

METODOLOGIA MULTIOBJETIVO E MULTICRITÉRIO DE AUXÍLIO À OUTORGA DE RECURSOS HÍDRICOS

A multiobjective and multicriteria methodology for support to the process of concession of water use rights

Diego Reyes¹ , Oscar de Moraes Cordeiro Netto² , Welitom Ttatom Pereira da Silva^{3,4} ,
Marco Antonio Almeida de Souza¹ 

¹Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília – UnB, Brasília, DF, Brasil. E-mails: diegoalonsoreyes@gmail.com, marcantoniosouza@gmail.com

²Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília – UnB, Brasília, DF, Brasil. E-mail: cordeiro@unb.br

³Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal do Mato Grosso – UFMT, Cuiabá, MT, Brasil. E-mail: welitom@ufmt.br

⁴Programa de Pós-graduação em Biodiversidade e Biotecnologia da Rede BIONORTE – PPG-BIONORTE, Instituto de Química, Universidade Federal do Mato Grosso – UFMT, Cuiabá, MT, Brasil.

Como citar: Reyes, D., Cordeiro Netto, O. M., Silva, W. T. P., & Souza, M. A. A. (2025). Metodologia multiobjetivo e multicritério de auxílio à outorga de recursos hídricos. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 22, e3. <https://doi.org/10.21168/rega.v22e3>

RESUMO: Foi proposta uma metodologia de auxílio à outorga de direito de uso da água, utilizando métodos multiobjetivo e multicritério, e sua aplicação à bacia do rio Preto. A bacia foi dividida em cinco zonas, e nelas foram identificadas as demandas e as disponibilidades hídricas. Foram definidos oito diferentes cenários de desenvolvimento da bacia, levando em consideração aspectos como a localização dos irrigantes na bacia, o tipo de irrigante, e sua taxa de crescimento. Das entrevistas com especialistas, estabeleceram-se sete critérios, abrangendo aspectos ambientais, sociais, técnicos e econômicos. Esses critérios foram avaliados com a utilização de SIG e balanço hídrico pelo Acquanet. Foram aplicados três métodos multiobjetivo (*Compromise Programming* - CP, PROMÉTHÉE-II e TOPSIS) a quatro diferentes conjuntos de pesos, definidos por consulta à especialistas e simulando “políticas” para orientar o processo de outorga na bacia do rio Preto. As “políticas” priorizaram os aspectos social, ambiental, e econômico, além de uma “política neutra”, com todos os pesos iguais. Os resultados para as diferentes “políticas” foram normalizados, a fim de se obter uma classificação agregada e estabelecer o cenário de outorga a ser implementado na bacia. A metodologia possibilitou definir uma política de outorga que considera os conflitos, e se articula com políticas sociais.

Palavras-chave: Análise de Decisão Multiobjetivo; Métodos Multicriteriais; Outorga de Recursos Hídricos; Alocação de Água.

ABSTRACT: We proposed a methodology to assist in the granting of water use rights, using multi-objective and multicriteria methods, and its application to the Preto River basin. We divided the basin into five zones, and we identified water demands and availability in them. We defined eight different development scenarios for the basin, taking into account aspects such as the location of irrigators in the basin, the type of irrigator, and their growth rate. From the interviews with experts, we established seven criteria, covering environmental, social, technical, and economic aspects. We evaluated these criteria using GIS and water balance using Acquanet. We applied three multi-objective methods (*Compromise Programming* - CP, PROMÉTHÉE-II, and TOPSIS) to four different sets of weights, defined by consulting experts and simulating “policies” to guide the granting process in the Preto River basin. The “policies” aimed to give priority to social, environmental, and economic aspects, in addition to a “neutral policy,” with all weights equal. The results for the different “policies”, after being normalized, produced an aggregated classification and established the concession scenario to be implemented in the basin. The methodology made it possible to define a water granting policy capable of considering conflicts and articulated with social policies.

Keywords: Multi-objective Decision Analysis; Multi-criteria Methods; Granting of Water Resources; Water Allocation.

Recebido: Outubro 29, 2024. Revisado: Fevereiro 20, 2025. Aceito: Fevereiro 21, 2025.



Este é um artigo publicado em acesso aberto (*Open Access*) sob a licença *Creative Commons Attribution*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

INTRODUÇÃO

Não faz muito tempo em que a otimização da distribuição dos usos da água era um tema considerado de pouca importância, já que era muito comum achar que a água era um recurso ilimitado. Mas, com o aumento populacional, os recursos hídricos começaram a diminuir e a não satisfazer as demandas da sociedade, criando-se conflitos entre os diferentes setores de usuários, não só pela quantidade de água para o abastecimento, como também pelos seus diferentes usos. Diante disso, fez-se necessário o desenvolvimento de políticas que gerenciassem os recursos hídricos. Como resposta a esta necessidade, no Brasil foram formuladas políticas para a gestão dos recursos hídricos, tais como a lei federal 9433/97 (Brasil, 1997), pela qual as águas passaram a ser consideradas como um recurso natural limitado e dotado de valor econômico. Dos instrumentos de gestão estabelecidos pela Política Nacional de Recursos Hídricos, o instrumento de outorga se apresenta como um dos mais importantes, pois, mediante a sua aplicação, é garantido o acesso à água em quantidade e qualidade necessárias. Mas, mesmo sendo um instrumento eficiente, a outorga ainda apresenta alguns desafios a serem vencidos, sejam nos aspectos teóricos e de concepção, ou nos aspectos de operacionalização dos sistemas de outorga. Entre esses desafios podem ser citados: inexistência de dados fluviométricos nas bacias, desconhecimento sobre usuários e respectivas demandas, dificuldades na definição dos sistemas de outorga dos recursos subterrâneos, falta de metodologias que integrem aspectos qualitativos e quantitativos, dificuldades na definição da vazão máxima outorgável (Ribeiro & Lanna, 2003). O último desafio citado é exatamente o tema deste trabalho, que procura encontrar uma metodologia para conhecer quais são as vazões máximas outorgáveis, levando em consideração aspectos tão diversos como os econômicos, ambientais e políticos. Como essas considerações são de difícil abordagem, devido a sua heterogeneidade, propôs-se aplicar uma técnica multiobjetivo e multicritério para poder oferecer uma solução para o problema de maneira completa, sem desprezar nenhum dos aspectos citados.

