



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CÂMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
CURSO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

**BALANCEAMENTO DE VAZÕES OUTORGADAS EM SITUAÇÃO
CRÍTICA DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA**

RAFAEL DA COSTA SILVA

PALMAS (TO)

2021

RAFAEL DA COSTA SILVA

BALANCEAMENTO DE VAZÕES OUTORGADAS EM SITUAÇÃO CRÍTICA DE
DISPONIBILIDADE HÍDRICA

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado
à Universidade Federal do Tocantins para
obtenção do título de Bacharel em Ciência da
Computação, sob a orientação do(a) Prof.(a)
Dra. Glenda Michele Botelho.

Orientador: Dra. Glenda Michele Botelho

Coorientador: Dr. Ary Henrique Morais de
Oliveira

PALMAS (TO)

2021

RAFAEL DA COSTA SILVA

BALANCEAMENTO DE VAZÕES OUTORGADAS EM SITUAÇÃO CRÍTICA DE
DISPONIBILIDADE HÍDRICA

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas, Curso de Ciência da Computação foi avaliado para a obtenção do título de Bacharel e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 9 / 2 / 2021

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Glenda Michele Botelho

Prof. Dr. Warley Gramacho da Silva

Prof. Dr. Fernan Enrique Vergara Figueroa

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

S586b Silva, Rafael da Costa.

Balanceamento de vazões outorgadas em situação crítica de disponibilidade hídrica. / Rafael da Costa Silva. – Palmas, TO, 2021.

54 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Ciências da Computação, 2021.

Orientadora : Glenda Michele Botelho

Coorientador: Ary Henrique Morais de Oliveira

1. Sistemas Especialistas. 2. Sistemas de Apoio à Decisão. 3. Lógica Fuzzy. 4. Balanceamento de Outorgas. I. Título

CDD 004

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

*Ao meus pais, Edison Gomes da
Silva e Edna Oliveira Costa Silva*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, a quem dedico este trabalho, meus avós e familiares, graças ao imenso apoio de vocês consegui concluir a minha graduação. Também não poderia deixar de agradecer meus orientadores, a Profa. Glenda e o Prof. Ary, os quais tiveram a paciência de me orientar neste trabalho e durante a minha iniciação científica, vocês são minha referência nesta jornada para me tornar um profissional, pesquisador e professor. Mando um abraço ao pessoal da minha turma e colegas de curso, com os quais aprendi e me diverti bastante. Por fim, agradeço o auxílio da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP (por meio do projeto “Mapeamento da Biodiversidade do Estado do Tocantins” contemplado na Chamada Pública MCTIC/FINEP/FNDCT/AT - AMAZÔNIA LEGAL - 04/2016).

RESUMO

A Bacia Hidrográfica do Rio Formoso é caracterizada pelo forte papel que desempenha na produção agrícola de grãos no Estado do Tocantins, tendo 97% das outorgas de uso da água, destinadas para as atividades de irrigação. Em decorrência dos períodos de estiagem característicos do estado do Tocantins, ocorre o aumento das demandas hídricas para a irrigação das lavouras enquanto a disponibilidade da bacia é reduzida. Esta situação se tornou crítica, visto que as políticas públicas existentes não são capazes de impedir a degradação dos rios, como a que ocorreu em 2016 no Rio Formoso e Rio Urubu. Com isso, é necessário desenvolver ferramentas que possibilitem a execução de políticas públicas de gestão hídrica mais eficiente. Diante deste cenário, neste trabalho foi elaborado o Sistema de Apoio à Decisão, denominado *Water Balance*, que avalia a qualidade das outorgas por meio do uso de inferência *fuzzy* e apresenta um cenário de balanceamento das vazões outorgadas, permitindo que gestores, em situação de conflito por recursos hídricos, realize acordos entre usuários de água de forma que a redução de vazão captada seja distribuída de forma imparcial, considerando critérios previamente acordados.

Palavra-chave: Sistemas Especialistas. Sistemas de Apoio à Decisão. Lógica *Fuzzy*. Balanceamento de Outorgas. Bacia Hidrográfica do Rio Formoso. Tocantins.

ABSTRACT

The Rio Formoso River Basin is characterized by the strong role it plays in the agricultural production of grain in Tocantins state, with 97% of water use grants destiny to irrigation activities. As a result of drought periods characteristic of Tocantins state, there is an increased hydrological demand for crop irrigation while the availability of basin is reduced. This situation becomes critical once the existent public policies aren't able to prevent the degradation of the rivers, as occurred in 2016 at Formoso's river and Urubu's river. Then, it is necessary to develop tools that allow the more efficient public policies execution. Given this scenario, in this work has elaborated a Decision Support System, called Water Balance, that evaluates the quality of water grants through by use of fuzzy inference and shows a granted flow balanced scenario, allowing managers, in conflict situation by hydrological resources, make agreements between water users so that the reduction of captured flow has impartially distributed, considering previously agreement criteria.

Keywords: Expert System. Decision Support System. Fuzzy Logic. Water Balance. Formoso River Basin. Tocantins.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz e funcionamento do SINGREH ¹ . Adaptado de (ANA, 2021).	18
Figura 2 – a) Localização da Bacia do Rio Formoso na região hidrográfica Tocantins-Araguaia. b) Bacia do Rio Formoso no estado do Tocantins.	20
Figura 3 – Componentes de um SSD (BRAGA; BARBOSA; NAKAYAMA, 1998).	22
Figura 4 – Pertinência do conjunto fuzzy “pouco tempo” referente ao vencimento de uma outorga para $x = 0, 3$	25
Figura 5 – a) Função Trapezoidal, b) Função Triângular. Adaptado de Oliveira e Zeilhofer (2017).	26
Figura 6 – Operação de união entre dois conjuntos <i>fuzzy</i>	26
Figura 7 – Operação de intersecção entre dois conjuntos <i>fuzzy</i>	27
Figura 8 – Representação gráfica da prioridade dos projetos. Adaptado de Karib (2004).	31
Figura 9 – Fluxograma do funcionamento do Sistema de Outorga. Adaptado de Oliveira e Zeilhofer (2017).	32
Figura 10 – Estrutura do sistema <i>Water Balance</i>	36
Figura 11 – Estrutura convencional de um sistema <i>fuzzy</i> . Adaptado de Leondes (1997, pg. 63).	37
Figura 12 – Variáveis <i>fuzzy</i> e seus respectivos conjuntos no sistema <i>Water Balance</i>	39
Figura 13 – a) Beta distribuição com $\alpha = 3.5$ e $\beta = 5$. b) Beta distribuição com $\alpha = 8$ e $\beta = 8$	46
Figura 14 – Esquerda: distribuição das vazões outorgas e utilizadas. Direita: Número de outorgas com a vazão utilizada inferior a vazão outorgada.	46
Figura 15 – Bacia do Rio Formoso com seus principais rios, estações de referência e captações utilizadas neste trabalho.	48
Figura 16 – Qualidade das regras na avaliação das outorgas do rio Urubu.	50
Figura 17 – Qualidade das regras na avaliação das outorgas artificiais do rio Urubu.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplo de regras utilizadas. Adaptado de Karnib (2004).	30
Tabela 2 – Dicionário dos conjuntos <i>fuzzy</i> utilizados no <i>Water Balance</i>	38
Tabela 3 – Exemplo de regras utilizadas no sistema Water Balance.	40
Tabela 4 – Tabela de contingência 2x2.	41
Tabela 5 – Dados sobre a capacidade hídrica.	43
Tabela 6 – Dados sobre as outorgas concedidas.	44
Tabela 7 – Dados sobre as captações.	44
Tabela 8 – Eficiência atribuída a cada tipo de irrigação. Resolução ANA n.º 707/2004.	44
Tabela 9 – Probabilidade de seleção para cada tipo de uso	45
Tabela 10 – Variação da eficiência para cada tipo de uso. Tabela definida em consulta com especialista, visando torná-la a mais fidedigna possível.	45
Tabela 11 – Base de regras utilizadas no sistema Water Balance. ²	47
Tabela 12 – Arcos hidrológicos de referência.	48
Tabela 13 – Avaliação das outorgas do Rio Urubu - 135883	49
Tabela 14 – Avaliação das outorgas artificiais do Rio Urubu - 135883.	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivos Específicos	15
1.2	Organização do Trabalho	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Gestão de Recursos Hídricos	17
2.1.1	Política Nacional de Recursos Hídricos	17
2.1.2	Gestão dos recursos hídricos da Bacia do Rio Formoso	19
2.1.2.1	Sistema GAN - Gestão de Alto Nível	21
2.1.2.2	Sistema SAD-Outorga	21
2.2	Sistemas de Apoio à Decisão	22
2.2.1	SADs Aplicados na Área de Recursos Hídricos	23
2.3	Lógica Fuzzy	24
2.3.1	Conjuntos Fuzzy	24
2.3.2	Regras se-então	27
2.3.3	Inferência Fuzzy	27
3	TRABALHOS RELACIONADOS	29
3.1	Uma abordagem para avaliar projetos de recursos hídricos . . .	29
3.1.1	Avaliação do grau de prioridade	29
3.2	SAD para outorga de recursos hídricos superficiais	32
4	METODOLOGIA	34
4.1	Concepção do Sistema de Apoio a Decisão <i>Water Balance</i> . . .	34
4.2	Base de dados e obtenção das portarias de Outorgas	37

4.3	Base de Conhecimento	38
4.4	Métrica de Avaliação das Regras	40
5	RESULTADOS	43
5.1	Construção da Base de Dados de Teste	43
5.2	Aplicação na Bacia do Rio Formoso	47
6	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

A Bacia Hidrográfica do Rio Formoso desempenha um importante papel na produção agrícola de grãos do Estado do Tocantins, por meio da implantação do Projeto do Rio Formoso de Agricultura Irrigada. Projeto em que, segundo Rodrigues (2013), foi construído o maior sistema de agricultura irrigada por inundação existente no mundo, destinado principalmente a produção de arroz e soja. Porém, em decorrência dos períodos de estiagem e aumento das demandas hídricas para a irrigação, muitas vezes a bacia fica com sua disponibilidade hídrica comprometida (TOCANTINS, 2019), tornando necessário o desenvolvimento de ferramentas computacionais que possibilitem uma gestão hídrica mais eficiente, por meio do balanceamento entre a vazão outorgada e a disponibilidade da Bacia do Rio Formoso.

Em 2016, a situação anunciada pelas comunidades locais se tornou crítica, de forma que, embora os usuários estivessem outorgados, a atuação do Instituto Natureza do Tocantins (Naturatins) não foi suficiente para evitar o desastre nos rios Urubu e Formoso, motivando o Ministério Público do Estado do Tocantins (MPTO) a solicitar a suspensão da retirada de água para fins de irrigação agrícola. Nesse cenário, diante do período da estiagem, da ausência de políticas públicas eficazes, de fiscalização do cumprimento de termos e ajustes entre o agronegócio e o Estado, o MPTO entrou com uma Ação Cautelar Ambiental, em julho de 2016 (TOCANTINS, 2016). Em decorrência desta ação cautelar, o poder judiciário solicitou que a UFT, na condição de amigo da corte, expedisse um parecer técnico.

Durante a Primeira Audiência Pública, a UFT por meio do Instituto de Atenção às Cidades (IAC/UFT) apresentou a proposta de solução, chamada Gestão de Alto Nível (GAN) (MARQUES et al., 2018), com o objetivo de implantar um robusto sistema de gestão e monitoramento dos recursos hídricos da Bacia do Rio Formoso. Atualmente, o GAN encontra-se na fase de realizar o levantamento e revisão das outorgas destinadas à atividade de captação superficial para fins de irrigação, finalidade que compreende cerca de 97% da vazão outorgada (FILHO et al., 2015), além de estabelecer regras de operação para sua concessão.

Diante de tal cenário, este trabalho se propõe a desenvolver uma ferramenta que utiliza os conceitos de sistemas especialistas baseados em regras para balancear o uso de recursos hídricos. Sistemas especialistas baseados em regras desempenharam um papel importante nos sistemas inteligentes modernos através de suas aplicações no estabelecimento de metas estratégicas, planejamento, design, entre outros. Estes sistemas utilizam o conhecimento de especialistas (modelados na forma de regras) para resolverem problemas que normalmente necessitariam da inteligência humana (ABRAHAM, 2005).

Por meio da lógica *fuzzy* é possível modelar o conhecimento de um especialista, uma vez que ela pode lidar com informações incompletas, imprecisas, incertas e ambíguas (LANZILOTTI REGINA SERRÃO; LANZILOTTI, 2014), o que permite o desenvolvimento de um sistema especialista baseado em regras capazes de atuar em ambientes não determinísticos e dinâmicos, como o caso das bacias hidrográficas. Portanto, uma ferramenta que utiliza os conceitos de sistemas especialistas baseados em regras deverá ser capaz de realizar o balanceamento das outorgas já concedidas, possibilitando a inserção de novos outorgantes e respeitando a capacidade hídrica natural da bacia.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste projeto é apresentar uma modelagem de Sistema de Apoio à Decisão baseada na teoria de conjuntos *fuzzy* que realize a criação de um cenário de balanceamento das vazões outorgadas na Bacia do Rio Formoso, que possa ser futuramente integrado aos sistemas Gestão de Alto Nível e SAD-Outorga, com a proposta de reduzir os conflitos no uso de recursos hídricos, incentivando a cooperação dos usuários de água.

1.1.1 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, destacam-se:

1. Investigar técnicas de balanceamento de recursos hídricos.
2. Modelar as regras de operação para o balanceamento dos recursos hídricos.
3. Modelar um sistema de lógica *fuzzy* capaz de balancear a vazão outorgada.
4. Avaliar a qualidade do sistema no balanceamento de recursos hídricos.

1.2 Organização do Trabalho

Além deste capítulo de Introdução, o restante deste trabalho está organizado da seguinte maneira:

- No Capítulo 2 apresenta-se a fundamentação teórica por meio de uma breve descrição sobre a gestão de recursos hídricos, descrevendo brevemente a situação da Bacia do Rio Formoso. Em seguida apresentam-se os conceitos básicos de um Sistema de Apoio à Decisão e como são aplicados na área de recursos hídricos. Por fim, tem-se os fundamentos da Lógica Fuzzy.
- O Capítulo 3 descreve dois trabalhos relacionados à utilização de Lógica Fuzzy para auxiliar o processo de tomada de decisão. Estes trabalhos foram usados como base para nortear o estado da arte do sistema de apoio à decisão proposto.

- No Capítulo 4 é apresentada a metodologia utilizada na resolução do problema de pesquisa deste trabalho, descrevendo o processo de concepção do sistema, a organização dos dados e modelagem da base de conhecimento juntamente com a métrica de avaliação.
- O Capítulo 5 descreve os experimentos realizados, apresentando e discutindo seus resultados.
- Por fim, o Capítulo 6 descreve as conclusões finais e trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo procura apresentar os conceitos fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, englobando o seguinte conteúdo: gestão de recursos hídricos, sistemas de apoio à decisão e lógica *fuzzy*. A sessão 2.1 apresenta uma visão geral sobre a gestão de recursos hídricos, destacando a Política Nacional de Recursos Hídricos e a situação atual da gestão da bacia do Rio Formoso, nas subseções 2.1.1 e 2.1.2, respectivamente. Em seguida, a seção 2.2 descreve sobre os sistemas de apoio à decisão e suas aplicações na gestão de recursos hídricos. Por fim, na seção 2.3 apresenta-se uma breve descrição da lógica e conjuntos *fuzzy*.

2.1 Gestão de Recursos Hídricos

Segundo Braga, Barbosa e Nakayama (1998) os recursos hídricos apresentam um papel fundamental no processo de desenvolvimento de qualquer sociedade, de forma que a falta, excesso ou a falta de qualidade deste recurso é igualmente problemático, necessitando da atenção do governo. Quando existe uma abundância de água, ela pode ser considerada um bem livre e desprovido de valor econômico, porém com o crescimento da demanda começa a surgir conflitos entre usos e usuários, tornando-se necessário realizar o gerenciamento da água como um bem econômico (SETTI et al., 2001).

