos hidro-sociais que ocorrem num determinado local.

O jogo estimula a participação ativa de seus jogadores na construção do plano de gestão proativo de secas no hidrossistema em que vivem, servindo como ferramenta de aprendizado social e estratégia de participação e envolvimento na discussão dos diversos conceitos utilizados na gestão da seca. O "Seca em jogo" permite, ainda, que usuários exerçam papéis diferentes dos que exercem na realidade, colocando-se no lugar do outro e facilitando a negociação de conflitos.

As discussões geradas durante as sessões de aplicação do jogo permitiram aos participantes compreenderem melhor o assunto, sendo a aprendizagem social apontada como uma das grandes contribuições deste jogo, rompendo com barreiras que impediriam sua participação numa metodologia tradicional. Além disso, o jogo permitiu que os atores entendessem seus papéis como agentes de mudança e compreendessem as implicações de suas decisões no futuro da bacia hidrográfica. Destaco, novamente, que o "Seca em Jogo" é um jogo para mobilizar atores e ensiná-los sobre os diferentes conceitos que compõe a gestão proativa de secas, não sendo possível capturar o sistema de preferências dos participantes.

Ainda, cada artigo apresenta um conjunto de recomendações relevantes para trabalhos futuros a partir da avaliação das limitações encontradas em cada estudo. No primeiro estudo, seria de grande interesse incorporar as partes interessadas no processo de construção e validação da rede de inferências, permitindo uma abordagem mais participativa e abrangente. Além disso, seria importante explorar a utilização de uma rede de inferências dinâmicas, permitindo a análise dos efeitos das decisões de curto prazo na disponibilidade hídrica ao longo dos anos subsequentes, especialmente em um contexto de incerteza climática. Recomenda-se a

realização de testes adicionais com diferentes discretizações das variáveis, com o objetivo de aprimorar a capacidade preditiva da rede e obter resultados mais robustos. Por fim, recomenda-se a capacitação com diferentes atores com o objetivo de melhorar aceitação do modelo para entender as reais dificuldades de se utilizar esse modelo para subsidiar a decisão da alocação.

No segundo estudo, é recomendável a inclusão de outras partes interessadas, como os usuários de água, a fim de obter uma visão mais abrangente e representativa do sistema de recursos hídricos no qual a metodologia foi aplicada. Além disso, seria relevante realizar uma comparação entre as diferentes curvas geradas a partir das decisões tomadas por indivíduos que ocupam diferentes posições no campo de tomada de decisão, permitindo uma análise mais abrangente dos impactos e *trade-offs* envolvidos. No terceiro estudo, é importante realizar mais pesquisas para explorar o potencial das ferramentas e metodologias dos jogos sérios como ferramentas para modelagem sócio-hidrológica, buscando identificar as estratégias mais eficazes para sua aplicação no contexto da gestão proativa de secas. Destaca-se que as metodologias propostas no segundo e terceiro estudos estão atualmente sendo implementadas na elaboração de Planos Proativos de Secas no Estado do Ceará, o que reforça sua relevância e contribuição prática para a gestão dos recursos hídricos.

Por fim, a proposta de metodologias que integrem modelos e ferramentas para a tomada de decisão em recursos hídricos, com foco em abordagens socio-naturais, desempenha um papel crucial na modelagem de sistemas complexos, como o da alocação de águas. Essa abordagem considera a interação entre componentes sociais e naturais, reconhecendo a importância da participação social e da compreensão dos aspectos ambientais na gestão eficiente e equitativa dos recursos hídricos. A criação de um sistema de preferência de usuários e tomadores de decisão possibilita a inclusão de diferentes perspectivas e interesses, promovendo uma gestão equitativa dos recursos hídricos. Através dessa abordagem participativa, os atores envolvidos têm a oportunidade de contribuir com seu conhecimento e interesse, garantindo que o modelo seja mais completo e legitimado pelos tomadores de decisão. Essa metodologia representa um avanço na busca por soluções eficientes e socialmente justas para o gerenciamento dos recursos hídricos, e sua aplicação prática pode resultar em benefícios concretos para a natureza e sociedade.

REFERÊNCIAS

- ABERS, Rebecca Neera et al. Inclusão, deliberação e controle: três dimensões de democracia nos comitês e consórcios de bacias hidrográficas no Brasil. **Ambiente & Sociedade**, v. 12, p. 115-132, 2009.
- ABRAMI, Géraldine et al. Wat-A-Game, a toolkit for building role-playing games about integrated water management.
- ADNAN, Shahzada et al. Comparison of various drought indices to monitor drought status in Pakistan. **Climate Dynamics**, v. 51, p. 1885-1899, 2018.
- AGUILERA, Pedro Aguilera et al. Bayesian networks in environmental modelling. **Environmental Modelling & Software**, v. 26, n. 12, p. 1376-1388, 2011.
- AKHTAR, Mohammad Khaled et al. A serious gaming tool: Bow River Sim for communicating integrated water resources management. **Journal of Hydroinformatics**, v. 22, n. 3, p. 491-509, 2020.
- ALEMU, Eset T. et al. Decision support system for optimizing reservoir operations using ensemble streamflow predictions. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 137, n. 1, p. 72-82, 2011.
- AN, Li. Modeling human decisions in coupled human and natural systems: Review of agent-based models. **Ecological modelling**, v. 229, p. 25-36, 2012.
- AQUINO, Sandra Helena Silva de. Entre escassez, prioridades e negociações: a COGERH e os trajetos e destinos das águas que vêm do Sertão para a Metrópole. 2019. 269f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Humanidades, Programa de Pós-graduação em Sociologia, Fortaleza, 2019.
- AQUINHO, Sandra Helena Silva de et al. Conflitos e incertezas do processo de alocação negociada de água. In: XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2012, João Pessoa. XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2012.
- AQUINHO, Sandra Helena Silva de et al. Alocação de longo prazo no estado do Ceará. In: Gerenciamento de Recursos Hídricos no Semiárido. Souza Filho, F. A., Campos, J. N. B., Aquino, S. H. S., eds. Edição Gráfica e Editora, Fortaleza, Brazil, 257 – 275, 2013.
- ARAÚJO JUNIOR, Luiz Martins de et al. Avaliação de índices de seca meteorológica e hidrológica em relação ao impacto de acumulação de água em reservatório: um estudo de caso para o reservatório de Jucazinho-PE. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales**, México, v. 13, n. 2, p. 382-398, 2020.
- ASHOFTEH, Parisa-Sadat; BOZORG-HADDAD, Omid; LOÁICIGA, Hugo A. Logical genetic programming (LGP) development for irrigation water supply hedging under climate change conditions. **Irrigation and Drainage**, v. 66, n. 4, p. 530-541, 2017.