A outorga de recursos hídricos deve ser vista como instrumento de alocação de água entre os mais diversos usos dentro de uma bacia hidrográfica. Segundo a ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2011), “a análise da outorga deve objetivar o alcance de alguns itens mínimos, como o atendimento das necessidades ambientais, econômicas e sociais por água; a redução ou eliminação dos conflitos entre usuários da água; e a possibilidade de que as demandas futuras também sejam atendidas”.

Já a alocação de recursos hídricos deve considerar os aspectos quantitativos, qualitativos, o uso racional e a distribuição temporal e espacial da água (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2011). Para isso, devem ser avaliadas questões técnicas relacionadas à hidrologia, hidráulica e qualidade da água, questões legais tratando de competências, direitos e responsabilidades dos usuários, bem como questões políticas referentes a acordos entre setores usuários e governos para o desenvolvimento sustentável da bacia e a articulação institucional (Cardoso da Silva & Monteiro, 2004).

Antes de prosseguir, é interessante mostrar as diversas abordagens que foram propostas para resolver o problema de alocação de água. Segundo He et al. (2019), os métodos de simulação de alocação de recursos hídricos podem ser divididos em três categorias: (1) simulação pura; (2) simulação baseada em regras; e (3) simulação baseada em otimização. Contudo, para usar corretamente a terminologia, deve-se acrescentar uma quarta categoria de métodos para alocação de água, que são os métodos multiobjetivo e multicritério, baseados no Ótimo de Pareto (e não propriamente de otimização pura); e uma quinta categoria de métodos, baseada em expert systems, redes neurais, algoritmos evolucionários, e inteligência artificial.

O método de simulação pura é estabelecido para funções apropriadas entre elementos do sistema hídrico com base em dados detalhados. As vantagens da simulação pura são a alta precisão e a proximidade do processo real. Contudo, problemas de médio e longo prazo não podem ser resolvidos por este método.

A solução pretensamente “ótima” de alocação de água pode ser extraída através do método de simulação baseado em otimização; entretanto, é muito comum surgirem problemas em que a otimização pode não ter solução viável.

O método da simulação baseada em regras, que adota regras definidas pelo usuário para definir o comportamento do objeto, é aplicável ao tipo de problema de alocação de recursos hídricos. No entanto, a simulação baseada em regras só é aplicável quando se conta com um pequeno número de especialistas altamente qualificados. Por isso, em muitos casos, torna-se necessária a complementaridade entre as abordagens da simulação baseada em regras e da baseada em otimização ou em método multiobjetivo-multicritério (He et al., 2019).

Vários estudos foram realizados para encontrar uma solução para problemas de alocação de recursos hídricos. Kralisch et al. (2003) propuseram um método de redes neurais para resolver o problema de alocação entre água urbana e água agrícola. Um software com um modelo de alocação de

recursos (denominado REALM) foi utilizado por Perera et al. (2005) para estabelecer uma ferramenta de tomada de decisões sobre alocação e gestão de recursos hídricos. Babel et al. (2005) desenvolveram um modelo para alocação ótima de água de um reservatório que transforma um problema multiobjetivo que considera aspectos ambientais, socioeconômicos e técnicos, em uma abordagem mono-objetivo resolvida por programação linear. Abolpour et al. (2007) adotaram um método adaptativo de aprendizagem por reforço neurodifuso para aumentar a precisão dos parâmetros otimizados no modelo de alocação de recursos hídricos. Wang et al. (2008) criaram um modelo de alocação de direitos de água para resolver o problema do mercado de água, gestão de políticas e comércio de direitos de água. You et al. (2011) idealizaram um modelo de alocação de água baseado no controle do sistema natural de “evaporação-transpiração” de água na bacia hidrográfica; esse modelo foi aplicado à bacia do Rio Haihe, na China, como um estudo de caso. Prasad et al. (2011) utilizaram um método de programação linear para encontrar o modelo ideal de planejamento de irrigação, considerando vários estágios de crescimento das culturas na alocação de recursos hídricos. Andrade (2012) desenvolveu um modelo matemático multiobjetivo capaz de integrar diferentes objetivos e tem como ideia central minimizar o custo para manutenção da qualidade do corpo receptor, sem deixar de buscar maximização da melhoria, em termos dos parâmetros oxigênio dissolvido e demanda bioquímica de oxigênio, buscando, ainda, maior equidade entre usuários. Dai & Li (2013) construíram um modelo de alocação de água para irrigação em vários estágios, atendendo políticas de alocação de água em diferentes estações do ano. Xuan et al. (2012) estruturaram um modelo de otimização da alocação de água baseado na segurança dos recursos hídricos, utilizando programação linear que considera benefícios ecoambientais e socioeconômicos; esse modelo foi aplicado à bacia do rio Zhangjiakou, na China, para melhorar os benefícios dos usos da água. Machado et al. (2012) realizaram a otimização da alocação da água através de um algoritmo evolucionário multiobjetivo (*Strentgh Pareto Evolutionary Algorithm 2 - SPEA2*), ao qual foram inseridas adaptações e operadores de reprodução desenvolvidos para incorporar as restrições do problema e contornar os obstáculos apresentados. Urtiga et al. (2013) utilizaram a teoria dos jogos cooperativos, mais precisamente a Solução de Barganha de Nash e Solução de Kalai-Smorodinsky, para resolver um problema de alocação de água. Um modelo de otimização estocástica em vários estágios foi proposto por Li & Guo (2014) para resolver o problema de planejamento de recursos hídricos agrícolas. Read et al. (2014) propuseram um modelo de alocação de recursos hídricos para discutir a alocação ideal e o problema da estabilidade social. Costa et al. (2014) aplicaram o algoritmo evolucionário multiobjetivo SPEA2 para alocação de água como suporte à negociação da repactuação da outorga em bacias hidrográficas com vazões outorgáveis insuficientes para a demanda, usando como exemplo a bacia do Rio Gramame. Um modelo de alocação de água em dois estágios foi utilizado por Li et al. (2017) para simular as necessidades de água de irrigação de múltiplas culturas em áreas de grande escala. He et al. (2019) apresentaram um modelo para alocação de água baseado na Teoria de Prospecto (segundo Kahneman & Tversky, 1979), empregada para analisar o comportamento de especialistas altamente treinados frente a esse problema decisório; esse modelo foi aplicado à bacia do Rio Wuyur, no nordeste da China. Lin et al. (2020) construíram um modelo de simulação da alocação de recursos hídricos baseado em regras e utilizando programação orientada a objetos (POO). Na construção do modelo, foram usados conjuntos de regras básicas, de regras conceituais, e de regras operacionais; esse modelo foi utilizado na bacia do Rio Haihe, na China. Noori et al. (2021) aplicaram três diferentes abordagens para a alocação de recursos hídricos na bacia do Rio Tajan, no Iran, usando o Modelo Baseado em Agentes, a técnica de Algoritmos Genéticos, e o método multiobjetivo baseado na Teoria dos Jogos Cooperativos. Vichete et al. (2023) criaram o modelo para otimização do processo de decisão de alocação de recursos hídricos, que denominaram *AcquaNetGIS*, que usa uma combinação de escala de prioridades com otimização hidroeconômica, sem considerar a curva de benefícios marginais de demanda de água; esse modelo foi aplicado ao sistema de transposição da bacia do Rio São Francisco, no Brasil.