Os diferentes usos de água podem ser classificados em dois grandes grupos: usos consuntivos e não consuntivos. Para a Agência Nacional de Águas (ANA) (ANA, 2013), os usos consuntivos são aqueles que reduzem uma parcela da disponibilidade hídrica num determinado ponto de captação (por exemplo, o abastecimento de água doméstico, uso industrial ou irrigação de culturas). Já os usos não consuntivos são aqueles que não retiram vazões ou volumes de água do corpo hídrico, mas modificam as suas características naturais (por exemplo, construção de barramentos e pesca).

2.1.1 Política Nacional de Recursos Hídricos

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) foi instituída por meio da Lei n.º 9.433 de 8 de janeiro de 1997, a qual se tornou conhecida como Lei das Águas. Esta lei tornou a água um bem de domínio público dotado de valor econômico, cujo uso prioritário deve ser para abastecimento populacional e dessedentação animal. Por meio da PNRH foram estabelecidos instrumentos para a gestão dos recursos hídricos de domínio federal e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), descentralizando a gestão de recursos hídricos e criando um sistema nacional que integra União e estados.

O SINGREH é o conjunto de órgãos e colegiados que concebe e implementa a PNRH, conforme apresentado na Figura 1, sendo composto pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), pela Secretaria de Recursos Hídricos e Qualidade Ambiental (SRQA), pela Agência Nacional de Águas (ANA), pelos Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos (CERH), pelos órgãos gestores de recursos hídricos estaduais (Entidades Estaduais) e pelos Comitês de Bacia Hidrográfica.

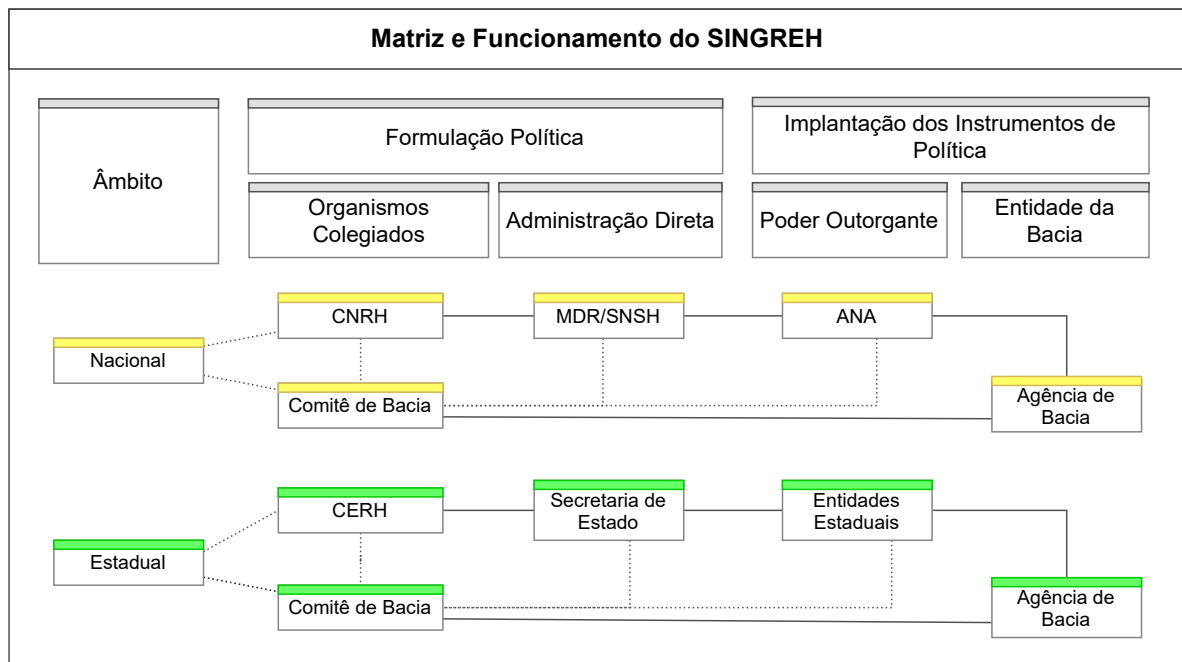


Figura 1 – Matriz e funcionamento do SINGREH¹. Adaptado de (ANA, 2021).

Segundo Porto e Porto (2008), para realizar o desenvolvimento de uma gestão sustentável de recursos hídricos, é necessário um conjunto mínimo de instrumentos principais: uma base de dados e informações socialmente acessíveis, uma definição clara dos direitos de uso, controle dos impactos sobre os sistemas hídricos e o processo de tomada de decisão. Definindo que:

”Em termos práticos, os sistemas de gestão dependem de instrumentos que possam ser desenvolvidos e aplicados de forma a atender às expectativas e aos desejos da comunidade, nos limites impostos pela aptidão natural das bacias hidrográficas, seja na perspectiva mais utilitarista, seja para o atendimento de objetivos de preservação ambiental, idealmente na medida equilibrada que é requerida para a garantia da sustentabilidade, no médio e no longo prazo”.

Para possibilitar que seja feito um controle da água disponível tem-se a outorga de direito de uso de recursos hídricos. Como a água de boa qualidade é um bem escasso, seu

¹A matriz atualizada em decorrência do Decreto nº 10.290 de 24 de março de 2020.

uso deve ser controlado e administrado, visando satisfazer as necessidades da sociedade Júnior (2004). Estão sujeitos a outorga pelo poder público: derivação ou captação de parcela de água de qualquer corpo hídrico e a extração de água de aquífero subterrâneo para uso industrial, como matéria-prima ou para processos auxiliares; o lançamento de corpo de água de esgoto e resíduos líquidos, tratados ou não; o aproveitamento de potenciais hidrelétricos; e qualquer uso que altere a quantidade ou qualidade da água existente na natureza.

Por meio da Lei das Águas, através do SINGREH, a Agência Nacional de Águas é a instituição responsável pela análise técnica para a emissão da outorga de direito de uso de recursos hídricos em corpos hídricos pertencentes ao domínio da União. Já corpos hídricos de domínio estadual tem a emissão de outorga realizada pelo órgão gestor estadual de recursos hídricos, sendo de competência do órgão gestor determinar os critérios e procedimentos técnicos e legais analisados durante o processo de concessão da outorga.

No estado do Tocantins, o órgão responsável pela emissão de outorgas de corpos hídricos em domínio estadual é o Instituto Natureza do Tocantins (NATURATINS), o qual promove estudos, pesquisas, experimentação no campo de proteção e controle ambiental e a utilização racional dos recursos ambientais.

2.1.2 Gestão dos recursos hídricos da Bacia do Rio Formoso

Após 2003, ano em que foi instituída a Divisão Hidrográfica Nacional através da Resolução n.º 32/2003, o Brasil passou a ser dividido em 12 regiões hidrográficas. A Região Hidrográfica Tocantins-Araguaia, na qual a Bacia do Rio Formoso está inclusa, corresponde à 10,8% do território brasileiro, abrangendo seis estados: Goiás, Tocantins, Pará, Maranhão, Mato Grosso e Distrito Federal (ANA, 2019).

A Bacia do Rio Formoso é um importante afluente do rio Javaés, pertencendo à Região Hidrográfica do Tocantins-Araguaia, Figura 2a. A bacia apresenta uma área de drenagem de 27.328,57 km², cerca de 7,7% da área total do Estado do Tocantins (NATURATINS, 2019) e situa-se na região sudoeste do estado, abrangendo o território de 21 municípios, conforme pode ser visto na Figura 2b. A região da Bacia é caracterizada pela forte atividade agrícola, de forma que 97% de toda a vazão outorgada na bacia é destinada à atividade de irrigação (FILHO et al., 2015).

No ano de 2016 a bacia passou por uma crise hídrica nos municípios de Lagoa da Confusão e Cristalândia, onde houve uma drástica redução no volume de água nos rios Formoso e Urubu de forma que o curso d'água foi interrompido em alguns trechos. Este evento teve grande repercussão pública em meio aos veículos de imprensa, forçando o Ministério Público do Tocantins (MPTO) a realizar a abertura de uma Ação Cautelar Ambiental. Como fruto desta intervenção e com a finalidade modernizar a gestão de recursos hídricos da bacia, através de ferramentas que auxiliam a tomada de decisão, o

Instituto de Atenção às Cidades da UFT (IAC/UFT)² apresentou o projeto Gestão de Alto Nível (GAN)³.

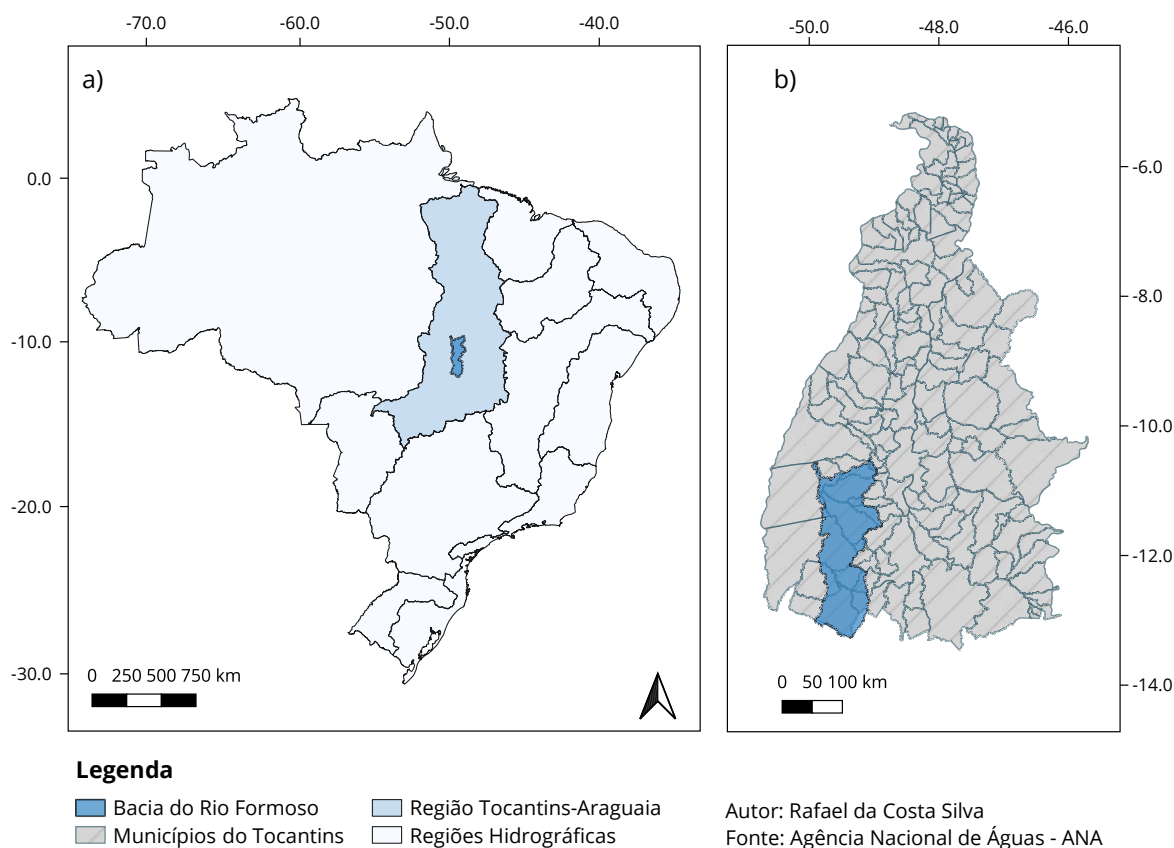


Figura 2 – a) Localização da Bacia do Rio Formoso na região hidrográfica Tocantins-Araguaia. b) Bacia do Rio Formoso no estado do Tocantins.

Este evento foi um dos marcos na gestão de recursos hídricos da bacia do Rio Formoso, visto que através dele um conjunto de ações foram realizadas com o objetivo de organizar e modernizar a gestão de recursos hídricos. Dentre o conjunto de ações realizadas, cita-se o desenvolvimento do sistema SAD-Outorga e as atividades realizadas no projeto GAN, o qual é dividido em 4 (quatro) fases: Fase A – Diagnóstico da Disponibilidade Hídrica; Fase B – Diagnóstico da Demanda Hídrica; Fase C – Monitoramento e Automação; e Fase D – Revisão das Outorgas e Regras de Operação.

Na Fase A mapeou-se a disponibilidade hídrica da bacia por meio da identificação e diagnóstico de todas as estações de monitoramento de precipitações e nível dos cursos de água. A partir destas estações foi realizada análises e tratamento em suas séries históricas para posterior cálculo de vazões mínimas e, a partir da área de drenagem das microbacias, foram processadas as vazões mínimas de referência da bacia. Para a Fase B foi realizado o

²Instituto de Atenção às Cidades da UFT. Disponível em <<http://iacuft.org.br/>>, último acesso em 07/01/2021

³Gestão de Alto Nível. Disponível em <<https://gan.iacuft.org.br/noticias/inicial>>, último acesso em 07/01/2021

levantamento de todas as intervenções em cursos d'água para irrigação e estas informações foram cruzadas com os dados da base de outorgas emitidas pelo Naturatins, para uma análise da consistência da disponibilidade e demanda hídrica.

Na Fase C realizou-se a instalação de toda a infraestrutura necessária para realizar a transmissão e monitorar a vazão captada em tempo real, dos pontos de captação de água ao longo da bacia do Rio Formoso. Em paralelo foi desenvolvido o Sistema GAN (Gestão de Alto Nível), que consiste em uma aplicação para armazenar e disponibilizar as séries históricas das estações de monitoramento da disponibilidade hídrica, além das vazões de captações das bombas hidráulicas dos projetos de irrigação outorgados. Na Fase D, será realizada a revisão e definição das regras de operação para a concessão de outorgas, garantindo que as outorgas não excedam a disponibilidade hídrica da região.

2.1.2.1 Sistema GAN - Gestão de Alto Nível

O sistema Gestão de Alto Nível (GAN) foi concebido durante a Fase C do projeto Gestão de Alto Nível, sendo um sistema *online* para o monitoramento de recursos hídricos da bacia do Rio Formoso. A solução GAN contempla todo o ecossistema associado ao processo de medição e transmissão de dados das captações realizadas na bacia.

Durante o desenvolvimento da plataforma, o IAC/UFT através de parcerias, desenvolveu a tecnologia necessária para a implementação de estações de transmissão nas propriedades associadas ao projeto, e auxiliou no processo de desenvolvimento de medidores de vazão de alta precisão e com baixo custo. As estações de transmissão dos dados de vazão são configuradas para transmitir a cada 15 minutos, possibilitando que a plataforma *online* seja capaz de apresentar de forma visual e intuitiva a demanda hídrica da bacia em tempo real.

2.1.2.2 Sistema SAD-Outorga

O sistema SAD-Outorga é um sistema computacional *online*, que objetiva simplificar o processo de submissão de requerimentos enquanto apoia a tomada de decisão durante a aplicação dos instrumentos de outorga de direitos de uso. O apoio à tomada de decisão é realizada por meio da automação de análises técnicas que visam controlar os impactos na disponibilidade hídrica das bacias hidrográficas decorrente dos múltiplos usos da água (IAC/UFT; NATURATINS, 2019).

Como consequência da automação das análises técnicas, o sistema padroniza os procedimentos legais relacionados ao instrumento de outorga, calcula o comprometimento das intervenções sobre a disponibilidade hídrica na bacia e atualiza, em tempo real e continuamente, a disponibilidade hídrica dos cursos d'água do Estado do Tocantins.