- ASHRAFI, Seyed Mohamed. Two-stage metaheuristic mixed integer nonlinear programming approach to extract optimum hedging rules for multireservoir systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 147, n. 10, p. 04021070, 2021.
- BARRETEAU, Olivier et al. Serious games. In: The Routledge handbook of research methods for social-ecological systems. Routledge, 2021. p. 176-188.
- BARTON, David N. et al. Bayesian networks in environmental and resource management. *Integrated environmental assessment and management*, v. 8, n. 3, p. 418-429, 2012.
- BASCO-CARRERA, Laura et al. Collaborative modelling or participatory modelling? A framework for water resources management. **Environmental Modelling & Software**, v. 91, p. 95-110, 2017.
- BASHEER, Mohammed et al. Collaborative management of the Grand Ethiopian Renaissance Dam increases economic benefits and resilience. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 5622, 2021.
- BATHKE, Deborah J. et al. Using serious games to facilitate collaborative water management planning under climate extremes. **Journal of contemporary water research & education**, v. 167, n. 1, p. 50-67, 2019.
- Bayesfusion. GeNIe Modeler. Disponível em : <https://www.bayesfusion.com/genie/>. Acesso em: 7 de junho de 2023.
- BAYESTEH, Mostafa; AZARI, Arash. Stochastic optimization of reservoir operation by applying hedging rules. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 147, n. 2, p. 04020099, 2021.
- BERKES, Fikret; FOLKE, Carl; COLDING, Johan (Ed.). Linking social and ecological systems: management practices and social mechanisms for building resilience. Cambridge University Press, 2000.
- BLAIR, Peter; BUYTAERT, Wouter. Socio-hydrological modelling: a review asking “why, what and how?”. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 20, n. 1, p. 443-478, 2016.
- BLOCK, Paul J. et al. A streamflow forecasting framework using multiple climate and hydrological models 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 45, n. 4, p. 828-843, 2009.
- BRAVO, Juan Martín; COLLISCHONN, Walter; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Verificação da eficiência e eficácia de um algoritmo evolucionário multi-objetivo na calibração automática do modelo hidrológico IPH II. Rbrh: revista brasileira de recursos hídricos. Porto Alegre, RS. Vol. 14, n. 3 (jul./set. 2009), p. 37-50, 2009.
- BROWN, Casey M. et al. The future of water resources systems analysis: Toward a scientific framework for sustainable water management. **Water resources research**, v. 51, n. 8, p. 6110-6124, 2015.

CAMPOS, J.N.B. Paradigms and Public Policies on Drought in Northeast Brazil: A Historical Perspective. **Environ. Manag.** 2015, 55, 1052–1063.

CARR, Gemma; BLÖSCHL, Gunter; LOUCKS, Daniel Peter. Evaluating participation in water resource management: A review. **Water Resources Research**, v. 48, n. 11, 2012.

CARRIGER, John F.; DYSON, Brian E.; BENSON, William H. Representing causal knowledge in environmental policy interventions: Advantages and opportunities for qualitative influence diagram applications. **Integrated environmental assessment and management**, v. 14, n. 3, p. 381-394, 2018.

CASTELLETTI, Andrea; SONCINI-SESSA, Rodolfo. Bayesian Networks and participatory modelling in water resource management. **Environmental Modelling & Software**, v. 22, n. 8, p. 1075-1088, 2007.

CEARÁ, Governo do Estado do Ceará. Lei Estadual nº 14.844-Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos. Institui o Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos-SIGERH, e dá outras providências. Publicação Diário Oficial do Estado, Série, v. 3, 2010.

CHANG, Jianxia et al. Reservoir operations to mitigate drought effects with a hedging policy triggered by the drought prevention limiting water level. **Water Resources Research**, v. 55, n. 2, p. 904-922, 2019.

CID, Daniel Antonio Camelo; DE SOUZA FILHO, Francisco de Assis; PORTO, Victor Costa. Collaborative modeling to construct a hedging policy for drought management in reservoir systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 149, n. 1, p. 05022012, 2023.

COGERH. Seminário dos Usuários das Águas dos Vales do Jaguaribe e Banabuiú. Ceará. Relatório. 1994.

DEN HAAN, Robert-Jan et al. The Virtual River Game: Gaming using models to collaboratively explore river management complexity. **Environmental modelling & software**, v. 134, p. 104855, 2020.

DI BALDASSARRE, Giuliano et al. Sociohydrology: scientific challenges in addressing the sustainable development goals. **Water Resources Research**, v. 55, n. 8, p. 6327-6355, 2019.

DI BALDASSARRE, Giuliano et al. Water shortages worsened by reservoir effects. **Nature Sustainability**, v. 1, n. 11, p. 617-622, 2018.

DI BALDASSARRE, Giuliano et al. Towards understanding the dynamic behaviour of floodplains as human-water systems. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 8, p. 3235-3244, 2013.

DRAPER, Andrew J.; LUND, Jay R. Optimal hedging and carryover storage value. **Journal of water resources planning and management**, v. 130, n. 1, p. 83-87, 2004.

ELSAWAH, Sondoss et al. An overview of the system dynamics process for integrated modelling of socio-ecological systems: Lessons on good modelling practice from five case studies. **Environmental Modelling & Software**, v. 93, p. 127-145, 2017.

ESTÁCIO, Ályson Brayner Sousa et al. Priority of water allocation during drought periods: the case of Jaguaribe Metropolitan inter-basin water transfer in semiarid Brazil. **Sustainability**, v. 14, n. 11, p. 6876, 2022.

ESTRELA, Teodoro et al. Droughts and the European water framework directive: implications on Spanish river basin districts. Drought management and planning for water resources, p. 169-191, 2005.