Diante dessas abordagens, a presente pesquisa propôs a utilização de uma metodologia que possibilita a incorporação de critérios econômicos, sociais, ambientais e técnicos, para realizar a análise multiobjetivo e multicritério que possibilite o auxílio à outorga de recursos hídricos. Mediante a seleção de três métodos multiobjetivo-multicritério, PROMÉTHÉE, TOPSIS e Programação por Compromisso - CP, foram avaliados oito possíveis cenários de desenvolvimento da bacia hidrográfica do rio Preto, com a finalidade de encontrar a melhor política de outorga a ser implementada na bacia. Nessa avaliação, foram empregados sete diferentes critérios.

Dessa forma, sendo mais específico, o objetivo geral deste trabalho foi o de desenvolver uma metodologia de auxílio à outorga de recursos hídricos utilizando métodos multiobjetivo e multicritério, e aplicar esta metodologia à bacia hidrográfica do rio Preto. Puderam ser discernidos os seguintes objetivos específicos: (1) estabelecer princípios e condicionantes para uma metodologia de alocação de

água com o propósito de instituir uma política de outorga na bacia do rio Preto; (2) encontrar critérios que possam descrever o problema de alocação de água na bacia do rio Preto; e (3) aplicar métodos multiobjetivo e multicritério para determinar o melhor cenário de outorga de direitos de uso da água para a bacia do rio Preto.

METODOLOGIA

A Figura 1 apresenta um resumo das etapas do desenvolvimento da pesquisa.

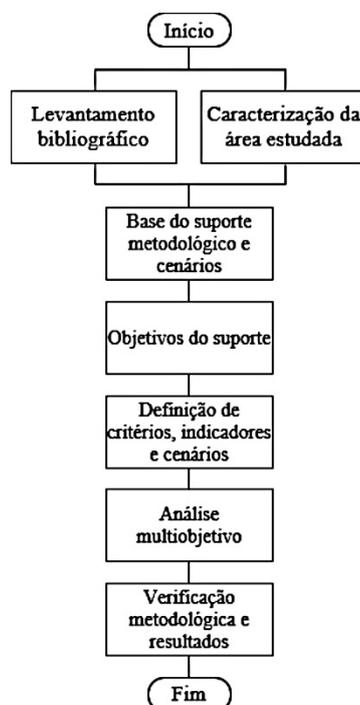


Figura 1: Etapas realizadas no desenvolvimento metodológico da pesquisa. Fonte: os autores

Na sequência, é apresentada uma breve descrição das etapas da metodologia utilizada na pesquisa.

O levantamento bibliográfico incluiu quatro temas principais: processo de alocação de água, sistemas de apoio a decisão, representação de sistemas hídricos, e uso da água em irrigação.

Para caracterização da área estudada, as informações foram extraídas, em sua maior parte, do trabalho apresentado pelo consórcio GOLDER/FAMA à Secretaria de Estado de Infraestrutura e Obras do Distrito Federal como resultado da consultoria técnica 001/2002-SO/DF, que resultou na elaboração do Plano de Gerenciamento Integrado dos Recursos Hídricos do Distrito Federal – PGIRH/DF (Distrito Federal, 2006). Para a bacia do rio Preto, as principais características e informações disponíveis, tais como dados fluviométricos e pluviométricos, cadastro de usuários, demandas, usos prioritários, determinação das áreas irrigadas e disponibilidade hídrica, foram usadas com o fim de criar um mapa de informações da área de estudo.

Com estas bases (levantamento bibliográfico e caracterização da área de estudo), foram definidos os objetivos que se buscaram atingir. Para isso foram identificados macro-objetivos ambientais, sociais, técnicos e econômicos. Uma vez identificados os macro-objetivos, foram definidos critérios que tiveram a capacidade de representar esses objetivos. Por meio de entrevista com especialistas da ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico), foram definidos os indicadores, com o fim de quantificar e medir os critérios, identificar tendências, e de obter uma representação mais exata das situações de outorga máxima propostas.

Paralelamente com a definição de critérios e indicadores, foram estabelecidos cenários prováveis de desenvolvimento da bacia levando em consideração fatores como o crescimento dos irrigantes, a sua localização na bacia, e o tipo de irrigante.

Para representação do sistema de recursos hídricos foi empregado um modelo de otimização e simulação mediante redes de fluxo denominado AcquaNet (Porto et al., 2003), devido a sua facilidade de uso. Com o fim de conhecer o balanço hídrico na bacia, isto é, as diferentes vazões consumidas pelos

diferentes tipos de usuários, e poder avaliar os indicadores para cada um dos cenários propostos, foi realizado o balanço hídrico para cada um dos cenários mediante o uso do programa AcquaNet.