2.2 Sistemas de Apoio à Decisão

Sistemas de Apoio à Decisão (SADs) são sistemas capazes de realizar a integração de modelos, dados, rotinas de interpretação e outras informações que sejam relevantes, processa dados de entrada de forma eficiente, roda tais modelos e expõe os resultados obtidos em formatos fáceis de serem interpretados (BRAGA; BARBOSA; NAKAYAMA, 1998). Eles se diferem de um sistema de simulação devido ao seu elevado grau de proximidade com o usuário, sendo capaz de controlar os dados de entrada e saída do sistema.

A partir da década de 90, vários métodos e técnicas de inteligência artificial foram utilizados em conjunto com os SADs, potencializando a capacidade do sistema, surgindo a geração de SADs dirigidos por conhecimento (HEINZLE; GAUTHIER; FIALHO, 2017). Segundo Braga, Barbosa e Nakayama (1998), os principais componentes de um SAD são: diálogo, dados, modelos e base de conhecimento, figura 3.

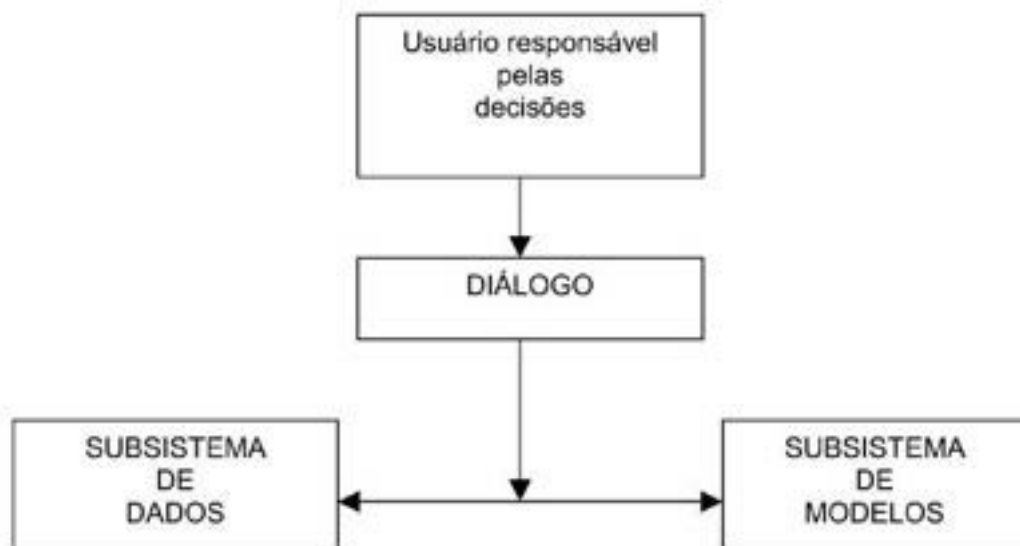


Figura 3 – Componentes de um SSD (BRAGA; BARBOSA; NAKAYAMA, 1998).

A componente diálogo é responsável por conter a interface de usuário do sistema, por onde os dados de entrada serão informados. O subsistema de modelos contém as ferramentas computacionais que realizam o processamento da informação. A componente de dados inclui o sistema de gerenciamento e a base de dados do sistema, armazenando todas as informações relevantes ao processo de tomada de decisão. Por fim, a componente base de conhecimento incorpora a experiência do tomador de decisão na fase de processamento do sistema.

Um sistema de apoio a decisão não deve realizar a tomada de decisão, mas apresentar ao gestor, gráficos, mapas ou indicadores que seja de fácil interpretação. Além disso, deve possuir uma flexibilidade suficiente para que não restrinja a tomada de decisão (COLLISCHONN, 2014).

2.2.1 SADs Aplicados na Área de Recursos Hídricos

Utilizar SADs no processo de avaliação de pedidos de outorga, em geral, consiste em realizar a integração entre a base de dados geográficos e a incorporação de uma metodologia de análise de pleitos de outorgas, já que a avaliação de outorgas sem um SAD envolve procedimentos manuais como a realização de cálculos em planilhas, análise de mapa e a confecção de relatórios (SILVA; MEDEIROS; FONTES, 2019).

De acordo com Collischonn (2014), a maior parte dos trabalhos que utilizam SADs na área de gestão de recursos hídricos visam auxiliar o planejamento e a otimização de sistemas de recursos hídricos, políticas de operação de sistemas de reservatórios, ou até mesmo a operação de setores de usuários específicos como a irrigação ou saneamento. Já SADs específicos para outorgas tendem a ser mais raros como, por exemplo, o *Water Rights Analysis Package* (WRAP) descrito por Wurbs e Walls (1989) e Wurbs (2001), que vêm sendo utilizado no gerenciamento real de recursos hídricos pelo TNRCC, órgão gestor do Texas. No Brasil, vários trabalhos propõem SADs para análise de outorgas, sendo comum a todos a avaliação do impacto da adição de novas outorgas na disponibilidade hídrica e os usos já outorgados.

O Sistema de Suporte à Decisão denominado RB, desenvolvido por Rodrigues (2005), pode apoiar a decisão sobre a outorga e auxiliar no processo de cobrança da água, integrando ao processo de outorga aspectos de qualidade da água nas outorgas de lançamento de efluentes e de usos quantitativos, de forma que o valor cobrado pela água seja proporcional à sua qualidade.

Pereira, Kayser e Collischonn (2012) desenvolveu um SAD por meio da integração com um sistema de informação geográfica (SIG) e modelos hidrológicos para realizar a análise dos pedidos de outorga. O sistema foi aplicado na bacia dos rios dos Sinos, no Rio Grande do Sul, região com alto comprometimento da disponibilidade hídrica. Este sistema tem como principal vantagem a capacidade de utilizar todos os recursos do próprio programa de SIG para visualizar e gerar mapas e relatórios.

O AQUORA, SAD desenvolvido por Marques et al. (2009), adota a utilização de imagens orbitais com as séries históricas fluviométricas e pluviométricas para estimar a disponibilidade hídrica trimestral da bacia hidrográfica em análise. É um sistema capacitado para obter a disponibilidade hídrica mensal em qualquer seção ao longo da rede hidrográfica e avaliar os impactos da concessão de uma nova outorga por meio da disponibilidade a jusante.

Por fim, Oliveira e Zeilhofer (2017) desenvolveram um sistema de apoio à decisão para analisar a disponibilidade hídrica e propor, através de critérios múltiplos hierarquizados, soluções para compartilhar a disponibilidade hídrica entre os usuários. Este SAD utiliza Lógica Fuzzy e *Analytic Hierarchy Process* (AHP), sendo a lógica fuzzy responsável por avaliar se existem alternativas que cumprem as regras definidas pelo órgão gestor da

bacia e o método AHP categoriza a importância de cada regra para se atingir os cenários desejados.

2.3 Lógica Fuzzy

Lanzillotti, Lanzillotti e Sintz (2014) apresentam a lógica *fuzzy* como um procedimento matemático para a modelagem de sistemas que trabalham com valores ambíguos, incertos ou imprecisos. Esta capacidade de trabalhar com informações imprecisas vêm da teoria dos conjuntos *fuzzy* (ZADEH, 1965) onde, diferente de conjuntos clássicos, não se é possível determinar os limites exatos de contingência de um determinada classe. Sua principal característica é dada pela capacidade descritiva, que pode ser interpretada como um processo de tradução onde o tradutor decodifica o que se é dito em funções de pertinência, cuja operacionalidade é feita por operadores lógicos.

A inferência *fuzzy* é uma importante parte da lógica *fuzzy*, que usualmente é utilizada em aplicações nas quais as entradas correspondem a um conjunto de variáveis de estado do sistema e a saída são sinais de controle, como o caso de sistemas de apoio a decisão ou baseados em conhecimento (OLIVEIRA; ZEILHOFER, 2017), (KARNIB, 2004) e (YAN; SHIMIZU; NAKAMURA, 1991). O mapeamento da entrada e saída é feita através de um conjunto de regras *fuzzy* que refletem o conhecimento acerca do problema em questão (CHERKASSKY, 1998). Para Karnib (2004), o desenvolvimento desta categoria de sistema é geralmente composto por três componentes: regras se-então, conjuntos *fuzzy* (ou regras de relacionamento) e análise da lógica *fuzzy* (processo de inferência e análise lógica das regras).

2.3.1 Conjuntos Fuzzy

O conceito de conjuntos *fuzzy* foi proposto por (ZADEH, 1965), sendo tratado como uma generalização da Teoria Clássica dos Conjuntos. A Teoria de Conjuntos *Fuzzy* possui a capacidade de trabalhar com informações imprecisas, que diferentemente dos conjuntos clássicos, não é possível determinar os limites exatos de contingência de um determinada classe (LANZILLOTTI; LANZILLOTTI; SINTZ, 2014). Nos conjuntos clássicos o pertencimento de um elemento em determinado conjunto é definido por somente dois valores de pertinência, 0 ou 1. Já nos conjuntos *fuzzy* esta pertinência pode assumir qualquer valor no intervalo de 0 a 1.

Em um conjunto *fuzzy*, a classe A é caracterizada por uma função de pertinência $f_A(x)$ que associa cada elemento x do universo de discurso U (conjunto de todos os possíveis valores de entrada) a um número real no intervalo $[0, 1]$, que representa o grau de pertinência deste elemento x na classe A . Formalmente, tem-se $f_A : U \rightarrow [0, 1]$ (ZADEH, 1965). Por exemplo, na variável “tempo restante para o vencimento da outorga” o elemento $x = 0,3$, representando o tempo restante para o vencimento de uma outorga

dentro do universo de discurso U , terá sua pertinência na classe “pouco tempo” avaliada como $f_A(0,3) = 0,67$. A figura 4 contém a representação gráfica deste exemplo.

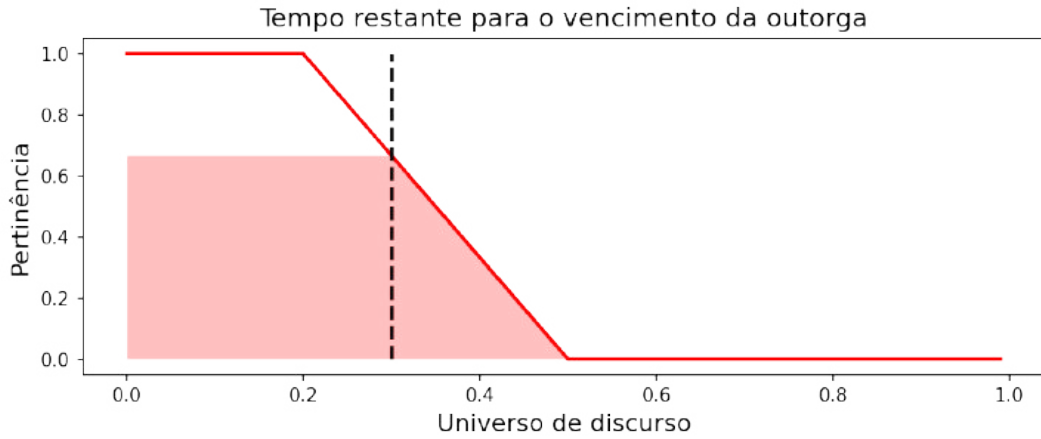


Figura 4 – Pertinência do conjunto fuzzy “pouco tempo” referente ao vencimento de uma outorga para $x = 0,3$.

Durante o processo de modelagem dos conjuntos *fuzzy* é de suma importância realizar a escolha da função de pertinência que melhor representa a classe modelada. As formas gráficas mais comuns para serem utilizadas na representação de um conjunto difuso são as funções trapezoidal (Equação 1) e triangular (Equação 2) (OLIVEIRA; ZEILHOFER, 2017).

$$f_A(x) : X \rightarrow [0, 1] : f_A(x)(x; \alpha; \beta; \gamma; \delta) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < \alpha \text{ ou } x > \delta \\ \frac{(x-\alpha)}{(\beta-\alpha)}, & \text{se } \alpha \leq x \leq \beta \\ 1, & \text{se } \beta \leq x \leq \gamma \\ \frac{(\delta-x)}{(\delta-\gamma)}, & \text{se } \gamma < x \leq \delta \end{cases} \quad (1)$$

$$f_A(x) : X \rightarrow [0, 1] : f_A(x)(x; \alpha; \beta; \gamma) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < \alpha \text{ ou } x > \gamma \\ \frac{(x-\alpha)}{(\beta-\alpha)}, & \text{se } \alpha \leq x < \beta \\ 1, & \text{se } x = \beta \\ \frac{(\gamma-x)}{(\gamma-\beta)}, & \text{se } \beta < x \leq \gamma \end{cases} \quad (2)$$

Graficamente, tem-se:

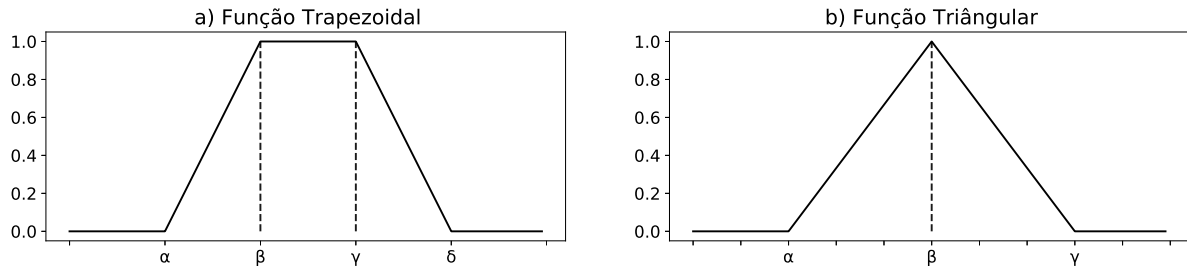


Figura 5 – a) Função Trapezoidal, b) Função Triângular. Adaptado de Oliveira e Zeilhofer (2017).

Os conjuntos *fuzzy* também possuem operações matemáticas. Neste trabalho, as operações mais utilizadas correspondem à união e intersecção. Segundo (ZADEH, 1965), a união de dois conjuntos A e B , com as respectivas funções de pertinências $f_A(x)$ e $f_B(x)$, é um novo conjunto C escrito como $C = A \cup B$, de maneira que a função de pertinência está relacionada com as funções de A e B por:

$$f_C(x) = \text{Max}[f_A(x), f_B(x)], x \in X \quad (3)$$

ou, pela sua forma abreviada:

$$f_C = f_A \vee f_B \quad (4)$$

Graficamente:

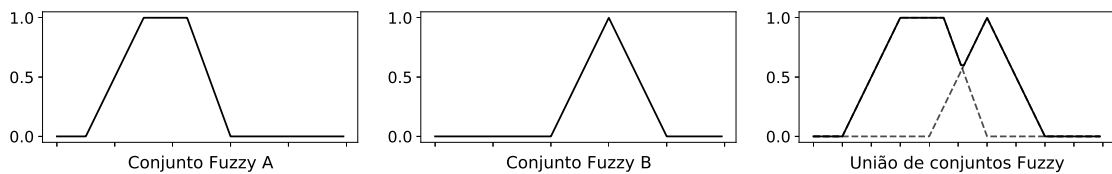


Figura 6 – Operação de união entre dois conjuntos *fuzzy*.

De forma análoga à união, a operação de intersecção dos conjuntos A e B , com as suas respectivas funções de pertinência $f_A(x)$ e $f_B(x)$, resulta em um conjunto *fuzzy* C , sendo $C = A \cap B$, que relaciona as funções de pertinência de A e B , conforme apresentado na Equação 5:

$$f_C(x) = \text{Min}[f_A(x), f_B(x)], x \in X \quad (5)$$

ou, pela sua forma abreviada:

$$f_C = f_A \wedge f_B \quad (6)$$

Na forma gráfica temos:

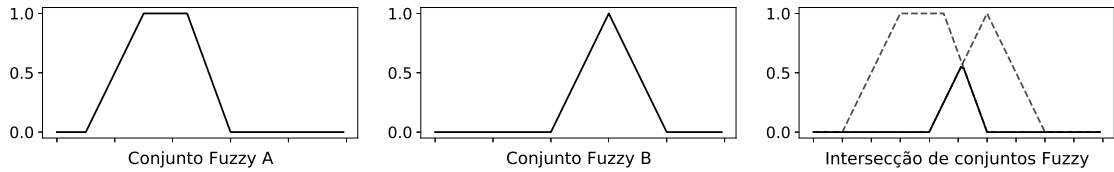


Figura 7 – Operação de intersecção entre dois conjuntos *fuzzy*.