FORMIGA-JOHNSON, Rosa Maria; KEMPER, Karin. Institutional and policy analysis of river basin management: the Jaguaribe river basin, Ceará, Brazil. **World Bank Policy research working paper**, n. 3649, 2005.

FUNK, C. et al. and Michaelsen. J.: The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes, **Sci. Data**, v. 2, p. 150066.

GALLOPIN, Gilberto C.; GUTMAN, Pablo; MALETTA, Hector. Global impoverishment, sustainable development and the environment: a conceptual approach. 1988.

GLEICK, Peter H. Global freshwater resources: soft-path solutions for the 21st century. **Science**, v. 302, n. 5650, p. 1524-1528, 2003.

GUTIÉRREZ, Ana Paula A. et al. Drought preparedness in Brazil. **Weather and Climate Extremes**, v. 3, p. 95-106, 2014.

HARRIS, Ian et al. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. **Scientific data**, v. 7, n. 1, p. 109, 2020.

HASHIMOTO, Tsuyoshi; STEDINGER, Jery R.; LOUCKS, Daniel P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. **Water resources research**, v. 18, n. 1, p. 14-20, 1982.

HERMAN, Jonathan D. et al. How should robustness be defined for water systems planning under change?. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 141, n. 10, p. 04015012, 2015.

HUFFMAN, George J. et al. The global precipitation climatology project (GPCP) combined precipitation dataset. **Bulletin of the american meteorological society**, v. 78, n. 1, p. 5-20, 1997.

HYUN, Jin-Young et al. Using a coupled agent-based modeling approach to analyze the role of risk perception in water management decisions. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 23, n. 5, p. 2261-2278, 2019.

JAEGER, William K. et al. Scope and limitations of drought management within complex human–natural systems. **Nature Sustainability**, v. 2, n. 8, p. 710-717, 2019.

JAKEMAN, Anthony J.; LETCHER, Rebecca A.; NORTON, John P. Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models. **Environmental Modelling & Software**, v. 21, n. 5, p. 602-614, 2006.

LIU, Jianguo et al. Coupled human and natural systems. **AMBIO: a journal of the human environment**, v. 36, n. 8, p. 639-649, 2007.

JIN, Youngkyu; LEE, Sangho. Comparative effectiveness of reservoir operation applying hedging rules based on available water and beginning storage to cope with droughts. **Water Resources Management**, v. 33, p. 1897-1911, 2019.

JOO, Hongjun et al. A Bayesian network-based integrated for flood risk assessment (InFRA). **Sustainability**, v. 11, n. 13, p. 3733, 2019.

KAINER, Karen A. et al. Partnering for greater success: local stakeholders and research in tropical biology and conservation. **Biotropica**, v. 41, n. 5, p. 555-562, 2009.

KASPRZYK, Joseph R. et al. Many objective robust decision making for complex environmental systems undergoing change. **Environmental Modelling & Software**, v. 42, p. 55-71, 2013.

KOUTSOYIANNIS, Demetris; ECONOMOU, Athanasia. Evaluation of the parameterization-simulation-optimization approach for the control of reservoir systems. **Water Resources Research**, v. 39, n. 6, 2003.

KOUTSOYIANNIS, D.; ECONOMOU, A. Mathematical study of the concept of equivalent reservoir. **Technical Rep. Athens, Greece: National Technical Univ. of Athens**, 2003.

KOUTSOYIANNIS, D.; EFSTRATIADIS, A.; KARAVOKIROS, G. A decision support tool for the management OF multi-reservoir systems. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 38, n. 4, p. 945-958, 2002.

KUMAR, Kranthi; KASTHURIRENGAN, Srinivasan. Generalized linear two-point hedging rule for water supply reservoir operation. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 144, n. 9, p. 04018051, 2018.

KUMAR, Praveen. Hydrocomplexity: Addressing water security and emergent environmental risks. **Water Resources Research**, v. 51, n. 7, p. 5827-5838, 2015.

KWAKKEL, Jan H.; WALKER, Warren E.; HAASNOOT, Marjolijn. Coping with the wickedness of public policy problems: approaches for decision making under deep uncertainty. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 142, n. 3, p. 01816001, 2016.

LABADIE, John W. Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review. **Journal of water resources planning and management**, v. 130, n. 2, p. 93-111, 2004.

LADYMAN, James; LAMBERT, James; WIESNER, Karoline. What is a complex system?. **European Journal for Philosophy of Science**, v. 3, p. 33-67, 2013.

LANGSDALE, Stacy et al. Collaborative modeling for decision support in water resources: Principles and best practices. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 49, n. 3, p. 629-638, 2013.

BRASIL, Lei Nº. 9.433, DE 8 DE JANEIRO DE 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art, v. 21, p. 9433-97, 2010.

LIU, Jianguo et al. Complexity of coupled human and natural systems. **Science**, v. 317, n. 5844, p. 1513-1516, 2007.

LOPES, João Eduardo Gonçalves; BRAGA JR, B. P. F.; CONEJO, João Gilberto Lotufo. Simulação hidrológica: Aplicações de um modelo simplificado. Anais do III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, v. 2, p. 42-62, 1981.

LOUCKS, Daniel P.; VAN BEEK, Eelco. Water resource systems planning and management: An introduction to methods, models, and applications. Springer, 2017.

LUND, Jay R.; REED, Robert U. Drought water rationing and transferable rations. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 121, n. 6, p. 429-437, 1995.

MADANI, Kaveh; HOOSHYAR, Milad. A game theory–reinforcement learning (GT–RL) method to develop optimal operation policies for multi-operator reservoir systems. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 732-742, 2014.

MARENGO, Jose A.; TORRES, Roger Rodrigues; ALVES, Lincoln Muniz. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, p. 1189-1200, 2017.

MARIANO, Dandara Jucá Kokay; ALVES, Conceição de Maria Albuquerque. The application of role-playing games and agent-based modelling to the collaborative water management in peri-urban communities. **RBRH**, v. 25, 2020.

MCKEE, Thomas B. et al. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. 1993. p. 179-183.

MEDEIROS, Pedro; SIVAPALAN, Murugesu. From hard-path to soft-path solutions: slow–fast dynamics of human adaptation to droughts in a water scarce environment. **Hydrological Sciences Journal**, v. 65, n. 11, p. 1803-1814, 2020.