Para realizar o citado balanço hídrico, a bacia do rio Preto foi dividida em zonas de estudo e para cada zona de estudo foram representadas as diferentes demandas existentes para cada cenário proposto. A bacia foi representada no modelo AcquaNet mediante uma rede de fluxo, mudando as prioridades de atendimento de acordo as políticas definidas para cada cenário.

Uma vez determinado o balanço hídrico de cada cenário, foram avaliados os diferentes indicadores propostos para os critérios, com o fim de obter a matriz de consequências (*pay-off matrix*) para todos os cenários versus todos os critérios.

Na sequência, assim, foi determinada a matriz de consequências, onde foi definida a pontuação dos indicadores de todos os cenários participantes em relação aos critérios de decisão. Tal pontuação representa a eficiência de cada cenário no cumprimento de cada critério. Note-se que os critérios escolhidos foram todos tangíveis e mensurados na bacia, portanto não dependentes de preferências de atores.

O peso de cada um desses critérios (por conseguinte, desses indicadores) foi definido levando em consideração a visão do outorgante, para o caso do rio Preto, por ser uma bacia que compreende áreas em diferentes estados. A definição dos pesos dos indicadores foi realizada por meio de entrevista com especialistas da ANA.

Uma vez obtida a matriz de consequências e os pesos dos critérios, foram aplicados três diferentes métodos de análise de decisão multiobjetivo (*Compromise Programming* - CP, PROMÉTHÉE-II e TOPSIS), com o fim de estabelecer os cenários ótimos de outorga máxima, assim como a sua hierarquização. Cada um desses métodos de análise multiobjetivo, baseia-se em uma abordagem diferente do ótimo de Pareto, para possibilitar a comparação dos resultados obtidos entre os vários métodos e verificar a robustez dos resultados produzidos. Para os três métodos de análise, os dados do problema foram processados em planilhas eletrônicas programadas pelos autores. Para os métodos *Compromise Programming* - CP e TOPSIS, foram empregadas as três métricas recomendadas (1, 2 e infinito), e o método PROMÉTHÉE-II foi processado usando a função chamada usual (Tipo 1).

O método de Programação de Compromisso, também traduzido por alguns autores como método de Programação Negociada (CP - *Compromise Programming*) foi apresentado por Zeleny (1973, 1974, 1982) e é muito utilizado modernamente (e.g. Mena et al., 2023; Son et al., 2021; Tshibangu, 2015). A grosso modo, o método calcula as distâncias de cada alternativa a um ponto ideal utópico, e classifica essas alternativas por essa distância, sendo as mais próximas (com menor distância ao ponto ideal) as mais preferidas (que têm o maior “grau de proximidade”). O método foi inicialmente proposto para trabalhar com variáveis discretas, mas Duckstein & Opricovic (1980) incluíram uma adaptação numérica para facilitar a interpretação dos resultados do método e aplicá-lo para problemas discretos. Uma boa descrição do método de Programação de Compromisso pode ser encontrada em Goicoechea et al. (1982).

O método PROMÉTHÉE tem o seu nome derivado das letras do título inteiro do método, originalmente em língua francesa (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*). O Método PROMÉTHÉE foi desenvolvido por Brans e apresentado por Brans pela primeira vez em 1982 (Brans, 1982). O método seguiu sendo aperfeiçoado e sendo apresentado em outras versões (Brans et al., 1984; Brans & Vincke, 1985; Brans & Mareschal, 1994). O método PROMÉTHÉE é uma tentativa de estabelecer de forma natural a estrutura de preferência do decisor baseado em uma estrutura de preferência definida por comparações das alternativas duas a duas. Ele tem-se mostrado ser um método fácil de ser aplicado, envolvendo ao mesmo tempo uma análise mais completa e explícita (Braga & Gobetti, 1997). Na realidade trata-se de um conjunto de várias versões do método original, que pertencem à família de métodos da escola francesa de apoio multicritério à decisão, da categoria dos métodos de relação de superação ou “*outranking methods*” (Brans & Mareschal, 1994; Brans & Vincke, 1985). A sua segunda versão, o método PROMÉTHÉE-II (utilizado na presente pesquisa), permite obter um ordenamento total das alternativas, porque essa versão do método não adota a relação de incomparabilidade. Informações mais detalhadas sobre o método PROMÉTHÉE podem ser encontradas em Gomes et al. (2011) e em Braga & Gobetti (1997).

O método TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) foi desenvolvido por Hwang & Yoon (1981) e é utilizado atualmente em variadas aplicações (e.g. El Alaoui, 2021; Selvachandran & Peng, 2019; Hanine et al., 2016). TOPSIS é uma evolução do método de Programação de Compromisso (*Compromising Programming* - CP), pois ele permite a avaliação de alternativas com relação não somente a uma solução ideal, mas em relação a duas soluções ao mesmo tempo (uma ideal e outra anti-ideal). TOPSIS baseia-se no princípio de que a alternativa escolhida deveria ter a menor distância vetorial a partir de uma solução positiva ideal (PIS - *Positive Ideal Solution*) e a maior distância a partir de uma solução negativa ideal (NIS - *Negative Ideal Solution*). O Método TOPSIS utiliza um

coeficiente de similaridade para ordenar as alternativas. Maiores detalhes do método TOPSIS e de sua programação podem ser encontrados em Figueroa et al. (2004), Shih et al. (2007), e Olson (2004).

Como potencialmente os três métodos de análise multiobjetivo podem produzir hierarquias diferentes, empregou-se um método de consenso dos resultados, proposto por Silva & Souza (2023), que utiliza o critério de máxima frequência de uma alternativa na posição do ranking.