2.3.2 Regras se-então

A interpretação mais comum e amplamente utilizada de uma regra *fuzzy*, considera que uma regra na forma “**SE** x é A **ENTÃO** y é B ” como um ponto *fuzzy* $A \times B$ e uma coleção de regras “**SE** x é A_i **ENTÃO** y é B_i ”, onde $i = 1, \dots, n$, como um grafo *fuzzy* que fornece uma descrição aproximada da relação entre x e y . O benefício de se possuir uma regra com antecedente difuso é fornecer uma base para mecanismos de conjunção, em vez de utilizarmos uma implicação lógica de multi valores (DUBOIS; PRADE, 1996).

Em termos práticos, uma regra na forma se-então pode ser dividida em duas partes, antecedente e conseqüente: “**SE** <antecedentes> **ENTÃO** <conseqüente>”. Caso os antecedentes da regra sejam avaliados como verdadeiros, então logicamente o conseqüente também será verdadeiro. Assim, a pertinência do conseqüente é igual a pertinência avaliada pelos antecedentes, que por sua vez estão conectados por meio de operadores.

2.3.3 Inferência Fuzzy

A inferência baseada no método de Mamdani (1976) permite determinar a saída de um sistema *fuzzy* por meio das entradas e regras *fuzzy*. Neste processo a informação relativa às premissas ou conclusões das regras são representados com funções de pertinência. Considere as regras:

- $$\begin{aligned} R_1 &\rightarrow \text{se } x_1 \text{ é } A_{11} \text{ e } x_2 \text{ é } A_{21} \text{ então } y \text{ é } B_1 \\ R_2 &\rightarrow \text{se } x_1 \text{ é } A_{12} \text{ então } y \text{ é } B_2 \\ R_3 &\rightarrow \text{se } x_1 \text{ é } A_{13} \text{ então } y \text{ é } B_3 \end{aligned}$$

Os elementos A_{11} , A_{21} , A_{12} e A_{13} são qualificações das premissas (variáveis) x_1 e x_2 ; B_1 , B_2 e B_3 são características da saída y , que possui as seguintes funções de pertinência: $\mu_{A_{11}}(x_1)$, $\mu_{A_{12}}(x_1)$, $\mu_{A_{13}}(x_1)$, $\mu_{A_{21}}(x_2)$, $\mu_{B_1}(y)$, $\mu_{B_2}(y)$ e $\mu_{B_3}(y)$. Na prática, a conclusão das regras R_1 , R_2 e R_3 é calculada através das funções de pertinência. Pela aplicação do método de Mamdani:

$$\beta_1 = \mu_{A_{11}}(x_1) \wedge \mu_{A_{21}}(x_2) = \min(\mu_{A_{11}}(x_1), \mu_{A_{21}}(x_2)) \quad (7)$$

$$\beta_2 = \mu_{A_{12}}(x_1) \quad (8)$$

$$\beta_3 = \mu_{A13}(x_1) \quad (9)$$

O resultado das três regras são calculadas por:

$$R_1 = \min(\beta_1, \mu_{B1}(y)) \quad (10)$$

$$R_2 = \min(\beta_2, \mu_{B2}(y)) \quad (11)$$

$$R_3 = \min(\beta_3, \mu_{B3}(y)) \quad (12)$$

E a saída do sistema *fuzzy*:

$$\text{Saída} = \max(R_1, R_2, R_3) \quad (13)$$

3 TRABALHOS RELACIONADOS

O presente capítulo apresenta trabalhos relacionados com o tema desta monografia, que foram considerados relevantes para a elaboração do Sistema de Apoio à Decisão proposto neste trabalho. A primeira seção, 3.1, descreve o trabalho de Karnib (2004), o qual elaborou uma abordagem para avaliar a prioridade de projetos de recursos hídricos com a utilização de lógica *fuzzy*. Já na seção 3.2 é apresentado o trabalho de Oliveira e Zeilhofer (2017), descrevendo os principais aspectos da utilização de lógica *fuzzy* na alocação ótima da vazão outorgada.

3.1 Uma abordagem para avaliar projetos de recursos hídricos

Karnib (2004) em seu trabalho intitulado “*An Approach to Elaborate Priority Pre-orders of Water Resources Projects Based on Multi-Criteria Evaluation and Fuzzy Sets Analysis*” descreve uma abordagem para realizar a avaliação de prioridades entre projetos por meio da utilização de lógica *fuzzy*. A ferramenta modelada tem como saída o relacionamento de prioridade de cada projeto com os demais. Este relacionamento pode ocorrer de três formas: tem prioridade, indiferente e incomparável.

Esta abordagem foi desenvolvida pensando nos países que elaboram um planejamento principal para a gestão dos recursos hídricos, tendo como produto, um conjunto de investimentos e projetos a serem executados, que devido às limitações financeiras ou capacidade de desenvolvimento, necessitam ser priorizados determinando uma ordem de execução. Para tornar a ferramenta flexível, atendendo às especificidades de cada país, os projetos são com base em impacto social, ambiental e econômico.

Simonovic (2000), em seu trabalho, discute como métodos que decorrentes do uso da teoria de conjuntos *fuzzy* são capazes de modelar critérios qualitativos complexos, presente na gestão de recursos hídricos. Para representar o sistema de estudo Karnib (2004) utiliza regras condicionais e inferência *fuzzy*. Sistemas desse tipo recorrem a de três componentes: regras na forma se-então, funções de pertinência e análise de lógica *fuzzy*, conforme descrito na seção 2.3.

3.1.1 Avaliação do grau de prioridade

Um exemplo de conjuntos de regras utilizadas no sistema pode ser observado na Tabela 1. Estas regras possuem em sua composição duas categorias de incertezas (YAN; SHIMIZU; NAKAMURA, 1991). A primeira é referente a imperfeição da informação, por exemplo, em qual nível pode-se considerar a qualidade da água baixa. Já o segunda categoria de incerteza está associado à imperfeição da própria regra, ou seja, qual o grau de confiança tem-se de que a prioridade deve ser baixa quando a qualidade da água for baixa.

Ambas as incertezas podem ser expressas e mensuradas por meio da teoria de conjuntos *fuzzy* (ZADEH, 1975) e pela inferência *fuzzy* (MAMDANI, 1976), respectivamente.

Se Qualidade da Água = baixa	então	Prioridade = baixa
Se Qualidade da Água = média	então	Prioridade = média
Se Alocação de Água pra Irrigação = alta	então	Prioridade = alta

Tabela 1 – Exemplo de regras utilizadas. Adaptado de Karnib (2004).

A avaliação do grau de prioridade é feita baseando-se no teste de todas as regras para cada critério, de forma que cada uma avalia o grau de prioridade com base em um critério diferente. Por meio destas avaliações, para cada critério (i) avaliado, os graus de prioridade mínima (r_i^-) e máxima (r_i^+) são definidos como:

$$r_i^+ = \text{Máximo de } r_i', r_i'', r_i''' \quad (14)$$

$$r_i^- = \text{Mínimo de } r_i', r_i'', r_i''' \quad (15)$$

Os valores obtidos por r_i^+ e r_i^- são conjuntos *fuzzy* trapezoidais não normalizados que variam entre 0 e 1, da prioridade mais baixa para a mais alta. A prioridade de cada projeto, considerando todos os critérios, é definida pela seguinte equação:

$$R^+(A) = \sum_i w_i \cdot r_i^+(A) \quad (16)$$

$$R^-(A) = \sum_i w_i \cdot r_i^-(A) \quad (17)$$

Onde $R^+(A)$ e $R^-(A)$ correspondem ao grau de prioridade mínima e máxima do projeto A , $r_i^+(A)$ e $r_i^-(A)$ correspondem ao grau de prioridade mínima e máxima do projeto A de acordo com o i -ésimo critério ($i = 1, \dots, n$) e, por fim, w_i é o peso que representa a importância relativa de cada regra.

Por questões de escopo do trabalho, Karnib (2004) preferiu utilizar os centroides (defuzzificação) dos conjuntos μ_{R^+} e μ_{R^-} como metodologia de ordenação dos conjuntos *fuzzy*. Dados os conjuntos *fuzzy* μ_{R^+} e μ_{R^-} , os pontos centrais R_0^+ , R_0^- são respectivamente:

$$R_0^+ = \frac{\int \mu_{R^+}(y)ydy}{\int \mu_{R^+}(y)dy} \quad (18)$$

$$R_0^- = \frac{\int \mu_{R^-}(y)ydy}{\int \mu_{R^-}(y)dy} \quad (19)$$

Estes pontos centrais permitem mensurar a importância de cada projeto em relação a todos os critérios definidos. Estas saídas podem ser utilizadas para construir a prioridade

total dos projetos de recursos hídricos. As prioridades totais (P^+ , I^+) e (P^- , I^-) são definidos como:

$$\begin{aligned} A P^+ B \text{ se } R_0^+(A) - R_0^+(B) > q_0^+ \\ A P^- B \text{ se } R_0^-(A) - R_0^-(B) > q_0^- \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} A I^+ B \text{ se } |R_0^+(A) - R_0^+(B)| \leq q_0^+ \\ A I^- B \text{ se } |R_0^-(A) - R_0^-(B)| \leq q_0^- \end{aligned} \quad (21)$$

Onde q_0^+ e q_0^- são *thresholds* utilizados para diferenciar entre “indiferente” e “prioritário” dois projetos, A e B . Caso a diferença entre $R_0^+(A)$ (ou $R_0^-(A)$) e $R_0^+(B)$ (ou $R_0^-(B)$) não exceder q_0^+ (ou q_0^-), então A e B não são considerados significativamente diferentes. Se a diferença for maior que q_0^+ (ou q_0^-) então A possui maior prioridade que B em termos de P^+ (ou P^-). Em seguida, se obtêm a prioridade parcial (P e I), considerando a interseção:

$$A \text{ tem prioridade } B (APB) \text{ se } \begin{cases} AP^+B & \text{e} & AP^-B \\ AP^+B & \text{e} & AI^-B \\ AI^+B & \text{e} & AP^-B \end{cases} \quad (22)$$

$$A \text{ é indiferente } B (APB) \text{ se } \begin{cases} AI^+B & \text{e} & AI^-B \end{cases} \quad (23)$$

$$A \text{ e } B \text{ são incomparáveis caso contrário.} \quad (24)$$

Esta prioridade parcial oferece ao tomador de decisão um grafo (Figura 8) com a prioridade dos projetos que são comparáveis. Esta informação pode ser utilizada na definição da ordem de execução dos projetos de recursos hídricos.

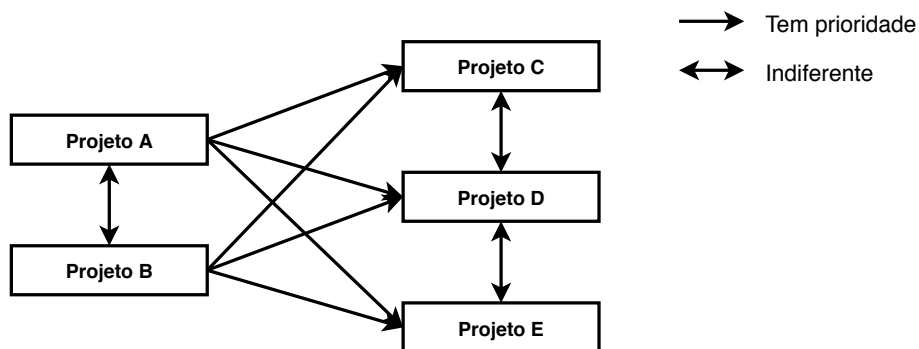


Figura 8 – Representação gráfica da prioridade dos projetos. Adaptado de Karnib (2004).

3.2 SAD para outorga de recursos hídricos superficiais

No trabalho de Oliveira e Zeilhofer (2017) é apresentado o desenvolvimento de um sistema de suporte à decisão baseado em lógica *fuzzy* e *Analytic Hierarchy Process (AHP)* para avaliar os efeitos dos usos múltiplos sobre a disponibilidade hídrica considerando as características quantitativas e qualitativas da água em bacias hidrográficas. Este sistema faz uso da lógica *fuzzy* para avaliar as diversas alternativas de balanceamento, que cumprem as regras de operações pré-definidas (pelo Órgão Gestor de recursos hídricos) e pelo método AHP, de forma a identificar a melhor das alternativas disponíveis.

O sistema contém dois componentes principais, conforme apresentado na Figura 9. O primeiro é um módulo de outorga, que analisa determinado trecho, no qual identifica quais vazões já foram concedidas e quanto ainda resta de vazão a ser disponibilizada para o uso em novos empreendimentos. Já o segundo módulo é o Sistema de Suporte a Decisão (SSD), que somente é executado quando uma nova outorga solicita uma quantidade de vazão que gera um déficit na vazão de algum trecho do rio.

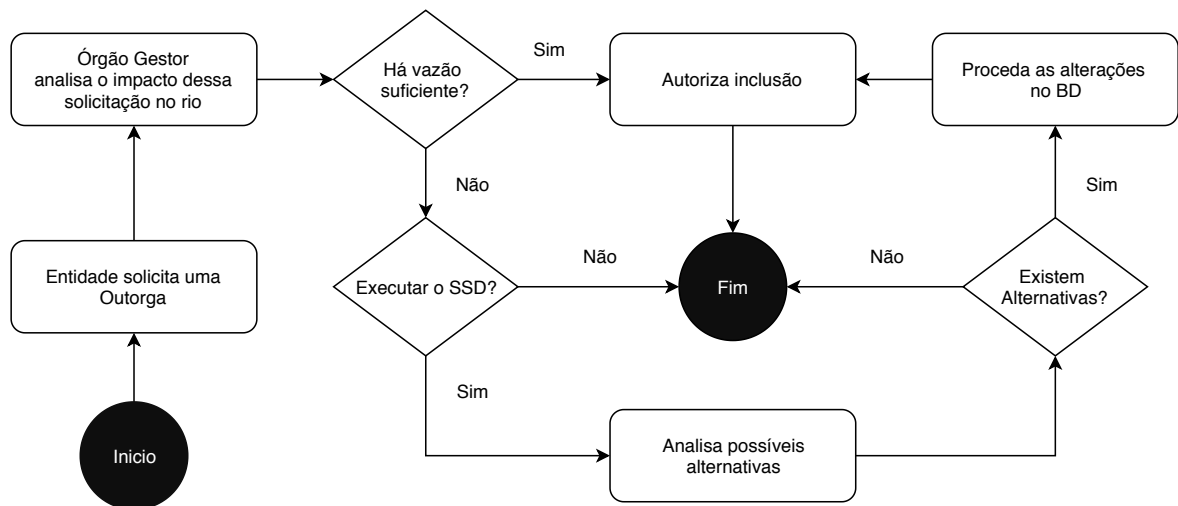


Figura 9 – Fluxograma do funcionamento do Sistema de Outorga. Adaptado de Oliveira e Zeilhofer (2017).

O módulo de outorga é desenvolvido com base na metodologia de HORA (2001), que calcula a vazão v que ainda está disponível para ser atribuída a um novo empreendimento localizado no trecho i de um rio em determinado tempo t . Desta forma, a vazão disponível $v_d(i, t)$ é dada como a diferença entre a vazão máxima disponível, $v^+(i, t)$, e a soma de todas as outorgas concedidas (sendo as vazões de captação e liberação de efluentes) aos empreendimentos localizados a montante M do rio até o trecho i . Em nenhum momento a soma dos direitos de captação e liberação devem ser maiores que a vazão máxima disponível para todo trecho i e tempo t .