MEDEMA, Wietske et al. Exploring the potential impact of serious games on social learning and stakeholder collaborations for transboundary watershed management of the St. Lawrence River Basin. **Water**, v. 8, n. 5, p. 175, 2016.

MICHAEL, David R.; CHEN, Sandra L. Serious games: Games that educate, train, and inform. **Muska & Lipman/Premier-Trade**, 2005.

MOSTERT, Erik. An alternative approach for socio-hydrology: case study research. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, n. 1, p. 317-329, 2018.

- MUKHOPADHYAY, Sudarshana; SANKARASUBRAMANIAN, A.; DE QUEIROZ, Anderson Rodrigo. Performance comparison of equivalent reservoir and multireservoir models in forecasting hydropower potential for linking water and power systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 147, n. 4, p. 04021005, 2021.
- NEELAKANTAN, T. R.; SASIREKA, K. Review of hedging rules applied to reservoir operation. **Int. J. Eng. Technol**, v. 7, n. 5, p. 1571-1580, 2015.
- NÉTICA. Netica Application Software. Disponível em: <https://www.norsys.com/download.html>. Acesso em: 7 de junho de 2023.
- NOJAVAN, Farnaz; QIAN, Song S.; STOW, Craig A. Comparative analysis of discretization methods in Bayesian networks. **Environmental Modelling & Software**, v. 87, p. 64-71, 2017.
- OSTROM, Elinor. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. **Science**, v. 325, n. 5939, p. 419-422, 2009.
- PALMER, Richard N. et al. Disciplined planning, structured participation, and collaborative modeling—Applying shared vision planning to water resources. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 49, n. 3, p. 614-628, 2013.
- MEDEIROS, Pedro; SIVAPALAN, Murugesu. From hard-path to soft-path solutions: slow–fast dynamics of human adaptation to droughts in a water scarce environment. **Hydrological Sciences Journal**, v. 65, n. 11, p. 1803-1814, 2020.
- PENG, Yong et al. Optimization operation model coupled with improving water-transfer rules and hedging rules for inter-basin water transfer-supply systems. **Water resources management**, v. 29, p. 3787-3806, 2015.
- PEREIRA, Mario VF; PINTO, Leontina MVG. Multi-stage stochastic optimization applied to energy planning. **Mathematical programming**, v. 52, p. 359-375, 1991.
- PHAN, Thuc D. et al. Applications of Bayesian belief networks in water resource management: A systematic review. **Environmental Modelling & Software**, v. 85, p. 98-111, 2016.
- PODĚBRADSKÁ, Markéta et al. Ready for drought? A community resilience role-playing game. **Water**, v. 12, n. 9, p. 2490, 2020.
- PONTES FILHO, João Dehon et al. Copula-based multivariate frequency analysis of the 2012–2018 drought in Northeast Brazil. **Water**, v. 12, n. 3, p. 834, 2020.
- PROJETO ALOCA. Relatório de Cálculo das Afluências aos Reservatórios Estratégicos do Ceará: Definição das Vazões Oficiais. [Relatório]. Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico. 2021. Disponível em: <https://portal.cogerh.com.br/definicao-das-vazoes-oficiais-dos-reservatorios-monitorados-pela-cogerh>. Acesso em 23 de mai. 2022.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2022. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 7 de junho de 2023.

RANI, Deepti; MOREIRA, Maria Madalena. Simulation–optimization modeling: a survey and potential application in reservoir systems operation. **Water resources management**, v. 24, p. 1107-1138, 2010.

RASO, L.; CHIAVICO, M.; DORCHIES, D. Optimal and centralized reservoir management for drought and flood protection on the Upper Seine–Aube river system using stochastic dual dynamic programming. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 145, n. 3, p. 05019002, 2019.

RICHARD-FERROUDJI, Audrey; BARRETEAU, Olivier. Assembling different forms of knowledge for participative water management-Insights from the Concert'eau game. 2012.

ROA-GARCÍA, María Cecilia. Equity, efficiency and sustainability in water allocation in the Andes: Trade-offs in a full world. 2014.

RODELA, Romina; LIGTENBERG, Arend; BOSMA, Roel. Conceptualizing serious games as a learning-based intervention in the context of natural resources and environmental governance. **Water**, v. 11, n. 2, p. 245, 2019.

ROECKNER, Erich et al. The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model description and simulation of present-day climate. 1996.

RUBIO-MARTIN, Adria et al. System dynamics modeling for supporting drought-oriented management of the Jucar river system, Spain. **Water**, v. 12, n. 5, p. 1407, 2020.

SANDOVAL-SOLIS, Samuel et al. Collaborative modeling to evaluate water management scenarios in the Rio Grande Basin. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 49, n. 3, p. 639-653, 2013.

SAYAMA, Hiroki. Introduction to the modeling and analysis of complex systems. **Open SUNY Textbooks**, 2015.

SCHNEIDER, Udo et al. GPCP's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 115, p. 15-40, 2014.

SECRETARIAT, I. C. W. E. The Dublin statement on water and sustainable development. In: International Conference on Water and the Environment, Dublin, Ireland. 1992.

SHACKLETON, Charlie M.; CUNDILL, Georgina; KNIGHT, Andrew T. Beyond just research: experiences from Southern Africa in developing social learning partnerships for resource conservation initiatives. **Biotropica**, v. 41, n. 5, p. 563-570, 2009.

SHAH, Deep; MISHRA, Vimal. Integrated Drought Index (IDI) for drought monitoring and assessment in India. **Water Resources Research**, v. 56, n. 2, p. e2019WR026284, 2020.

SHAHSAVARI-POUR, Nasser et al. Water Shortage Simulation Using a System Dynamics Approach: A Case Study of the Rafsanjan City. **Sustainability**, v. 15, n. 7, p. 6225, 2023.

SHIH, Jih-Shyang; REVELLE, Charles. Water supply operations during drought: A discrete hedging rule. **European journal of operational research**, v. 82, n. 1, p. 163-175, 1995.

SHUKLA, Shraddhanand; WOOD, Andrew W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. **Geophysical research letters**, v. 35, n. 2, 2008.