No final, a metodologia e os resultados foram verificados com o objetivo de estabelecer melhorias e modificações no procedimento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A bacia hidrográfica do rio Preto

A bacia hidrográfica do rio Preto localiza-se na porção oriental do Distrito Federal e faz a divisa do Distrito Federal com os estados de Goiás e Minas Gerais. Seus principais afluentes no alto curso são: ribeirão Santa Rita e ribeirão Jacaré, situados na porção meridional; ribeirão Extrema e rio Jardim, localizados na porção central; e o córrego São Bernardo, localizado ao sul da bacia. Desses afluentes, o ribeirão Santa Rita e o córrego São Bernardo drenam áreas do Distrito Federal e do estado de Goiás, os demais estão inteiramente inseridos no Distrito Federal. Desde a nascente até a foz, são cerca de 400 km de extensão total (Distrito Federal, 2006). A bacia ocupa uma área de 1.782 km², dos quais 1.313 estão no Distrito Federal (74%) e 465 estão no Estado de Goiás (26%) (Cordeiro Netto et al., 2000).

Segundo Cordeiro Netto et al. (2000), a exploração econômica da bacia, com uso intensivo da água, ocorre somente dentro do Distrito Federal, já que a parcela situada dentro do estado de Goiás é ocupada por uma área de treinamento do Exército. Essa exploração é predominantemente agrícola com recurso intensivo à irrigação, o que já gerou situações de conflito entre os diferentes irrigantes, especialmente no período de estiagem e na região a montante da bacia hidrográfica, onde o uso de sistemas de irrigação de grande porte vem ocasionando uma considerável diminuição da disponibilidade da água. Além da demanda da água para irrigação, apresenta-se outra demanda muito importante, a usina hidrelétrica de Queimados (Distrito Federal, 2006).

A UHE de Queimados possui uma capacidade de 105 MW e o seu reservatório possui uma área alagada de 40 Km², cobrindo áreas dos municípios de Cabeceira Grande e Unaí (Minas Gerais), Cristalina e Formosa (Goiás) e da região administrativa de Paranoá (Distrito Federal). No total, o reservatório tem uma área de drenagem de 3.710 Km² e um volume total 485,04x10⁶ m³, entre seus níveis de água máximo normal e mínimo. A vazão média de longo período é de 52 m³.s⁻¹ e a mínima é de 6,5 m³.s⁻¹ (Distrito Federal, 2006). Na Figura 2 apresenta-se um mapa com a localização e alguns detalhes da Bacia Hidrográfica do rio Preto.

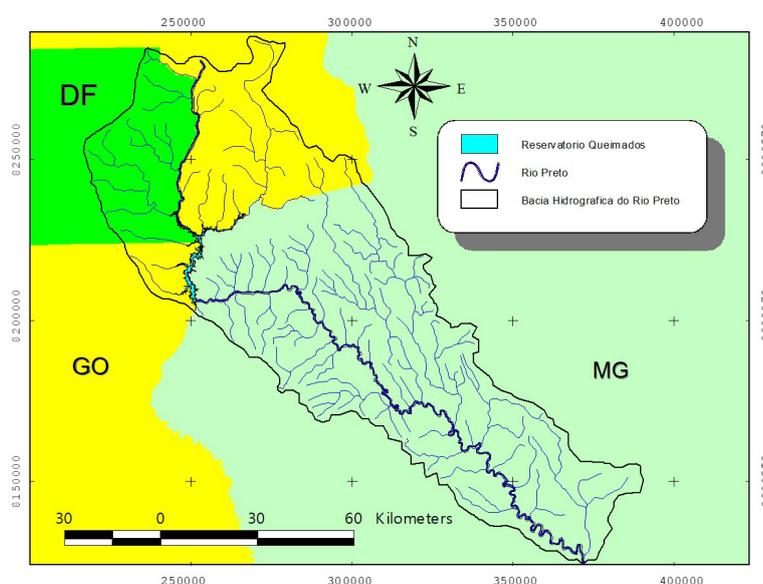


Figura 2: Localização e detalhes da Bacia Hidrográfica do rio Preto. Fonte: Distrito Federal (2006)

Segundo dados da SEINFRA (Distrito Federal, 2006), o principal uso consuntivo da água na bacia é a irrigação, com 21.716 L.s⁻¹, seguido pelo abastecimento humano com 355 L.s⁻¹. Cerca de 99% das vazões captadas superficialmente são usadas para irrigação, o que demonstra uma forte tendência na bacia ao desenvolvimento de atividades de agricultura irrigada.

Na Figura 3 são apresentadas as principais culturas assim como a sua área cultivada na bacia do rio Preto. As principais culturas na bacia são feijão, milho e trigo.

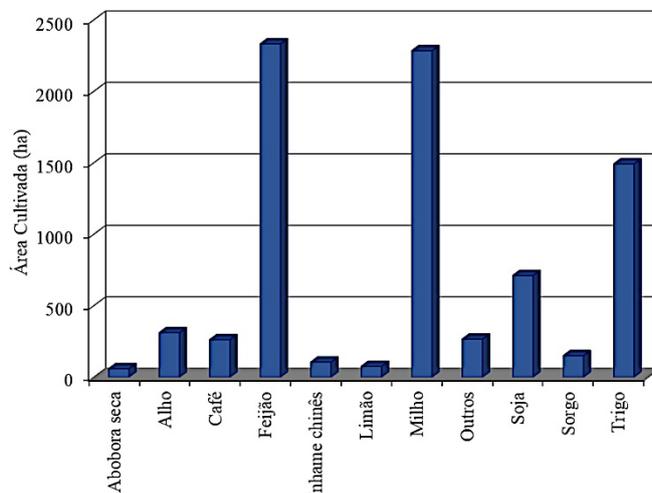


Figura 3: Principais culturas praticadas na bacia do rio Preto. Fonte: Distrito Federal (2006)

O agente outorgante e os macro-objetivos

Como no presente trabalho é levado em consideração o ponto de vista do outorgante, o principal ator envolvido é o organismo encarregado de conceder a outorga. No caso da bacia do rio Preto, por abranger diferentes estados, esse organismo é a ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Por meio de reuniões com especialistas em outorga da ANA, e em consulta formal a eles, foram definidos os critérios e indicadores que pudessem atender macro-objetivos econômico, ambiental, técnico e social. O macro-objetivo econômico procura atingir o aumento do ganho por irrigação e o ganho por produção de energia. O macro-objetivo ambiental procura atingir uma diminuição das falhas na vazão ecológica Q₉₅. O macro-objetivo técnico procura atingir uma melhoria da eficiência dos métodos de irrigação, uma diminuição da perda de geração na UHE Queimado, e uma diminuição no não atendimento aos irrigantes. O macro-objetivo social procura aumentar a participação dos irrigantes familiares na bacia do rio Preto.