O módulo SSD visa apresentar ao Órgão Gestor, uma lista com não mais de 10 agrupamentos de entidades, com no máximo 5 empreendimentos situados a montante

do trecho, que apresenta o maior déficit e estão aptos a terem suas vazões reduzidas. Este agrupamento é realizado conforme as regras de operação definidas inicialmente pelo Órgão Gestor. O módulo foi implementado com base em O'Hagan (1993), que propõe um modelo de decisão que se baseia em lógica *fuzzy* para inter-relacionar objetivos e critérios do problema em que se busca a melhor solução. Para Bellman e Zadeh (1970), uma alternativa ótima é aquela que melhor satisfaça todos os critérios no sentido comum. Esta alternativa pode ser avaliada por meio da regra de conjunção implícita com m objetivos e n restrições, através da Equação 25.

$$D(x) = \text{Min}(\mu_{G_1}(x), \dots, \mu_{G_i}(x), \mu_{C_1}(x), \dots, \mu_{C_i}(x)) \quad (25)$$

Onde $\mu_{G_i}(x)$ e $\mu_{C_i}(x)$ é o valor difuso para i -ésimo objetivo e restrição da alternativa x , e $D(x)$ é o conjunto difuso para a decisão que satisfaz tanto os objetivos quanto às restrições do problema. Para que seja selecionada a decisão ótima é preciso selecionar a alternativa x^* que terá o maior valor de pertinência do conjunto de decisões $D(x)$. Esta alternativa é definida como:

$$x^* = \text{Max}[D(x)], x \in X \quad (26)$$

Entretanto, uma limitação desta metodologia é a presunção que todos os objetivos e restrições possuam o mesmo grau de importância. De modo a contornar tal limitação, Yager (1977) sugeriu elevar os valores de pertinência por um peso α , que avalia o grau de importância do objetivo m ou da restrição n , conforme Equação 27. Para mensurar a importância relativa entre os objetivos ou restrições, utiliza-se o método de análise multicritério do tipo iterativo chamado AHP, proposto por Saaty (1977).

$$D(x) = \text{Min}(\mu_{G_1}^{\alpha_1}(x), \dots, \mu_{G_i}^{\alpha_m}(x), \mu_{C_1}^{\alpha_{m+1}}(x), \dots, \mu_{C_i}^{\alpha_{m+n}}(x)) \quad (27)$$

No SAD desenvolvido foi utilizado os seguintes parâmetros como pesos nas funções de decisão: percentual de captação em relação à vazão máxima disponível para a outorga, concentração de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e tempo médio de contrato. Assim que o módulo é acionado, o sistema busca todos os usuários que se encontram a montante do trecho que apresenta déficit e cria até 2000 grupos de no máximo 5 usuários cada, no qual a soma da redução nas vazões de cada um deles seja suficiente para manter a vazão ecológica do rio. Com os grupos analisados e categorizados, as 10 melhores alternativas são apresentadas para que o gestor escolha o grupo que possibilitará a inclusão do novo usuário. A vantagem da abordagem proposta por Oliveira e Zeilhofer (2017) é a capacidade de fácil adaptação do sistema para se adequar a bacia hidrográfica que deseja implementá-lo, possibilitando ainda a inclusão das regras de operação previamente definidas pelo órgão gestor de recursos hídricos da bacia.

4 METODOLOGIA

Este capítulo descreve a metodologia adotada na elaboração do Sistema de Apoio à Decisão proposto neste trabalho. Na seção 4.1 é apresentada uma visão geral da arquitetura e fluxo de dados do sistema elaborado. Em seguida, a seção 4.2 descreve o processo de coleta das portarias de outorgas e criação da base de dados do sistema. Na seção 4.3 contém o processo de modelagem dos conjuntos e regras *fuzzy* utilizadas no sistema. Por fim, a seção 4.4, descreve a metodologia adotada para avaliar as regras *fuzzy*.

4.1 Concepção do Sistema de Apoio a Decisão *Water Balance*

A concepção do sistema *Water Balance* tem como base as características que um sistema deve possuir para ser classificado como SAD, conforme Heinzle, Gauthier e Fialho (2017) e Laudon e Laudon (2001). O sistema é destinado a auxiliar os tomadores de decisão no processo de balanceamento dos recursos hídricos captados em situações de conflitos, decorrentes de uma demanda superior à disponibilidade hídrica. A principal funcionalidade do sistema é o ranqueamento das outorgas, impactadas pela adição de um novo usuário, para a criação de um cenário com as outorgas balanceadas. O ranqueamento é feito utilizando critérios previamente definidos pelo gestor.

Segundo Heinzle, Gauthier e Fialho (2017), um SAD deve ter como objetivo fornecer ao gestores subsídios, ou instrumentos, que permitam uma melhor tomada de decisão. Subsídios que podem ser: comparar, analisar, simular e apoiar a seleção de alternativas por meio da geração de cenários envolvendo um número significativo de variáveis relacionadas ao domínio de aplicação. Para Laudon e Laudon (2001) estas funcionalidades são criadas através da combinação de dados com modelos analíticos sofisticados. Apesar de outras categorias de sistemas serem capazes de auxiliar no processo de tomada de decisão, os SADs, em específico, formam uma classe de sistemas caracterizados por (LAUDON; LAUDON, 2001, p. 27):

1. Oferecer aos usuários flexibilidade, adaptabilidade e respostas rápidas;
2. Permitir aos usuários iniciar e controlar as entradas e saídas;
3. Operar com pouca ou nenhuma assistência de programadores profissionais;
4. Oferecer suporte para decisões e problemas para os quais as soluções não podem ser especificadas previamente;
5. Usar análises sofisticadas e ferramentas de modelagem;

Visando atender tais características, o modelo analítico do *Water Balance* baseia-se na teoria de conjuntos *fuzzy*, em específico no método de inferência *fuzzy* de Mandani (MAMDANI, 1976). Conforme apresentado na seção 3.2, Oliveira e Zeilhofer (2017) demonstram a utilização da teoria de conjuntos *fuzzy* para redimensionar as vazões já outorgadas concedidas, permitindo que seja realizado a inclusão de novos usuários, mesmo que a vazão outorgada de determinado trecho esteja perto de seu limite.

No trabalho de Oliveira e Zeilhofer (2017), o redimensionamento está condicionado a uma minimização dos impactos nos recursos hídricos, sejam em quantidade disponível ou qualidade da água, em conjunto com a criação de cenários que limitam a diminuição de direitos de outorgas já concedidos. Por outro lado, nossa abordagem se utiliza da premissa de que as outorgas em vigência já estão utilizando o mínimo de recursos hídricos necessários para a execução da atividade fim.

Neste cenário, onde a demanda é superior à disponibilidade de outorgas que utilizam o mínimo de recursos necessários, o sistema avalia e ranqueia a situação em que cada outorga se encontra. Desta forma, a deficiência de disponibilidade hídrica pode ser distribuída a todos de forma proporcional a qualidade de sua outorga. Assim, usuários que possuam uma outorga bem definida e seguem corretamente as normativas dos órgãos gestores sofrem uma redução inferior à aqueles que não as seguem.

Os módulos que compõe o *Water Balance* se baseiam na estrutura padrão de um SAD Braga, Barbosa e Nakayama (1998), seção 2.2. Sua estrutura completa pode ser visualizada na Figura 10. O módulo de usuário representa a interface *web* do sistema, por onde o tomador de decisão interagirá com o sistema. Neste módulo o tomador de decisão pode informar o trecho da bacia que necessita ser balanceado e visualizar o cenário de redução proposto pelo sistema. Os dados informados são encaminhados ao subsistema de modelo, módulo que contém a estrutura convencional de um sistema *fuzzy* (LEONDES, 1997), conforme pode ser observado na Figura 11.

O subsistema de modelo realiza um pré-processamento das informações e por consulta ao banco de dados identifica quais são as outorgas impactadas pelo trecho selecionado e as encaminha para a etapa de fuzzificação. Cada outorga é avaliada individualmente pelos conjuntos *fuzzy* e, posteriormente, passam pela máquina de inferência, que por meio das regras da base de conhecimento, define a avaliação geral de cada outorga. Como as informações da avaliação ainda estão na forma de conjuntos *fuzzy*, é realizada uma etapa de defuzzificação, que estipula a nota final de cada outorga como o centroide dos conjuntos de avaliação ativados.

Com a nota de todas as outorgas definidas, o pós-processamento a converte na vazão proporcional de redução que deve ser implementada para que o trecho analisado se torne balanceado. A equação 28 descreve o processo de correção, onde a corresponde a avaliação da outorga analisada, a_i é a avaliação obtida pela i -ésima outorga, V_m é a vazão máxima outorgável no trecho alvo do balanceamento, e v_i corresponde a vazão atribuída

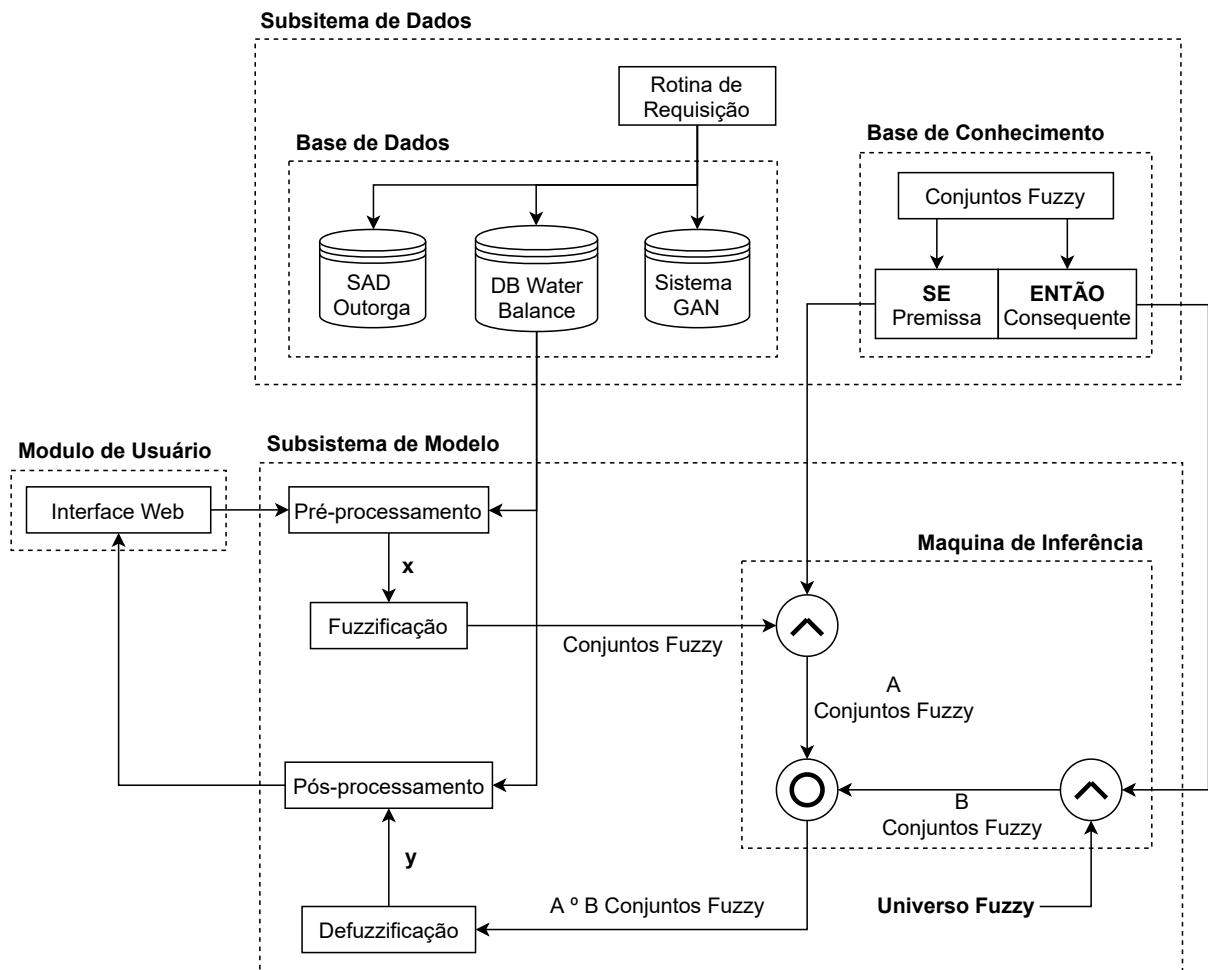


Figura 10 – Estrutura do sistema *Water Balance*.

na i -ésima outorga. Nota-se que a vazão de redução, V_r , utiliza o inverso das avaliações, $1 - a$. Logo, conforme a nota de avaliação se aproxima de 1, a vazão de redução será proporcionalmente menor.

$$V_r = \frac{(1 - a)}{\sum_{i=1}^k (1 - a_i)} \cdot \left(\sum_{i=1}^k v_i - V_m \right) \quad (28)$$

Por fim, tem-se o módulo de subsistema de dados, que consiste na base de dados e de conhecimento do sistema. Este é o subsistema responsável por realizar a consulta e processamento de informações providas por bases de dados externas, além de armazenar os conjuntos e regras *fuzzy* utilizados pela máquina de inferência. Atualmente, as únicas bases de dados externas, das quais os dados são consultados são as bases dos sistemas SAD-Outorga e GAN.

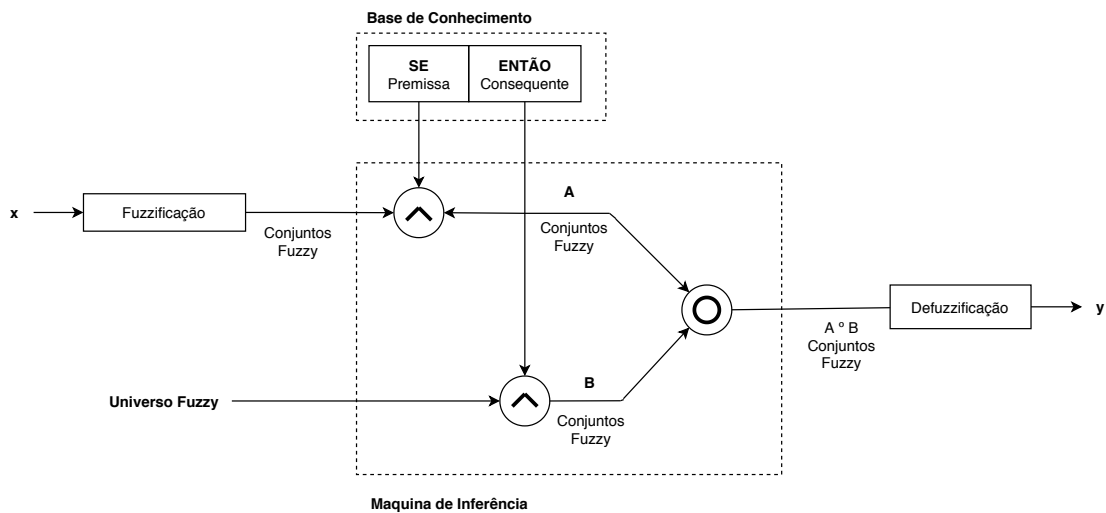


Figura 11 – Estrutura convencional de um sistema *fuzzy*. Adaptado de Leondes (1997, pg. 63).

4.2 Base de dados e obtenção das portarias de Outorgas

O sistema *Water Balance* não realiza a criação de dados sobre as outorgas ou disponibilidade/demanda hídrica. Sua principal função é realizar a avaliação das outorgas por meio da requisição e sintetização de informações armazenadas em sistemas utilizados pelos gestores de recursos hídricos. Logo, sua base de dados principal é montada a partir da consulta à sistemas externos.