SILVA, D. C. ; AQUINO, S. H. S. ; SILVA, S. M. O. ; SOUZA SILHO, F. A. Diagnóstico Institucional da alocação negociada de água no estado do Ceará: Aplicação do framework de Elinor Ostrom. In: Francisco de Assis de Souza Filho; Samiria Maria Oliveira da Silva et al. (Org.). Gestão Adaptativa do risco climático de seca. 1ed.Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, v. 1, p. 509-525, 2019

SILVA, D. C., SOUZA FILHO, F. A., AQUINO, S. H. S., SILVA, S. M. O. “Diagnóstico Institucional Da Alocação Negociada De Água No Estado Do Ceará À Luz Do Framework De Elinor Ostrom”. Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Bento Gonçalves, Brasil. 2013

SILVA, Samiria Maria Oliveira et al. Proposta de gestão integrada das águas urbanas como estratégia de promoção da segurança hídrica: o caso de Fortaleza. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, p. 239-250, 2019.

SILVA, S. M. O. Compensação financeira como mecanismo de gestão de risco na alocação de água. 2015. 176 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

SILVA, Samiria Maria Oliveira da; SOUZA, Francisco de Assis; AQUINO, Sandra Helena Silva. Avaliação do risco da alocação de água em período de escassez hídrica: o caso do Sistema Jaguaribe-Metropolitano. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, p. 749-760, 2017.

SILVA, Ubirajara Patrício Álvares et al. A experiência da alocação negociada de água nos vales do Jaguaribe e Banabuiú. 2006.Silva, M. B. M., & Ribeiro, M. M. R. (2022). Alocação e governança da água como mecanismos de resolução de conflitos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, 27, 533-540.

SIVAKUMAR, B. Chaos theory in hydrology: important issues and interpretations. **Journal of hydrology**, v. 227, n. 1-4, p. 1-20, 2000.

SIVAPALAN, Murugesu; BLÖSCHL, Günter. Time scale interactions and the coevolution of humans and water. **Water Resources Research**, v. 51, n. 9, p. 6988-7022, 2015.

SOUZA FILHO, F. A. Histórico da alocação negociada de água no Ceará. (1º ed.). Fortaleza. Akvos Editora. 2022

SOUZA FILHO, Francisco de Assis de. Alocação de água sazonal e anual: modelos matemáticos, experimentação comportamental e justiça alocativa. 2006. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SOUZA FILHO, Francisco de Assis de; LALL, Upmanu. Modelo de previsão de vazões sazonais e interanuais. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S. l.], v. 9, n. 2, p. 61-74, 2004.

SOUZA FILHO, Francisco Assis; LALL, Upmanu. Seasonal to interannual ensemble streamflow forecasts for Ceara, Brazil: Applications of a multivariate, semiparametric algorithm. **Water Resources Research**, v. 39, n. 11, 2003.

SOUZA FILHO, Francisco Assis et al. From drought to water security: Brazilian experiences and challenges. **Global Water Security: Lessons Learnt and Long-Term Implications**, p. 233-265, 2018.

SOUZA FILHO, Francisco Assis et al. Integrated proactive drought management in hydrosystems and cities: building a nine-step participatory planning methodology. **Natural Hazards**, v. 115, n. 3, p. 2179-2204, 2023.

SOUZA FILHO, Francisco Assis; BROWN, Casey M. Performance of water policy reforms under scarcity conditions: a case study in Northeast Brazil. **Water policy**, v. 11, n. 5, p. 553-568, 2009.

SPYROPOULOS, Fotios; TRICHAKIS, Ioannis; VOZINAKI, Anthi-Eirini. A narrative-driven role-playing game for raising flood awareness. **Sustainability**, v. 14, n. 1, p. 554, 2022.

STEINEMANN, Anne. Drought indicators and triggers: a stochastic approach to evaluation 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 39, n. 5, p. 1217-1233, 2003.

STUDART, Ticiana Marinho Carvalho et al. Turbulent waters in Northeast Brazil: A typology of water governance-related conflicts. **Environmental Science & Policy**, v. 126, p. 99-110, 2021.

SUN, Xiaozhong; MA, Chao; LIAN, Jijian. Optimal operation of Danjiangkou reservoir using improved hedging model and considering the effects of historical decisions. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 144, n. 1, p. 04017080, 2018.

TAN, Yaogeng et al. Identifying the dynamic evolution and feedback process of water resources nexus system considering socioeconomic development, ecological protection, and food security: A practical tool for sustainable water use. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 25, n. 12, p. 6495-6522, 2021.

TU, Ming-Yen; HSU, Nien-Sheng; YEH, William 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, 2003.

UFC/COGERH. “Estudos de regionalização de parâmetros de modelo hidrológico chuva-vazão, para as bacias totais e incrementais dos reservatórios monitorados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. Relatório 1.1.12”. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brazil. 2013.

- VAN DAM, Anne A. et al. Linking hydrology, ecosystem function, and livelihood outcomes in African papyrus wetlands using a Bayesian Network model. **Wetlands**, v. 33, p. 381-397, 2013.
- VAN DEN BELT, Marjan; BLAKE, Daniella. Mediated modeling in water resource dialogues connecting multiple scales. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 51, n. 6, p. 1581-1599, 2015.
- VICENTE-SERRANO, Sergio M.; BEGUERÍA, Santiago; LÓPEZ-MORENO, Juan I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. **Journal of climate**, v. 23, n. 7, p. 1696-1718, 2010.
- VON STACKELBERG, N. O.; NEILSON, B. T. Collaborative approach to calibration of a riverine water quality model. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 140, n. 3, p. 393-405, 2014.
- VRUGT, Jasper A. et al. Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models. **Water resources research**, v. 39, n. 8, 2003.
- WELSH, Wendy D. et al. An integrated modelling framework for regulated river systems. **Environmental Modelling & Software**, v. 39, p. 81-102, 2013.
- WENS, Marthe et al. Integrating human behavior dynamics into drought risk assessment—A sociohydrologic, agent-based approach. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, v. 6, n. 4, p. e1345, 2019.
- WHEATER, Howard S.; GOBER, Patricia. Water security and the science agenda. **Water Resources Research**, v. 51, n. 7, p. 5406-5424, 2015.
- WILHITE, Donald A. et al. Planning for Drought: Moving From Crisis to Risk Management 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 36, n. 4, p. 697-710, 2000.
- WILHITE, Donald A.; SIVAKUMAR, Mannava VK; PULWARTY, Roger. Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy. **Weather and climate extremes**, v. 3, p. 4-13, 2014.
- XIE, Pingping; ARKIN, Phillip A. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. **Bulletin of the american meteorological society**, v. 78, n. 11, p. 2539-2558, 1997.
- XUE, Jie et al. Development of a participatory Bayesian network model for integrating ecosystem services into catchment-scale water resources management. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, p. 1-37, 2016.
- YAN, Haibin et al. An optimal model for water resources risk hedging based on water option trading. **Water**, v. 10, n. 8, p. 1026, 2018.