Na Tabela 1 são apresentados, para cada macro-objetivo, os critérios identificados para a análise dos diferentes cenários propostos para a área de estudo.

Tabela 1: Critérios e indicadores utilizados.

Macro-objetivo	Critérios	Indicadores
Econômico	Ganho por irrigação	Renda Líquida pela agricultura (R\$.ano ⁻¹)
	Ganho por produção de energia	Renda Líquida pela energia (R\$.ano ⁻¹)
Ambiental	Vazão ecológica - Q ₉₅	Número de vezes que a vazão no trecho é menor a Q ₉₅
Técnico	Eficiência média do método de irrigação	Eficiência média dos métodos de irrigação na bacia (%)
	Perda média na geração de energia na usina	MWh que são deixados de gerar em relação à capacidade máxima da usina (MWh)
	Não atendimento médio ao irrigante	Número médio de meses por ano em que a demanda do irrigante não é satisfeita (número de meses com falha/número de anos simulados)
Social	Participação dos agricultores e familiares	Número de hectares familiares/número de hectares totais cultivados (%)

Fonte: os autores

A geração dos cenários

Para formar os cenários foram levadas em consideração três variáveis, da seguinte maneira: (1) localização do crescimento, a montante da UHE Queimados ou a jusante da UHE Queimados; (2) crescimento, significativo ou moderado; e (3) tipo de agricultor a quem é aplicado o crescimento, patronal ou familiar. Desta maneira, com três variáveis e com duas possibilidades em cada variável, foram obtidos os possíveis arranjos, que compuseram os respectivos cenários. Dos quais foram descartados cenários que não seriam plausíveis na realidade e agregados cenários que desprezam alguma das variáveis, como por exemplo, o desenvolvimento em toda a bacia.

Os cenários adotados são apresentados a seguir:

- Cenário C1: Crescimento significativo a jusante, com tipo de irrigante familiar;
- Cenário C2: Crescimento significativo a montante, com tipo de irrigante patronal;
- Cenário C3: Crescimento significativo a jusante, com tipo de irrigante patronal;
- Cenário C4: Crescimento moderado a montante, com tipo de irrigante familiar;
- Cenário C5: Crescimento moderado a montante, com tipo de irrigante patronal;
- Cenário C6: Crescimento moderado a jusante, com tipo de irrigante familiar;
- Cenário C7: Crescimento moderado a jusante, com tipo de irrigante patronal;
- Cenário C8: Crescimento significativo na bacia toda com tipo de irrigante patronal.

Balanço hídrico da bacia em cada cenário

Utilizando as demandas e disponibilidade hídrica e da topologia da bacia, a definição dos possíveis cenários, e a compreensão do sistema de suporte a decisão a ser empregado, foi determinado o balanço hídrico na bacia do rio Preto para um horizonte de 20 anos, para que, posteriormente, possam ser calculados os diferentes critérios e indicadores definidos no caso de estudo para cada um dos cenários propostos. Foi empregado o software ACQUANET para realizar o balanço hídrico na bacia.

A topologia para representar a bacia hidrográfica do rio Preto foi desenvolvida visando a representar as diferentes zonas de estudo definidas na bacia, além dos diferentes tipos de demandas encontrados na bacia. Desse modo, a bacia foi representada por meio de nós de passagem chamados Alto Preto DF, Alto Preto GO, Alto Preto Queimados, e médio e baixo Preto. A cada um desses nós de passagem foram ligadas demandas que se apresentavam em cada uma das zonas de estudo. Em geral, foram ligados quatro tipos de demandas: (1) demandas por abastecimento, (2) demandas por dessedentação animal, (3) demandas por irrigação com aspersão convencional, e (4) demandas por irrigação com pivô central.

Foi representado o reservatório de Queimados, e separadamente, como uma demanda a parte, as turbinas hidroelétricas, que desembocam em um nó de passagem de confluência que é utilizado para representar a saída da água das turbinas quando retorna ao curso principal de água. No final da rede foi utilizada uma demanda que simula a entrega da água para o rio Paracatu. Essa demanda somente é representada com o fim de evitar acumulação de água dentro do sistema e não representa uma demanda real.

A prioridade de atendimento no AcquaNet é a ordem de atendimento das demandas e dos volumes-meta dos reservatórios. Uma demanda com prioridade 1 será atendida primeiro que uma demanda com prioridade 2, e assim sucessivamente. Com o objetivo de cumprir a Política Nacional de Recursos Hídricos, as demandas de dessedentação animal e de abastecimento urbano têm a primeira prioridade em todos os cenários propostos. O segundo lugar na escala de prioridades é ocupado pela irrigação objetivo, seja aspersão convencional ou pivô central, dependendo da sua localização na bacia, segundo cada cenário proposto. O terceiro lugar na escala de prioridades é ocupado pelas demandas de irrigação que não são consideradas o objetivo do cenário, quer dizer, quando um cenário indica que será dada prioridade aos irrigantes patronais a montante do reservatório, estes terão prioridade 2, o resto de irrigantes a montante terão prioridade 3, o mesmo valendo para os irrigantes localizados a jusante do reservatório. A demanda requerida pelas turbinas da UHE Queimados também tem prioridade 3, com o objetivo de igualá-la às demandas não objetivo do cenário. Isso foi feito visando a medir a perda de geração de energia e as falhas no suprimento das turbinas devido à irrigação objetivo do cenário em análise. O quarto lugar na escala de prioridades é o volume meta do reservatório de Queimados, já que isso permite observar o comportamento do reservatório (enchimento ou esvaziamento) ao longo da simulação, além de permitir calcular o decaimento na produção de energia que depende diretamente do nível no reservatório.