Em decorrência da inexistência de um sistema único que armazena informações sobre outorga e situação hídrica, as informações necessárias para realizar a avaliação das outorgas foram obtidas através de consulta aos sistemas SAD-Outorga e GAN, ambos desenvolvidos pelo IAC/UFT. Esta requisição de dados é feita por uma rotina presente no módulo de subsistema de dados. O sistema realiza a requisição de três conjuntos principais de dados, da capacidade hídrica da bacia, outorgas concedidas e captações em monitoramento.

As informações sobre os processos de outorga e capacidade hídrica estão disponíveis no sistema SAD-Outorga, apresentado na seção 2.1.2.2, que assim como no AQUORA (MARQUES et al., 2009), utiliza a noção de imobilização hídrica, onde a menor vazão outorgável localizada no trecho a jusante imobiliza a vazão máxima outorgada por trecho a montante. Esta modelagem facilita o processo de balanceamento das outorgas, devido ao balanceamento de determinado trecho consistir na identificação das outorgas a montante e reajustar cada uma para que o somatório da vazão outorgada não exceda o limite outorgável do trecho balanceado.

Após requisitar os dados sobre a capacidade hídrica da bacia, solicita-se o segundo conjunto de informações, que consiste nos dados das outorgas concedidas. Este conjunto de dados contém somente o que chamamos de metadados sobre a outorga, em decor-

rência dele conter somente dados sobre a outorga e categoria de captação realizada pelo empreendimento outorgado.

O terceiro conjunto de dados solicitado associa as outorgas e o arco hidrológico, presente no SAD-Outorga, com as captações monitoradas pelo do sistema GAN (sistema descrito na seção 2.1.2.1). Este conjunto armazena o número identificador da outorga, o número identificador do trecho de referência para realizar o balanceamento, o número identificador da captação no GAN e o regime de captação permitido pelo processo de outorga. Por meio do número identificador da captação, GAN ID, é possível consultar em tempo real a vazão mensal média de captação dos últimos 12 meses.

4.3 Base de Conhecimento

A base de conhecimento de um sistema *fuzzy* é considerada uma de suas partes mais importantes. Esta base realiza a representação do conhecimento obtido através de um especialista na área de domínio da aplicação. É a base que compreende a modelagem de todos os conjuntos *fuzzy* e regras *fuzzy*. Neste trabalho utiliza-se 5 (cinco) variáveis *fuzzy*, conforme apresentado na tabela 2, sendo quatro critérios de avaliação da outorga e um que representa a nota de avaliação da outorga. Dentre os critérios têm-se: tempo de vencimento da outorga, eficiência do sistema de utilização de água, vazão utilizada pela outorgada e hierarquia de uso. A Figura 12 apresenta a visualização gráfica de cada conjunto com suas respectivas variáveis.

Tabela 2 – Dicionário dos conjuntos *fuzzy* utilizados no *Water Balance*.

Variável	Sigla	Descrição
Tempo Vencimento	MU	Muito tempo
	ME	Tempo Médio
	PO	Pouco tempo
Eficiência	IN	Ineficiente
	BE	Baixa eficiência
	EF	Eficiente
	ME	Muito eficiente
Hierarquia de uso	H	Abastecimento Público
	A	Dessedentação Animal
	I	Irrigação
	P	Piscicultura
	O	Outros
Vazão utilizada	P	Subutilizado
	B	Bem utilizado
	M	Sobreutilizado
Ranking	AL	Alto
	ME	Médio
	BA	Baixo

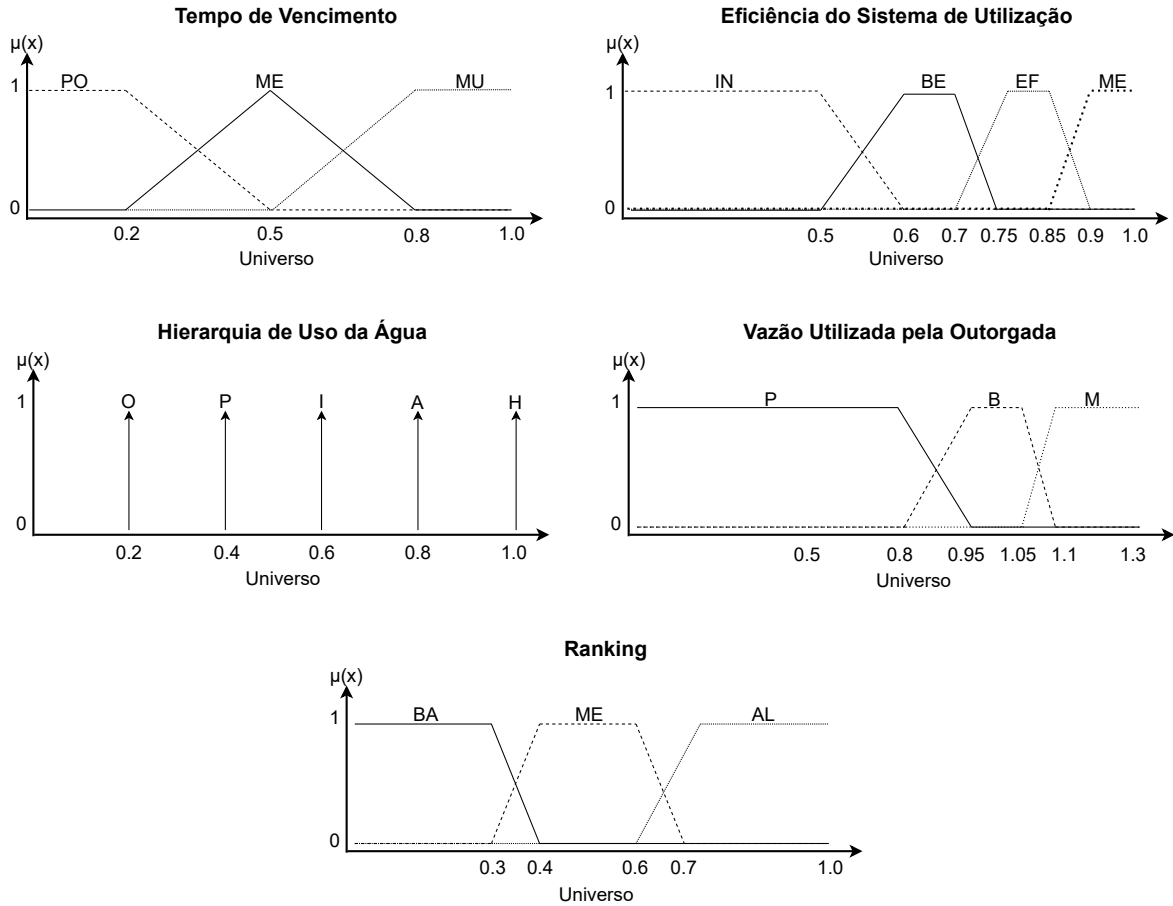


Figura 12 – Variáveis *fuzzy* e seus respectivos conjuntos no sistema *Water Balance*.

Todos os conjuntos foram modelados com o auxílio de um especialista na área de gestão de recursos hídricos, visando torná-los mais o representativo possível da realidade. Como pode ser observado na Figura 12, somente a variável “hierarquia no uso da água” possui conjuntos *fuzzy* do tipo *singleton*. Esta escolha de modelagem decorre da própria informação que está sendo representada, a de uma variável categórica. Numa variável categórica não existe intersecção entre as categorias.

A variável tempo de vencimento da outorga não considera há quanto tempo a outorga se encontra vigente, somente quantos dias restam para o vencimento. A equação 29 descreve o processo de fuzzificação da data de vencimento para o universo da variável. Onde D_v é o número de dias restantes para o vencimento da outorga; e β_t , parâmetro de configuração, indica o número máximo de dias considerados relevantes para analisar o tempo de vencimento. Seu valor padrão é 1.095 dias, o equivalente a 3 anos.

$$f_{\text{Venc}} = \text{Min} \left[\frac{D_v}{\beta_t}, 1.0 \right] \quad (29)$$

A vazão utilizada pela vazão outorgada tem a função de verificar se o empreendimento outorgado está fazendo bom uso de sua vazão. O universo *fuzzy* desta variável

indica a porcentagem de uso da vazão em relação ao outorgado, conforme equação 30. Na equação, V_u é a vazão utilizada e V_o é a vazão outorgada, ambas na unidade de m^3/s .

$$f_{\text{vazão}} = \text{Min} \left[\frac{V_u}{V_o}, 1.3 \right] \quad (30)$$

As variáveis, hierarquia do uso de água e eficiência do sistema de utilização dispensam a necessidade de utilização de fórmulas. Para realizar a fuzzificação da hierarquia, o sistema utiliza uma estrutura de dados chave-valor, que mapeia cada classe ao seu respectivo conjunto *singleton*. Como o cálculo de eficiência do sistema que utiliza a água varia conforme a atividade para qual a captação está destinada, utiliza-se a eficiência informada no processo de outorga retornada por meio da consulta ao sistema SAD-Outorga.

Neste trabalho, todas as regras *fuzzy* armazenadas na base de conhecimento, estão na forma “**SE** <Premissa> **ENTÃO** <Consequente>”, conforme observado na seção 2.3.2. O número de antecedentes presentes em cada regra varia de 1 a n , sendo n o número de critérios utilizados na avaliação. O consequente de todas as regras é composto por um único membro da variável *Ranking*, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Exemplo de regras utilizadas no sistema Water Balance.

ID	Antecedentes				Consequente <i>Ranking</i>
	Vencimento	Eficiência	Vazão utilizada	Hierarquia de uso	
1	-	-	-	H	AL
5	ME	ME	B	I	AL
9	-	EF	B	A	ME
15	MU	EF	B	P	ME
18	ME	ME	B	O	ME
19	-	-	P	-	BA
23	PO	-	-	-	BA

4.4 Métrica de Avaliação das Regras

Neste trabalho foi utilizada a abordagem apresentada por Bruha e Kockova (1993) para avaliar a base de regras modeladas. Esta abordagem originalmente destina-se às atividades de classificação que utilizam aprendizado de máquina para explorar e criar regras de decisão. Durante o processo de classificação de uma entrada através do uso de regras de decisão, três situações podem ocorrer:

1. Se o objeto ainda não observado satisfaz uma ou mais regras da mesma classe, então será atribuído a ele a mesma classe das regras.
2. Se o objeto ainda não observado não está coberto por nenhuma regra, ou seja, o objeto não satisfaz a premissa de nenhuma regra, o mesmo não pode ser avaliado, sendo necessário utilizar alguma metodologia para classificá-lo.

3. Se o objeto satisfaz regras assinadas em classes diferentes, algum critério adicional de seleção deve ser acionado para classificá-lo.

A terceira situação, na qual ocorre a classificação para múltiplas classes não representa um problema para a metodologia adotada neste trabalho. Esta, se interessa pela nota associada à classificação e não às classes. Contudo, estas três situações são bastante úteis se deseja associar a cada regra um numerador que a mensure ou caracterize. A função que representa tais características é chamada de qualidade da regra.

Um conjunto de regras de decisão deve ser confiável e representativa. Esta confiabilidade é caracterizada por um fator de consistência e sua representação por um fator de integridade. O ambiente de decisão da regra R para a classe C pode ser formalmente descrito por uma tabela de contingência 2×2 (BRUHA; KOCKOVA, 1993), conforme apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Tabela de contingência 2x2.

	classe C	classe não C	
regra R cobre	rc	$r\bar{c}$	r
não cobre	$\bar{r}c$	$\bar{r}\bar{c}$	\bar{r}
	c	\bar{c}	K

Onde rc é o número de outorgas que são cobertos pela regra R e pertencente a classe C ; $r\bar{c}$ é o número de outorgas cobertas pela regra e não pertencentes a classe C e, assim por diante; $r = rc + r\bar{c}$ é o número de outorgas cobertas pela regras R ; $c = rc + \bar{r}c$ é o número de outorgas pertencentes a classe C ; e $K = c + \bar{c} = r + \bar{r}$ é o número total de outorgas avaliadas. Utilizando estes elementos da tabela de contingência pode-se definir a consistência e a completude de uma regra R , respectivamente, pelas equações 31 e 32:

$$cons(R) = \frac{rc}{r} \quad (31)$$

$$compl(R) = \frac{rc}{c} \quad (32)$$

Por meio destas duas características, consistência e completude, pode-se combiná-las em um único número, a qualidade da regra. Neste trabalho, a qualidade da regra na soma ponderada da consistência e completude é apresentada na Equação 33 (BERGADANO et al., 1992), na qual w_1 e $w_2 \in (0; 1)$ são pesos definidos pelo usuário, geralmente $w_1 + w_2 = 1$.

$$Quality_{Michalski}(R) = w_1 * cons(R) + w_2 * compl(R) \quad (33)$$

Assim, como em YAILS (TORGO, 1993), os pesos utilizados para avaliar as regras do *Water Balance* não são definidos pelo usuário, mas pelo próprio algoritmo, conforme Equação 34.

$$\begin{aligned}w_1 &= 0.5 + \frac{1}{4} * cons(R) \\w_2 &= 0.5 - \frac{1}{4} * cons(R)\end{aligned}\tag{34}$$

5 RESULTADOS

Este capítulo descreve o processo adotado para avaliar a modelagem proposta neste trabalho. A seção 5.1 descreve todo o processo de criação da base de dados de teste. Em seguida, a seção 5.2 apresenta os resultados obtidos com a execução do subsistema de modelo na base de dados com outorgas da Bacia do Rio Formoso.

5.1 Construção da Base de Dados de Teste

Em decorrência do atraso na implantação do sistema SAD-Outorga, o qual nesta presente data ainda não contém os dados de outorga, enquanto o Naturatins, órgão estadual responsável pela concessão de outorgas, não possui um portal ou sistema de fácil acesso que disponibilize as portarias de concessão das outorgas, não foi possível utilizar os dados das outorgas vigentes para testar a metodologia proposta neste trabalho.

No entanto, os dados de outorgas utilizados para criar a base de dados para teste foram obtidos por meio da parceria realizada com um especialista em gestão hídrica, que forneceu e autorizou a utilização dos dados de algumas portarias de outorgas vencidas. As portarias foram transcritas manualmente e associadas aos dados que se encontram disponíveis no SAD-Outorga e GAN.

Portanto, o processo de requisição dos conjuntos de dados aos sistemas GAN e SAD-Outorga foram realizados, neste primeiro momento, de forma manual. Mesmo em fase de implantação o SAD-Outorga já conta com sua base de dados hidrológica, mantendo informações sobre a capacidade hídrica da Bacia do Rio Formoso, permitindo a criação do primeiro conjunto de dados necessários para a execução do sistema, tabela 5. Em seguida, com as outorgas fornecidas pelo especialista, foi possível a criação do segundo conjunto de dados, tabela 6, que associado ao primeiro conjunto e às captações monitoradas pelo sistema GAN permitiu a criação do terceiro conjunto de dados, apresentado na Tabela 7.

Tabela 5 – Dados sobre a capacidade hídrica.

Variável	Descrição
ID arco	Identificador do arco hidrológico.
curso d'água	Nome do curso d'água que este trecho faz parte.
tipo vazão	Vazão de referência é utilizada para calcular a disponibilidade hídrica do trecho. Exemplo: Q90.
mês	Mês ao qual a vazão outorgável está associada.
vazão outorgável	O quanto de vazão pode ser outorgada neste trecho.
ID jusante	Identificador do próximo trecho localizado à jusante do atual.

O GAN atua como um sistema de monitoramento, disponibilizando dados das captações realizadas pelas outorgas em vigência. Como as outorgas utilizadas neste trabalho

Tabela 6 – Dados sobre as outorgas concedidas.

Variável	Descrição
n° outorga	Número que identifica a outorga concedida.
data vencimento	Data de vencimento da outorga.
tipo captacao	Tipo de captação para o qual a outorga é destinada.
hierarquia de uso	Atividade fim da outorga.
manancial	Nome do rio ao qual a outorga está associada

Tabela 7 – Dados sobre as captações.