YASA, I. Wayan et al. Hydrological drought index based on reservoir capacity–Case study of Batujai dam in Lombok Island, West Nusa Tenggara, Indonesia. **Journal of Water and Land Development**, n. 38, p. 155-162, 2018.

YOU, Jiing-Yun; CAI, Ximing. Hedging rule for reservoir operations: 1. A theoretical analysis. **Water Resources Research**, v. 44, n. 1, 2008.

ZANIOLO, Marta et al. Automatic design of basin-specific drought indexes for highly regulated water systems. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, n. 4, p. 2409-2424, 2018.

APÊNDICE A – MATRIZ DOS VALORES DE PREFERÊNCIA DOS USUÁRIOS

Esta seção ilustra exemplos de diferentes valores de preferências dos usuários com o objetivo de demonstrar como os números adotados podem influenciar a tomada de decisão. Para isso, identificamos dois perfis de tomadores de decisão: 1) Usuário com aversão ao risco de escassez hídrica futura e 2) Usuário inclinado a utilizar maior quantidade de água no presente.

1) Usuário com aversão ao risco de escassez hídrica futura

| Matriz de risco e perda de interesse (RP) | | Valor Alocado | | | | | |
|--|--------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | 11 a 9 m ³ /s | 9 a 7 m ³ /s | 7 a 5 m ³ /s | 5 a 3 m ³ /s | 3 a 1 m ³ /s | 1 a 0 m ³ /s |
| Estado do futuro do reservatório | escala | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 | 0 |
| Normal | -1 | 49 | 39 | 29 | 19 | 9 | -1 |
| Alerta | -4 | 46 | 36 | 26 | 16 | 6 | -4 |
| Seca | -16 | 34 | 24 | 14 | 4 | -6 | -16 |
| Seca Severa | -64 | -14 | -24 | -34 | -44 | -54 | -64 |
| Seca Extrema | -128 | -78 | -88 | -98 | -108 | -118 | -128 |
| Colapso | -256 | -206 | -216 | -226 | -236 | -246 | -256 |

| Matriz Valor Futuro da Água (VF) | | Valor Alocado | | | | | |
|---|--|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | 11 a 9 m ³ /s | 9 a 7 m ³ /s | 7 a 5 m ³ /s | 5 a 3 m ³ /s | 3 a 1 m ³ /s | 1 a 0 m ³ /s |
| Estado do futuro do reservatório | | | | | | | |
| Normal | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Alerta | | -4 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Seca | | -16 | -4 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| Seca Severa | | -64 | -16 | -4 | 0 | 1 | 2 |
| Seca Extrema | | -128 | -64 | -16 | -4 | 0 | 1 |
| Colapso | | -256 | -128 | -64 | -16 | -4 | 0 |

| Matriz de Preferência da Alocação (MPA) | | Valor Alocado | | | | | |
|--|--|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | 11 a 9 m ³ /s | 9 a 7 m ³ /s | 7 a 5 m ³ /s | 5 a 3 m ³ /s | 3 a 1 m ³ /s | 1 a 0 m ³ /s |
| Estado do futuro do reservatório | | | | | | | |
| Normal | | 49 | 40 | 31 | 22 | 13 | 4 |
| Alerta | | 42 | 36 | 27 | 18 | 9 | 0 |
| Seca | | 18 | 20 | 14 | 5 | -4 | -13 |
| Seca Severa | | -78 | -40 | -38 | -44 | -53 | -62 |
| Seca Extrema | | -206 | -152 | -114 | -112 | -118 | -127 |
| Colapso | | -462 | -344 | -290 | -252 | -250 | -256 |

Matriz de Risco e Perda de Interesse (RP), que representa as consequências enfrentadas por um tomador de decisões em relação aos valores alocados e ao estado futuro do reservatório, foi construída da seguinte maneira: Às colunas da matriz foram atribuídas uma escala linear para os valores alocados, variando de 50 a zero, representando a perda de interesse do decisor. O valor 50 corresponde a uma alocação de 11 a 9 m³/s, enquanto o valor zero representa uma alocação de 0 a 1 m³/s. Esses mesmos valores foram utilizados na construção da matriz presente no corpo da tese (matriz de referência). Às linhas da matriz foram atribuídas uma escala exponencial para representar o estado futuro do reservatório, variando de -1 a -256. Essa escala reflete o risco associado à transição do reservatório de um estado de seca ao final do período considerado, atribuindo pesos mais altos às categorias com níveis de seca mais graves. Em comparação com a matriz de referência, esses valores conferem maior importância à acumulação final do reservatório, indicando que o usuário com aversão ao risco do colapso busca evitar que o reservatório atinja níveis baixos de acumulação. Espera-se que o modelo indique valores menores de alocação em comparação ao cenário de referência.

A matriz de valor futuro da água é construída para representar a capacidade futura de tomar a mesma decisão do presente. Para isso, são atribuídos valores a cada combinação de alocação e estado futuro. Partindo da suposição de que cada estado de seca tem um valor de alocação atribuído, essa combinação representa uma preferência igual a zero, conforme no cenário de referência. No entanto, se o reservatório passar de um estado de seca para outro mais grave ele será punido seguindo a mesma escala exponencial da matriz de perda de interesse. A Tabela 22 apresenta o resultado do sistema de preferência para cada um dos cenários analisados (mesmo dos cenários de referência). Os resultados apontam para valores de alocações menores que no cenário de referência.