Cálculo das performances das alternativas segundo cada critério

A seguir, foram calculados os valores dos indicadores de cada critério para cada Cenário. Alguns desses cálculos exigiram pesquisa detalhada e profunda dos dados da bacia do rio Preto. O critério “Ganho por irrigação” teve o seu respectivo indicador determinado mediante a multiplicação da renda líquida do irrigante por metro cúbico de água consumido, seja por pivô central ou por aspersão convencional, multiplicado pelo número de metros cúbicos de água consumidos. O critério “Ganho por produção de energia” teve seu valor de indicador determinado mediante a multiplicação do valor da água para o usuário na produção de energia na bacia do rio Preto pela vazão fornecida à turbina de Queimados para produção de energia. O critério “Vazão ecológica - Q_{95} ” foi representado pelo indicador, para o caso de estudo, com o valor determinado pelo número de vezes em que a vazão nos trechos em estudo é menor à Q_{95} , o que representa a contribuição mínima da bacia que caracteriza situação de permanência. O critério “Eficiência média do método de irrigação” ficou representado pelo indicador composto pela média ponderada das áreas irrigadas por pivô central e por aspersão (seja do tipo patronal ou familiar), levando em consideração a eficiência de aplicação da água de cada um destes métodos de irrigação. O critério “Perda média na geração de energia na usina hidrelétrica” teve seu indicador calculado pela média da geração máxima da usina de Queimados menos a energia gerada pela usina no período simulado. O critério “Não atendimento médio ao irrigante” teve seu valor determinado pelo indicador calculado como o tempo abaixo da demanda necessária, em meses, dividido pelo número de anos da simulação, que é muito importante devido a que ele fornece a noção de quanto tempo em média os irrigantes não são atendidos, gerando prejuízos de diferentes formas. O critério “Participação dos agricultores familiares” foi representado pelo indicador do quociente entre o número de hectares familiares pelo número de hectares totais cultivados na bacia, o que mede a participação dos agricultores familiares no agronegócio, gerando renda e benefícios para os pequenos agricultores que, em geral, são as pessoas mais pobres.

Foram calculados os valores de cada critério (ou de cada indicador) para cada um dos cenários, utilizando os resultados finais obtidos pela aplicação do ACQUANET. Como resultado da avaliação de todos os critérios e indicadores, foi determinada a matriz de consequências (ou *pay-off matrix*), cujos dados foram utilizados na análise posterior por meio dos métodos multiobjetivo e multicritério. A matriz de consequências é apresentada na Tabela 2. Note-se que os critérios “Ganho por irrigação”, “Ganho por produção de energia”, “Eficiência média do método de irrigação”, e “Participação dos agricultores familiares” são diretamente proporcionais à decisão, e os critérios “Número de falhas da vazão ecológica”, “Perda média de energia, e “Não atendimento médio ao irrigante” são inversamente proporcionais à decisão. Note-se que os diversos cenários apresentam eficiências muito próximas em quase todos os critérios, o que dificulta a solução decisória.

Tabela 2: Matriz de Consequências (*pay-off matrix*) com Alternativas (cenários) versus Critérios de alocação de água na bacia do rio Preto (os números mostram as eficiências com que cada alternativa cumpre cada critério).

Critério / Indicador	ALTERNATIVAS (CENÁRIOS)							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Ganho por irrigação - Renda líquida pela agricultura (milhões de R\$/ano)	26,98	29,41	27,14	23,35	25,36	23,62	23,74	30,17
Ganho por produção de energia - Renda líquida pela energia (milhões de R\$/ano)	38,74	38,53	38,74	38,89	38,74	38,90	38,90	38,53
Vazão ecológica - Número Total de falhas da Q_{95} (Média por trecho/ano)	1,28	1,48	1,28	1,18	1,28	1,17	1,16	1,48
Eficiência média do método de irrigação (%)	78,05	78,16	78,15	78,10	78,15	78,07	78,15	78,19
Perda média na geração de energia na usina - MWh deixados de gerar por MWh de capacidade máxima da usina	41,71	42,10	41,71	41,43	41,70	41,41	41,41	42,10
Não atendimento médio ao irrigante (Nº meses com falha/ano)	0,05	0,10	0,05	0,00	0,05	0,00	0,00	0,10
Participação dos agricultores familiares (Nº ha familiares/Nº ha totais cultivados x 100) (%)	17,19	13,85	15,06	15,95	14,19	16,82	15,16	13,50

Fonte: os autores

Definição dos pesos entre critérios

Para a definição dos pesos para os indicadores selecionados, foi realizada uma consulta com especialistas em outorga da ANA. Após reuniões, foram identificadas quatro possíveis estratégias para orientar o procedimento de outorga na bacia do rio Preto. Cada uma dessas estratégias, denominadas de “políticas” neste trabalho, corresponderia a um arranjo de pesos para os diferentes critérios adotados.

Neste trabalho, foi aplicado esse conceito de “políticas” de outorga, com o objetivo de ilustrar de que maneira a abordagem proposta poderia ser implementada para identificar um cenário “ótimo” de evolução do uso da água na bacia em estudo, de acordo com determinada política.

A primeira política considerada visa a dar prioridade às questões ambientais. Nesta abordagem, o critério ambiental (Q₉₅) tem o peso de 0,52, os outros critérios receberam pesos iguais de 0,08. A segunda política proposta dá ênfase ao ganho econômico na bacia. Nessa abordagem, os critérios de ganho por irrigação e ganho por produção de energia têm os maiores pesos (0,3), os outros critérios receberam pesos iguais de 0,08. A terceira política proposta visa a dar prioridade à dimensão social na bacia, e, com essa estratégia, o maior peso vai para o critério de participação dos agricultores familiares (0,4), e o critério não-atendimento médio ao irrigante recebeu um peso de 0,2 já que também expressa uma visão social. Os outros critérios ficaram com pesos iguais de 0,08. Também foi definida uma quarta política em que todos os critérios têm pesos iguais, com o fim de buscar representar uma estratégia de “neutralidade” em relação ao procedimento de outorga.