Variável	Descrição
n° outorga	Número da outorga concedida.
GAN ID	Identificador da intervenção no sistema GAN.
ID arco referência	Arco hidrológico de referência para realizar o balanceamento.
mês	Mês ao qual o regime de captação está associado
eficiência	Eficiência do sistema de utilização.
regime de captação	Quantos m^3/s podem ser captados

estão vencidas os dados foram associados de forma manual e empírica, utilizando como referência de associação as coordenadas de captação presente nas outorgas e das bombas de captação monitoradas no GAN. Com a ausência do acesso ao processo de outorga das portarias, a eficiência de utilização de água foi associada utilizando como referência a Resolução ANA n.º 707 de 2004, disponibilizada na tabela 8. Ressalta-se que todas as outorgas fornecidas são destinadas à irrigação.

Tabela 8 – Eficiência atribuída a cada tipo de irrigação. Resolução ANA n.º 707/2004.

Tipo de Irrigação	Eficiência de Referência
Inundação	> 50%
Sulcos	> 60%
Aspersão	> 75%
Aspersão por pivô	> 85%
Tubos Perfurados	> 85%
Microaspersão	> 90%
Gotejamento	> 95%

Para uma melhor validação da metodologia, uma base de dados artificial com dados criados aleatoriamente foi desenvolvida. Seu principal objetivo é verificar se a máquina de inferência consegue avaliar qualquer categoria de outorga, mesmo que a mesma apresente valores não realista ou inusitados. Os dados desta base foram criados utilizando o mínimo de parâmetros possível. O conjunto de dados de outorgas, tabela 6, foi gerada preenchendo a data de vencimento, com uma data aleatória variando de 2018 a 2020, a hierarquia de uso utilizou o fator de probabilidade associada a cada tipo, conforme mostrado na Tabela

9, e o número da outorga foi construído por meio da contagem de outorgas concedidas a cada ano (o ano de concessão da outorga é o ano de vencimento menos 3).

Tabela 9 – Probabilidade de seleção para cada tipo de uso

Tipo de Uso	Probabilidade
Irrigação	0,40
Desedenação Animal	0,30
Psicultura	0,15
Outros	0,10
Abastecimento Público	0,05

Cada outorga criada anteriormente foi associada a um conjunto de registro de captação que compõem os dados de captação da Tabela 7. Cada outorga está associada aos meses do ano em que a captação seja permitida. A probabilidade se um meses ter a captação autorizada, e conseqüentemente ser associada a uma outorga, varia conforme o período do ano, sendo de 15% para os meses de agosto a novembro e 60% para os demais meses. Nota-se que outorgas destinadas ao abastecimento urbano devem ter a captação autorizada durante todos os meses do ano.

A eficiência do sistema de uso da água é um valor aleatório que varia conforme o tipo de uso para o qual a outorga está associada, conforme mostrado na Tabela 10. A vazão outorgada é criada utilizando a Distribuição Beta (GUPTA; NADARAJAH, 2004) parametrizada com $\alpha = 3.5$ e $\beta = 5$, conforme pode ser visto na Figura 13a. Como, em geral, as outorgas da Bacia do Rio Formoso variam entre $[0, 2]$ e a distribuição Beta varia entre $[0, 1]$, o valor obtido pela distribuição é multiplicado por 2.

Tabela 10 – Variação da eficiência para cada tipo de uso. Tabela definida em consulta com especialista, visando torná-la a mais fidedigna possível.

Tipo de Uso	Variação
Irrigação	0,5 - 0,95
Dessedentação Animal	0 - 1,0
Piscicultura	0 - 1,0
Outros	0 - 1,0
Abastecimento Público	0,6 - 0,7

Cada outorga também está associada a um identificador fictício que representa a associação com o sistema GAN. Assim, para cada outorga foi gerado um valor fictício de vazão média mensal de captação, que também é calculado por meio da distribuição beta, com α e β iguais a 8, conforme apresentado na Figura 13b. Esses parâmetros são utilizados para forçar uma tendncia de que os valores criados sejam inferiores à vazão outorgada. Para impedir um valor muito baixo de captação, o valor de saída da distribuição Beta

(v_β) é multiplicado pela vazão outorgada (v_o) mais 0.5, que pode ser visto na Equação 35.

$$V_{\text{usada}} = (v_\beta \cdot v_o) + 0.5 \quad (35)$$

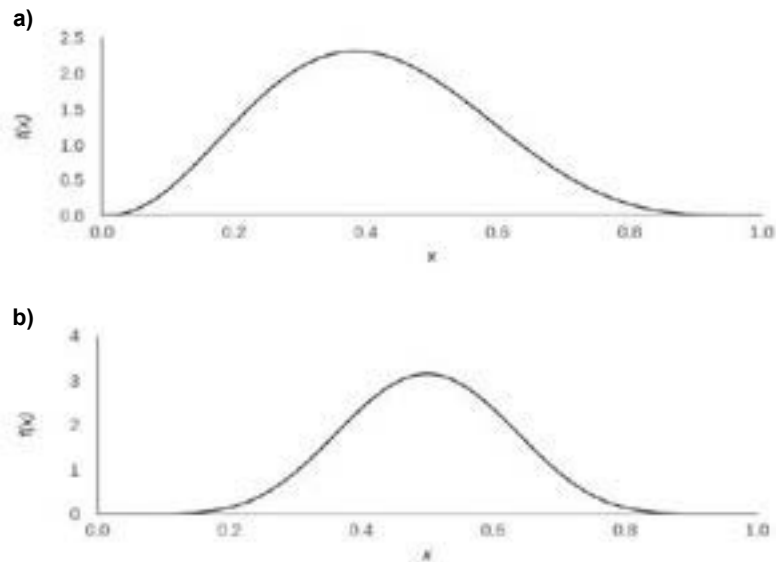


Figura 13 – a) Beta distribuição com $\alpha = 3.5$ e $\beta = 5$. b) Beta distribuição com $\alpha = 8$ e $\beta = 8$.

Ao total foram criados 850 registros diferentes de captações, distribuídos entre as 100 portarias de outorgas criadas, com uma média de 8,5 meses de captação ao ano. A distribuição das vazões outorgadas e captadas, que foram criadas artificialmente pode ser visualizada na Figura 14, no qual 216 registros de captação apresentam uma vazão utilizada superior ao valor outorgado, representando os usuários que não seguem corretamente a outorga.

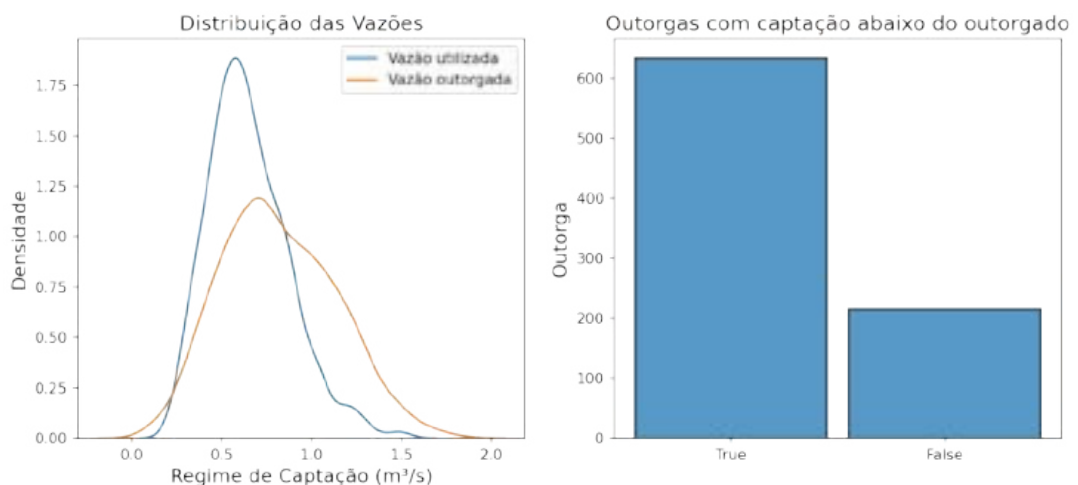


Figura 14 – Esquerda: distribuição das vazões outorgadas e utilizadas. Direita: Número de outorgas com a vazão utilizada inferior a vazão outorgada.

Por outro lado, a base de regras foi construída em parceria com um especialista em gestão de recursos hídricos e a Tabela 3 apresenta todas as regras modeladas. Sua construção foi realizada em etapas, primeiramente desenvolveram-se as regras para classificar as outorgas com prioridade alta (AL), em seguida prioridade média (ME) e, por fim, baixa (BA) prioridade. As regras de baixa prioridade realizam a classificação sem considerar a hierarquia de uso e funcionam de forma complementar as demais classes, ou seja, se uma outorga não for classificada como alta ou média a mesma será classificada como baixa prioridade, garantindo que todas as outorgas sejam avaliadas.

Tabela 11 – Base de regras utilizadas no sistema Water Balance.¹

ID	Antecedentes				Consequente
	Vencimento	Eficiência	Vazão utilizada	Hierarquia de uso	<i>Ranking</i>
1	-	-	-	H	AL
2	MU	-	B	A	AL
3	ME	-	B	A	AL
4	MU	ME	B	I	AL
5	ME	ME	B	I	AL
6	MU	ME	B	P	AL
7	ME	ME	B	P	AL
8	MU	ME	B	O	AL
9	-	EF	B	A	ME
10	MU	BE	B	A	ME
11	ME	BE	B	A	ME
12	-	EF	B	I	ME
13	MU	BE	B	I	ME
14	ME	BE	B	I	ME
15	MU	EF	B	P	ME
16	ME	BE	B	P	ME
17	ME	EF	B	O	ME
18	ME	ME	B	O	ME
19	-	-	P	-	BA
20	-	-	M	-	BA
21	-	BE	-	-	BA
22	-	IN	-	-	BA
23	PO	-	-	-	BA

5.2 Aplicação na Bacia do Rio Formoso

Os principais rios que compõem a Bacia do Rio Formoso são o Urubu, Dueré, Xavante e o próprio Rio Formoso. Conforme apresentado na Figura 15, cada um destes rios possui, localizado próximo a sua foz, uma estação telemétrica de referência utilizada para monitorar a disponibilidade hídrica da bacia. Para realizar os testes foram selecionados

¹O dicionário com o significado da sigla dos conjunto *fuzzy* está apresentado na Tabela 2 da seção 4.3

arcos de referência para o balanceamento, que foram escolhidos utilizando as estações como referência. Portanto, arcos localizados na foz dos principais rios da bacia foram utilizados como arcos hidrológicos de referência para balancear as outorgas. A lista de arcos utilizados pode ser visualizada na Tabela 12.

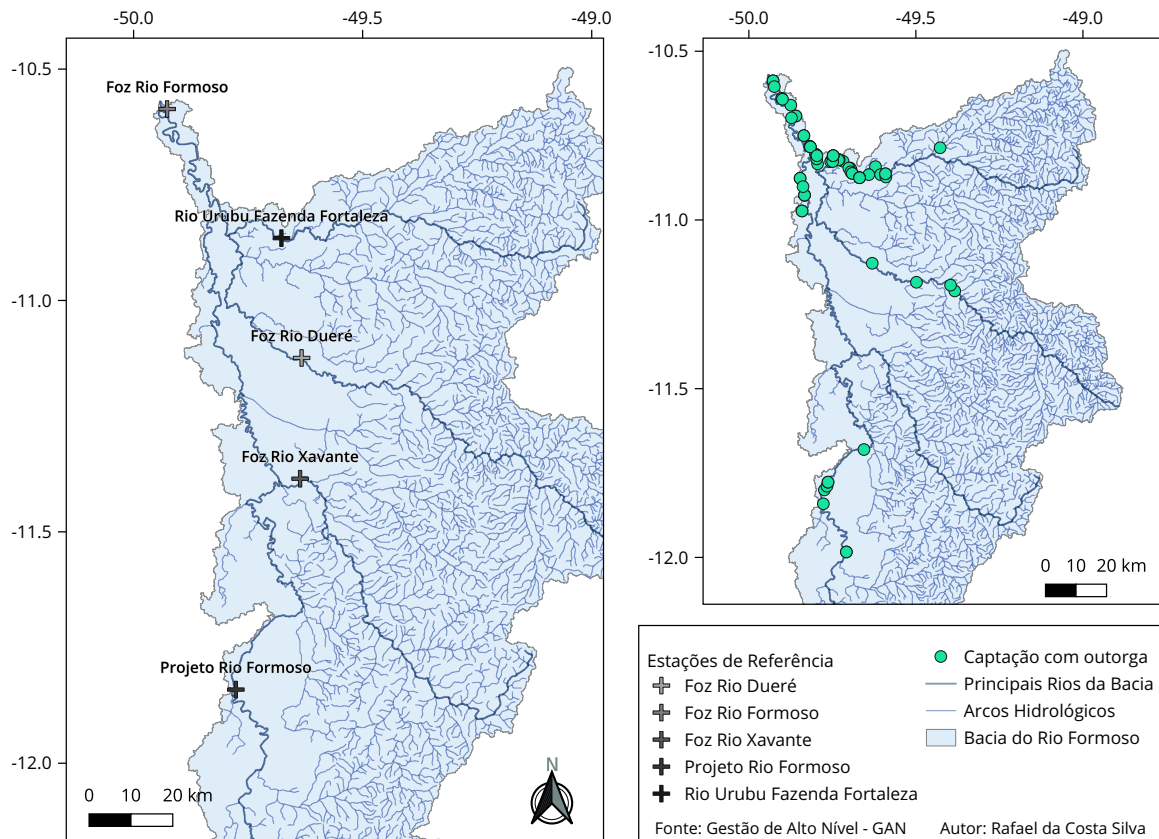


Figura 15 – Bacia do Rio Formoso com seus principais rios, estações de referência e captações utilizadas neste trabalho.

Tabela 12 – Arcos hidrológicos de referência.

Arco ID	Descrição	Foz
138504	Foz do Rio Dueré	X
139105	Foz do Rio Xavante	X
138425	Urubu sem afluente do rio Dueré	
135884	Foz da Bacia do Rio Formoso	X
135883	Foz do Rio Urubu	X
139134	Formoso sem afluente do rio Urubu	
140051	Formoso sem afluente do rio Xavante (Projeto Rio Formoso)	

Para avaliar a capacidade de avaliação das regras modeladas os testes foram realizados nas duas bases de dados, uma com dados criados artificialmente e outra desenvolvida por meio das outorgas cedidas. Ambas as avaliações utilizaram como arco de referência a foz do rio Urubu, arco 135883, abrangendo todas as captações presentes no rio Urubu e

Dueré. Inicialmente, espera-se que a base das outorgas cedidas apresente avaliações com notas baixas, por se tratarem de outorgas vencidas ao longo dos últimos 5 anos e as vazões de captação monitoradas pelo GAN, em geral, são superiores às vazões outorgadas.

Conforme observado na Tabela 13, assim como esperado todas as outorgas foram avaliadas com valores entre 0 e 0,2, independente do mês de análise, mostrando que, assim como esperado, o modelo desenvolvido classificou as outorgas como baixa prioridade. Ao mesmo tempo, nenhuma outorga foi classificada como boa, o que indica a necessidade de aumentar ou flexibilizar as regras da classe de prioridade mediana.

Analisando o teste por meio da qualidade das regras nesta avaliação, figura 16, identificou-se que somente as últimas 4 (quatro) regras foram acionadas durante a avaliação, sendo que as regras 19, 22 e 23 apresentam uma qualidade média superior a 0,9, regras que estão associadas respectivamente a outorgas com captações abaixo do outorgado, sistemas de usos ineficiente e com data de vencimento próxima ou expirada. Já as regras 20 e 21 possuem uma qualidade média inferior, variando entre 0,5 e 0,6, e estão associadas a uma captação acima do outorgado e a um sistema de uso de baixa eficiência, como o caso da irrigação por inundação. Ressalta-se que a irrigação por inundação corresponde a maioria das outorgas presente na base. Logo, por meio da qualidade das regras, pode-se verificar que o sistema realizou uma avaliação correta das outorgas, uma vez que as regras acionadas refletem suas características.