Tabela 22 - Resultado gerado em cada decisão durante o período chuvoso e seco com base em diferentes cenários de simulações para o sistema de preferência de um usuário com aversão ao risco de escassez hídrica futura.

| Previsão climática | | Alocação Período Seco | | | | | |
|--------------------------|------------|-----------------------|-----------|-----------|----------|---------------|-----------|
| | | d_9a11_m3s | d_7a9_m3s | d_5a7_m3s | d_3a5m3s | d_1a3_m3s | d_0a1_m3s |
| Alocação Período Chuvoso | d_9a11_m3s | -312,4 | -244,4 | -213,8 | -202,6 | -198,8 | -204,4 |
| | d_7a9_m3s | -262,6 | -196,1 | -166,3 | -156,1 | -152,7 | -158,2 |
| | d_5a7_m3s | -232,1 | -168,2 | -139,9 | -131,1 | -128,6 | -134,0 |
| | d_3a5m3s | -220,5 | -158,7 | -132,0 | -124,6 | -123,0 | -128,3 |
| | d_1a3_m3s | -214,9 | -154,8 | -129,3 | -123,1 | -122,1 | -127,3 |
| | d_0a1_m3s | -208,1 | -151,4 | -127,6 | -122,6 | -122,4 | -127,6 |

| Ausência da informação climática | | Alocação Período Seco | | | | | |
|----------------------------------|------------|-----------------------|-----------|-----------|----------|---------------|-----------|
| | | d_9a11_m3s | d_7a9_m3s | d_5a7_m3s | d_3a5m3s | d_1a3_m3s | d_0a1_m3s |
| Alocação Período Chuvoso | d_9a11_m3s | -347,5 | -275,3 | -241,9 | -228,6 | -223,7 | -229,3 |
| | d_7a9_m3s | -294,1 | -223,3 | -190,6 | -178,2 | -173,6 | -179,2 |
| | d_5a7_m3s | -262,5 | -193,9 | -162,5 | -151,3 | -147,4 | -152,9 |
| | d_3a5m3s | -250,6 | -184,1 | -154,1 | -144,3 | -141,3 | -146,7 |
| | d_1a3_m3s | -240,4 | -176,1 | -147,6 | -139,4 | -137,1 | -142,3 |
| | d_0a1_m3s | -235,9 | -174,5 | -147,5 | -140,3 | -138,7 | -143,9 |

| Melhoria do modelo de previsão climática sazonal | | Alocação Período Seco | | | | | |
|--|------------|-----------------------|-----------|-----------|--------------|-----------|-----------|
| | | d_9a11_m3s | d_7a9_m3s | d_5a7_m3s | d_3a5m3s | d_1a3_m3s | d_0a1_m3s |
| Alocação Período Chuvoso | d_9a11_m3s | -144,3 | -98,6 | -83,3 | -81,3 | -82,7 | -88,5 |
| | d_7a9_m3s | -119,9 | -74,9 | -60,2 | -58,6 | -60,4 | -66,1 |
| | d_5a7_m3s | -106,4 | -64,1 | -50,5 | -49,9 | -52,4 | -58,1 |
| | d_3a5m3s | -105,7 | -64,5 | -51,7 | -51,9 | -54,8 | -60,4 |
| | d_1a3_m3s | -112,0 | -71,1 | -58,6 | -59,1 | -62,1 | -67,8 |
| | d_0a1_m3s | -100,7 | -64,9 | -54,8 | -56,5 | -60,4 | -66,2 |

| Menores Vazões | | Alocação Período Seco | | | | | |
|--------------------------|------------|-----------------------|-----------|-----------|----------|---------------|-----------|
| | | d_9a11_m3s | d_7a9_m3s | d_5a7_m3s | d_3a5m3s | d_1a3_m3s | d_0a1_m3s |
| Alocação Período Chuvoso | d_9a11_m3s | -591,1 | -491,9 | -441,2 | -414,4 | -404,0 | -409,9 |
| | d_7a9_m3s | -518,2 | -419,5 | -368,9 | -342,4 | -331,7 | -337,6 |
| | d_5a7_m3s | -458,6 | -361,2 | -310,8 | -285,1 | -273,9 | -279,8 |
| | d_3a5m3s | -445,0 | -348,3 | -298,0 | -272,7 | -261,2 | -267,1 |
| | d_1a3_m3s | -431,4 | -336,2 | -286,2 | -261,8 | -249,5 | -255,5 |
| | d_0a1_m3s | -428,4 | -335,0 | -286,1 | -263,0 | -251,5 | -257,3 |

2) Usuário inclinado a utilizar maior quantidade de água no presente.

| Matriz de risco e perda de interesse (RP) | | Valor Alocado | | | | | |
|--|--------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | 11 a 9 m ³ /s | 9 a 7 m ³ /s | 7 a 5 m ³ /s | 5 a 3 m ³ /s | 3 a 1 m ³ /s | 1 a 0 m ³ /s |
| Estado do futuro do reservatório | escala | 100 | 80 | 40 | 20 | 10 | 0 |
| Normal | -1 | 99 | 79 | 39 | 19 | 9 | -1 |
| Alerta | -4 | 96 | 76 | 36 | 16 | 6 | -4 |
| Seca | -8 | 92 | 72 | 32 | 12 | 2 | -8 |
| Seca Severa | -16 | 84 | 64 | 24 | 4 | -6 | -16 |
| Seca Extrema | -64 | 36 | 16 | -24 | -44 | -54 | -64 |
| Colapso | -128 | -28 | -48 | -88 | -108 | -118 | -128 |

| Matriz Valor Futuro da Água (VF) | | Valor Alocado | | | | | |
|---|--|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | 11 a 9 m ³ /s | 9 a 7 m ³ /s | 7 a 5 m ³ /s | 5 a 3 m ³ /s | 3 a 1 m ³ /s | 1 a 0 m ³ /s |
| Estado do futuro do reservatório | | | | | | | |
| Normal | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Alerta | | -4 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Seca | | -8 | -4 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| Seca Severa | | -16 | -8 | -4 | 0 | 1 | 2 |
| Seca Extrema | | -32 | -16 | -8 | -4 | 0 | 1 |
| Colapso | | -64 | -32 | -16 | -8 | -4 | 0 |

| Matriz de Preferência da Alocação (MPA) | | Valor Alocado | | | | | |
|--|--|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | 11 a 9 m ³ /s | 9 a 7 m ³ /s | 7 a 5 m ³ /s | 5 a 3 m ³ /s | 3 a 1 m ³ /s | 1 a 0 m ³ /s |
| Estado do futuro do reservatório | | | | | | | |
| Normal | | 99 | 80 | 41 | 22 | 13 | 4 |
| Alerta | | 92 | 76 | 37 | 18 | 9 | 0 |
| Seca | | 84 | 68 | 32 | 13 | 4 | -5 |
| Seca Severa | | 68 | 56 | 20 | 4 | -5 | -14 |
| Seca Extrema | | 4 | 0 | -32 | -48 | -54 | -63 |
| Colapso | | -92 | -80 | -104 | -116 | -122 | -128 |