Tabela 13 – Avaliação das outorgas do Rio Urubu - 135883

Mes	Avaliações					Total
	(0.0, 0.2]	(0.2, 0.4]	(0.4, 0.6]	(0.6, 0.8]	(0.8, 1]	
Jan	28	0	0	0	0	28
Fev	28	0	0	0	0	28
Mar	25	0	0	0	0	25
Abr	20	0	0	0	0	20
Mai	27	0	0	0	0	27
Jun	27	0	0	0	0	27
Jul	26	0	0	0	0	26
Ago	15	0	0	0	0	15
Set	5	0	0	0	0	5
Out	9	0	0	0	0	9
Nov	24	0	0	0	0	24
Dez	28	0	0	0	0	28

Realizando este mesmo teste com dados criados artificialmente obtiveram-se avaliações mais distribuídas, conforme pode ser visto na Tabela 14. O número de outorgas avaliadas entre 0,4 e 0,6 foi cerca da metade das avaliadas entre 0 e 0,2. Além disso, 3 (três) meses do ano apresentou uma outorga avaliada com alta prioridade, tendo uma avaliação entre 0,8 e 1. Por se tratar de dados criados aleatoriamente, espera-se que a maioria das outorgas sejam avaliadas como ruins, algumas como medianas e poucas como

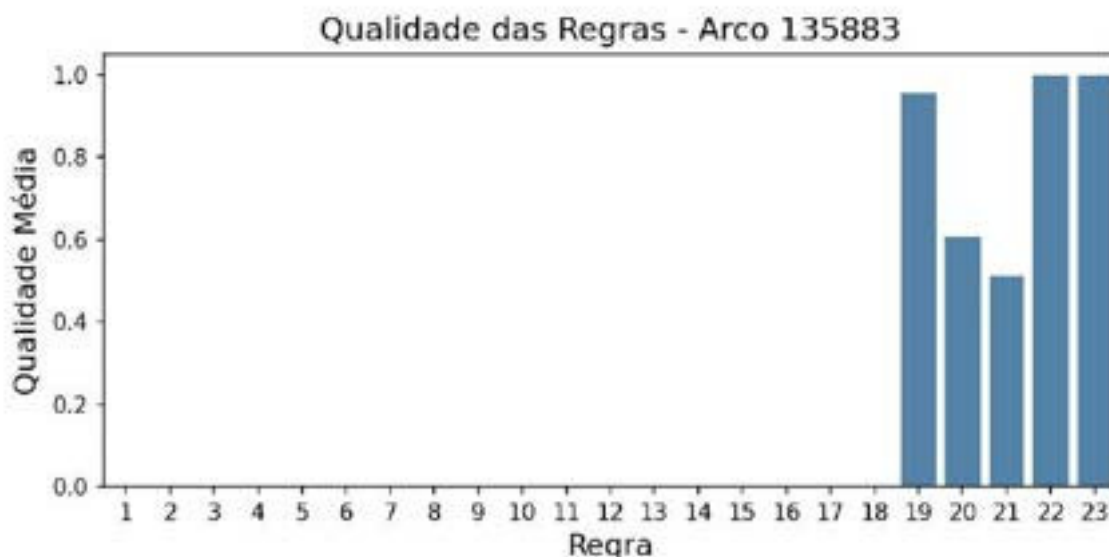


Figura 16 – Qualidade das regras na avaliação das outorgas do rio Urubu.

ótimas.

Outro fator que contribui para uma avaliação mais distribuída é a existência dos diferentes tipos de uso da água, aumentando o número de regras passíveis para ativação, enquanto a base de outorgas cedidas pelo especialista contém somente outorgas destinadas à irrigação. Em consequência de avaliações mais distribuídas, conforme pode ser observado na Figura 17, a qualidade das regras também apresenta uma tendência de distribuição com regras da classe alta e média prioridade sendo ativadas. Enquanto se percebe uma discrepância entre a qualidade das regras da classe de prioridade baixa com as demais.

Tabela 14 – Avaliação das outorgas artificiais do Rio Urubu - 135883.

Mes	Avaliações					Total
	(0.0, 0.2]	(0.2, 0.4]	(0.4, 0.6]	(0.6, 0.8]	(0.8, 1]	
Jan	31	1	15	0	1	48
Fev	34	2	11	0	0	47
Mar	33	3	11	0	0	47
Abr	27	2	14	1	1	45
Mai	31	3	14	0	0	48
Jun	31	2	15	0	0	48
Jul	32	3	9	0	0	44
Ago	14	1	8	0	0	23
Set	17	1	6	0	0	24
Out	9	2	4	0	0	15
Nov	19	2	5	0	1	27
Dez	30	3	9	0	0	42

Em ambos os testes executados ocorre a existência de regras que não foram acionadas, mostrando a necessidade de realizar a troca destas por regras que sejam mais

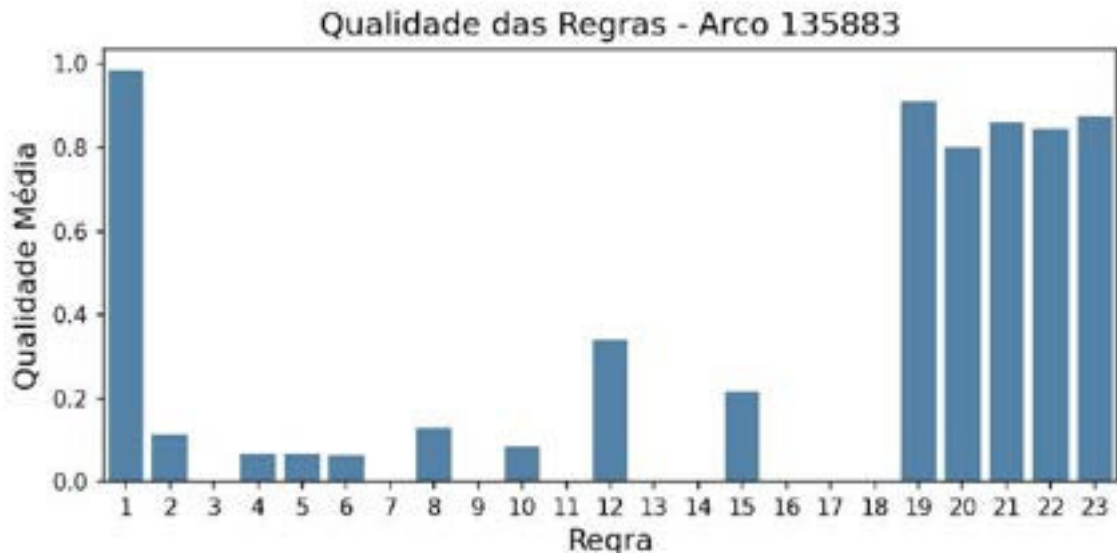


Figura 17 – Qualidade das regras na avaliação das outorgas artificiais do rio Urubu.

representativas do modelo. Mesmo com estas regras não representativas pode-se observar que o algoritmo possui a capacidade de avaliar as outorgas, visto que, em ambos os testes, a qualidade das regras foi capaz de representar as características das outorgas avaliadas, tornando os resultados dentro do esperado, ou seja, a base de outorgas cedidas apresentou avaliações concentradas na classe de baixa prioridade, decorrente da data de vencimento e captações acima do valor outorgado, e a base artificial com avaliações mais distribuídas devido ao fator de aleatoriedade atribuído.

6 CONCLUSÃO

Para gestores é de suma importância utilizar sistemas de apoio à decisão, pois tal ferramenta pode agrupar, organizar e adicionar informações que auxiliam na resolução de problemas. Na área de recursos hídricos, essa necessidade também se mostra presente devido à complexidade dos sistemas e ao grande número de informações que precisam ser monitoradas, dificultando a tomada de decisão sem o auxílio de ferramentas. A fim de suprir esta necessidade o sistema de apoio à decisão *Water Balance* foi elaborado utilizando como metodologia a estrutura padrão de um SAD com a arquitetura de um sistema especialista *fuzzy*, o que se mostrou eficiente para realizar a avaliação de outorgas.

Esta metodologia tem como vantagem a sua simples implementação, já que o sistema é composto por poucos módulos, sua base de conhecimento pode ser ajustada de forma a não impactar o funcionamento dos outros módulos e utiliza poucos parâmetros de configuração. Além disso, permite que o sistema atue em qualquer bacia hidrográfica com uma base de conhecimento representando suas características e legislações. Caso a base não seja representativa o suficiente, o sistema apresentará avaliações enviesadas ou não será capaz de avaliar determinadas outorgas. Logo, a construção de uma boa base de conhecimento deriva de um processo constante de manutenção e atualização.

Para um gestor que se encontra em situação de conflito por recursos hídricos, a utilização do *Water Balance* permite a realização de acordos entre os empreendimentos, de forma que as perdas e a redução da vazão disponível para captação sejam distribuídas de forma justa, considerando critérios previamente acordados. Como a qualidade da outorga é avaliada, isto incentiva que os usuários sigam as regulamentações impostas pelos órgãos gestores, com a penalidade de sofrerem uma maior redução em casos de conflitos.

Assim, o sistema *Water Balance* cumpre seu objetivo de possibilitar o balanceamento de uma região hídrica em conflito por meio da avaliação da outorga com base em critérios previamente selecionados por gestores ou especialistas. Ele também é capaz de se atualizar em conjunto com a legislação vigente em cada bacia hidrográfica. Por fim, para os usuários, ele se torna uma ferramenta imparcial de avaliação qualitativa de suas outorgas, evitando que os bons usuários de água recebam a mesma redução que os piores usuários, o que incentiva a realização da devida manutenção de outorga, enquanto aumenta sua confiança com o órgão gestor.

Como trabalhos futuros destaca-se a finalização do desenvolvimento completo do sistema e sua implantação após a etapa de revisão de outorgas da Fase D do projeto Gestão de Alto Nível (GAN), desta forma será possível validar a base de conhecimento do sistema de maneira mais consistente, além de possibilitar a adição de novos critérios e informações ao sistema.

REFERÊNCIAS

- ABRAHAM, A. Rule-based expert systems. **Handbook of measuring system design**, Wiley Online Library, 2005.
- ANA, A. N. de Á. **Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos**. [S.l.]: Agência Nacional de Águas - ANA Brasília, 2013.
- ANA, A. N. de Água. **Região Hidrográfica Tocantins-Araguaia**. 2019. <<https://www.ana.gov.br/as-12-regioes-hidrograficas-brasileiras/tocantins-araguaia>>. Último acesso em 14/11/2019.
- ANA, A. N. de Águas. **Fortalecimento dos entes do SINGREH**. 2021. <<https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/fortalecimento-dos-entes-do-singreh>>. Último acesso em 09/02/2021.
- BELLMAN, R. E.; ZADEH, L. A. Decision-making in a fuzzy environment. **Management science**, INFORMS, v. 17, n. 4, p. B-141, 1970.
- BERGADANO, F. et al. Learning two-tiered descriptions of flexible concepts: The poseidon system. **Machine Learning**, Springer, v. 8, n. 1, p. 5-43, 1992.
- BRAGA, B.; BARBOSA, P. S. F.; NAKAYAMA, P. T. Sistemas de suporte à decisão em recursos hídricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 3, p. 73-95, 1998.
- BRUHA, I.; KOCKOVA, S. Quality of decision rules: Empirical and statistical approaches. **Informatica**, v. 17, p. 233-243, 1993.
- CHERKASSKY, V. Fuzzy inference systems: a critical review. In: **Computational Intelligence: Soft Computing and Fuzzy-Neuro Integration with Applications**. [S.l.]: Springer, 1998. p. 177-197.
- COLLISCHONN, B. Sistema de apoio à decisão para outorga de direito de uso de recursos hídricos. 2014.
- DUBOIS, D.; PRADE, H. What are fuzzy rules and how to use them. **Fuzzy sets and systems**, Elsevier, v. 84, n. 2, p. 169-185, 1996.
- FILHO, N. L. et al. Caracterização dos usuários de água da bacia hidrográfica do rio formoso - to. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 12, n. 2, 2015.
- GUPTA, A. K.; NADARAJAH, S. Mathematical properties of the beta distribution. **STATISTICS TEXTBOOKS AND MONOGRAPHS**, MARCEL DEKKER AG, v. 174, p. 33-54, 2004.
- HEINZLE, R.; GAUTHIER, F. A. O.; FIALHO, F. A. P. Semântica nos sistemas de apoio a decisão: o estado da arte. **Revista da UNIFEPE**, v. 1, n. 8, p. 225-248, 2017.

- HORA, A. **Metodologia para outorga do uso de recursos hídricos com ênfase no caso de aproveitamentos hidrelétricos**. 2001. 256 f. Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia de Produção)—Universidade Federal . . . , 2001.
- IAC/UFT, I.; NATURATINS, I. **SAD - Outorga: Manual de Usuário**. 2019.
- JÚNIOR, J. de S. P. **Recursos Hídricos - Conceituação, Disponibilidade e Usos**. [S.l.]: Brasília: Consultoria Legislativa. Câmara dos Deputados, 2004.
- KARNIB, A. An approach to elaborate priority preorders of water resources projects based on multi-criteria evaluation and fuzzy sets analysis. **Water resources management**, Springer, v. 18, n. 1, p. 13–33, 2004.
- LANZILLOTTI, R.; LANZILLOTTI, H.; SINTZ, C. Lógica fuzzy-uma abordagem para reconhecimento de padrão. **PACO EDITORIAL**, 2014.
- LANZILLOTTI REGINA SERRÃO; LANZILLOTTI, H. S. **Lógica Fuzzy: uma Abordagem Para Reconhecimento de Padrão**. [S.l.]: Paco Editorial, 2014. ISBN 978-85-8148-531-7.
- LAUDON, K. C.; LAUDON, J. P. **Gerenciamento de sistemas de informação**. [S.l.]: LTC, 2001.
- LEONDES, C. T. **Fuzzy Logic and Expert Systems Applications (Neural Network Systems Techniques and Applications)**. 1st. ed. [s.n.], 1997. ISBN 9780080553191,9780124438668,0124438660. Disponível em: <<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=e759e6119c4439d2a564e9dfb9ea2bd2>>.
- MAMDANI, E. H. Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers. **International Journal of Man-Machine Studies**, Elsevier, v. 8, n. 6, p. 669–678, 1976.
- MARQUES, F. de A. et al. **Plano do Biênio 2018-2019**. 2018.
- MARQUES, F. de A. et al. Aquora—sistema multi-usuário para gestão de recursos hídricos. 2009.
- NATURATINS, I. N. do T. **Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Formosa**. 2019. <<https://naturatins.to.gov.br>>. Último acesso em 14/11/2019.
- OLIVEIRA, C. U. R. de; ZEILHOFER, P. Sistema de suporte à decisão baseado em lógica fuzzy para outorga de recursos hídricos superficiais. In: SBC. **Anais do VIII Workshop de Computação Aplicada a Gestão do Meio Ambiente e Recursos Naturais**. [S.l.], 2017.
- O'HAGAN, M. A fuzzy decision maker. **Proc. Fuzzy Logic**, Citeseer, v. 93, 1993.
- PEREIRA, M.; KAYSER, R. B.; COLLISCHONN, W. Integração do modelo hidrológico para grandes bacias mgb-iph e sistemas de informação geográfica para suporte à decisão de outorga de direito de uso da água. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 9, n. 2, p. 21–33, 2012.
- PORTO, M. F.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos avançados**, SciELO Brasil, v. 22, n. 63, p. 43–60, 2008.