Matriz de Risco e Perda de Interesse (RP), que representa as consequências enfrentadas por um tomador de decisões em relação aos valores alocados e ao estado futuro do reservatório, foi construída da seguinte maneira: Às colunas da matriz foram atribuídas uma escala linear para os valores alocados, variando de 100 a zero, representando a perda de interesse do decisor. O valor 100 corresponde a uma alocação de 9 a 11 m³/s, enquanto o valor zero representa uma alocação de 0 a 1 m³/s. Esses valores divergem da matriz de referência acrescentando mais peso aos valores de retirada no presente. Às linhas da matriz foram

atribuídas uma escala exponencial para representar o estado futuro do reservatório, variando de -1 a -128, mesmos valores da matriz de referência. Para a matriz de valor futuro da água, utilizou-se os mesmos valores da referência.

A Tabela 23 apresenta o resultado do sistema de preferência para cada um dos cenários analisados (mesmo dos cenários de referência) com um sistema de preferência de um usuário mais propenso a utilizar água no presente. Os resultados apontam para valores de alocações maiores que no cenário de referência.

Tabela 23 - Resultado gerado em cada decisão durante o período chuvoso e seco com base em diferentes cenários de simulações para o sistema de preferência de um usuário inclinado a utilizar maior quantidade de água no presente.

| Previsão climática | | Alocação Período Seco | | | | | |
|--------------------------|------------|-----------------------|-------------|-----------|----------|-----------|-----------|
| | | d_9a11_m3s | d_7a9_m3s | d_5a7_m3s | d_3a5m3s | d_1a3_m3s | d_0a1_m3s |
| Alocação Período Chuvoso | d_9a11_m3s | 51,9 | 52,7 | 23,1 | 11,0 | 9,0 | 1,9 |
| | d_7a9_m3s | 48,7 | 49,1 | 19,5 | 7,3 | 5,1 | -1,8 |
| | d_5a7_m3s | 21,3 | 21,2 | -8,6 | -21,0 | -23,5 | -30,3 |
| | d_3a5m3s | 12,4 | 11,7 | -18,2 | -30,8 | -33,6 | -40,3 |
| | d_1a3_m3s | 11,1 | 10,0 | -20,0 | -32,7 | -35,7 | -42,3 |
| | d_0a1_m3s | 8,4 | 6,6 | -23,7 | -36,7 | -40,1 | -46,6 |

| Ausência da informação climática | | Alocação Período Seco | | | | | |
|----------------------------------|------------|-----------------------|-------------|-----------|----------|-----------|-----------|
| | | d_9a11_m3s | d_7a9_m3s | d_5a7_m3s | d_3a5m3s | d_1a3_m3s | d_0a1_m3s |
| Alocação Período Chuvoso | d_9a11_m3s | 37,8 | 39,7 | 10,6 | -1,1 | -2,6 | -9,7 |
| | d_7a9_m3s | 35,5 | 37,2 | 8,0 | -3,8 | -5,4 | -12,4 |
| | d_5a7_m3s | 7,5 | 8,7 | -20,7 | -32,6 | -34,4 | -41,3 |
| | d_3a5m3s | -1,7 | -1,1 | -30,5 | -42,6 | -44,8 | -51,5 |
| | d_1a3_m3s | -0,6 | -0,5 | -30,1 | -42,3 | -44,7 | -51,3 |
| | d_0a1_m3s | -4,2 | -4,8 | -34,6 | -47,1 | -49,8 | -56,4 |

| Melhoria do modelo de previsão climática sazonal | | Alocação Período Seco | | | | | |
|--|------------|-----------------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| | | d_9a11_m3s | d_7a9_m3s | d_5a7_m3s | d_3a5m3s | d_1a3_m3s | d_0a1_m3s |
| Alocação Período Chuvoso | d_9a11_m3s | 116,3 | 110,5 | 78,1 | 63,7 | 58,5 | 51,2 |
| | d_7a9_m3s | 105,7 | 99,7 | 67,3 | 52,8 | 47,5 | 40,2 |
| | d_5a7_m3s | 74,5 | 68,0 | 35,5 | 20,8 | 15,3 | 8,1 |
| | d_3a5m3s | 60,8 | 54,0 | 21,4 | 6,6 | 1,0 | -6,1 |
| | d_1a3_m3s | 53,2 | 46,4 | 13,8 | -1,0 | -6,8 | -13,9 |
| | d_0a1_m3s | 50,9 | 43,0 | 9,9 | -5,3 | -11,5 | -18,7 |

| Menores Vazões | | Alocação Período Seco | | | | | |
|--------------------------|------------|-----------------------|--------------|-----------|----------|-----------|-----------|
| | | d_9a11_m3s | d_7a9_m3s | d_5a7_m3s | d_3a5m3s | d_1a3_m3s | d_0a1_m3s |
| Alocação Período Chuvoso | d_9a11_m3s | -59,2 | -49,9 | -76,0 | -85,8 | -84,8 | -91,9 |
| | d_7a9_m3s | -57,3 | -48,1 | -74,3 | -84,0 | -82,9 | -90,0 |
| | d_5a7_m3s | -80,5 | -71,5 | -97,9 | -107,4 | -105,8 | -112,9 |
| | d_3a5m3s | -92,7 | -83,8 | -110,2 | -119,7 | -117,8 | -125,0 |
| | d_1a3_m3s | -90,3 | -81,6 | -108,2 | -117,5 | -115,0 | -122,3 |
| | d_0a1_m3s | -93,1 | -84,9 | -111,6 | -121,0 | -118,8 | -126,0 |