Com as diferentes políticas de outorga propostas, procura-se identificar o melhor cenário que possa cumprir com os diferentes macro-objetivos propostos na definição dos indicadores, e além disso, encontrar a política de outorga a ser aplicada na bacia.

Com as diferentes políticas de outorga propostas, procurou-se identificar o melhor cenário que pode cumprir concomitantemente com os diferentes macro-objetivos propostos na definição dos indicadores, e, além disso, encontrar a política de outorga a ser aplicada na bacia. Os pesos para os diferentes critérios nas diferentes políticas de outorga são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Pesos adotados no trabalho para cada política considerada.

Critérios	Pesos			
	Política	Política	Política	Política
	Neutra	Ambiental	Econômica	Social
Ganho por irrigação	0,14	0,08	0,30	0,08
Ganho por produção de energia	0,14	0,08	0,30	0,08
Falhas na Q ₉₅	0,14	0,52	0,08	0,08
Eficiência média do método de irrigação	0,14	0,08	0,08	0,08
Perda média na geração de energia na Usina	0,14	0,08	0,08	0,08
Não atendimento médio ao irrigante	0,14	0,08	0,08	0,20
Participação dos agricultores familiares	0,14	0,08	0,08	0,40

Fonte: os autores

Aplicação dos métodos de análise multiobjetivo

Foram aplicados os métodos multiobjetivo-multicritério a partir da matriz de consequências, construída com os resultados da avaliação dos indicadores para cada um dos cenários de desenvolvimento da bacia propostos, e para os pesos atribuídos para cada política de outorga da água. Três métodos foram aplicados: *Compromise Programming* - CP, *PROMÉTHÉE-II* e *TOPSIS*. As Tabelas 4, 5, 6 e 7 apresentam os resultados obtidos após aplicação desses métodos multiobjetivo-multicritério.

Tabela 4: Resultado da hierarquização dos cenários para a outorga de recursos hídricos na bacia do Rio Preto seguindo a política “neutra” (realizada pelos três métodos multiobjetivo-multicritério, adotados para os oito cenários propostos, para pesos iguais para cada um dos critérios analisados).

Método de análise	Ordenamento das Alternativas - Política “Neutra”							
	POSIÇÕES NO RANKING							
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a
PROGRAMAÇÃO DE COMPROMISSO	C7	C6	C4	C3	C1	C5	C8	C2
TOPSIS	C7	C6	C4	C3	C1	C5	C8	C2
PROMÉTHÉE-II	C6	C7	C4	C1	C3	C5	C8	C2
HIERARQUIA FINAL DA ANÁLISE (*)	C7	C6	C4	C3	C1	C5	C8	C2

(*) hierarquia obtida por consenso, segundo Silva & Souza (2023). Fonte: os autores

Tabela 5: Resultado da hierarquização dos cenários para a outorga de recursos hídricos na bacia do Rio Preto seguindo a política ambiental (realizada pelos três métodos multiobjetivo-multicritério, adotados para os oito cenários propostos, com pesos adotados maiores para o critério do macro-objetivo ambiental).

Método de análise	Ordenamento das Alternativas - Política Ambiental							
	POSIÇÕES NO RANKING							
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a
PROGRAMAÇÃO DE COMPROMISSO	C7	C6	C4	C3	C1	C5	C8	C2
TOPSIS	C7	C6	C4	C3	C1	C5	C8	C2
PROMÉTHÉE-II	C7	C6	C4	C1	C3	C5	C8	C2
HIERARQUIA FINAL DA ANÁLISE (*)	C7	C6	C4	C3	C1	C5	C8	C2

(*) hierarquia obtida por consenso, segundo Silva & Souza (2023). Fonte: os autores

Tabela 6: Resultado da hierarquização dos cenários para a outorga de recursos hídricos na bacia do Rio Preto seguindo a política econômica (realizada pelos três métodos multiobjetivo-multicritério, adotados para os oito cenários propostos, com pesos adotados maiores para os critérios do macro-objetivo econômico).

Método de análise	Ordenamento das Alternativas - Política Econômica							
	POSIÇÕES NO RANKING							
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a
PROGRAMAÇÃO DE COMPROMISSO	C7	C6	C4	C3	C1	C5	C8	C2
TOPSIS	C7	C6	C4	C3	C1	C5	C8	C2
PROMÉTHÉE-II	C3	C1	C6	C7	C4	C5	C8	C2
HIERARQUIA FINAL DA ANÁLISE (*)	C7	C6	C4	C3	C1	C5	C8	C2

(*) hierarquia obtida por consenso, segundo Silva & Souza (2023). Fonte: os autores

Tabela 7: Resultado da hierarquização dos cenários para a outorga de recursos hídricos na bacia do Rio Preto seguindo a política social (realizada pelos três métodos multiobjetivo-multicritério, adotados para os oito cenários propostos, com peso adotado maior para o critério do macro-objetivo social).

Método de análise	Ordenamento das Alternativas - Política Social							
	POSIÇÕES NO RANKING							
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a
PROGRAMAÇÃO DE COMPROMISSO	C6	C4	C1	C7	C3	C5	C2	C8
TOPSIS	C6	C4	C1	C7	C3	C5	C2	C8
PROMÉTHÉE-II	C6	C4	C7	C1	C3	C5	C2	C8
HIERARQUIA FINAL DA ANÁLISE (*)	C6	C4	C1	C7	C3	C5	C2	C8

(*) hierarquia obtida por consenso, segundo Silva & Souza (2023). Fonte: os autores

A aplicação do método *Compromise Programming* apresentou pouca modificação à mudança de pesos, produzindo a mesma hierarquização dos cenários para as políticas de alocação ambiental, econômica e neutra. A classificação dos cenários segundo essas políticas foi a seguinte, na ordem: C7, C6, C4, C3, C1, C5, C8 e C2. Contudo, aplicando-se a política social, o resultado foi diferente, sobressaindo-se os cenários C6 e C4.

Os resultados apresentados para a política neutra foram coerentes, já que o *Compromise Programming* classificou nas primeiras posições, os cenários que apresentavam os melhores resultados nos indicadores. Os resultados para a política ambiental também se mostraram coerentes, pois o *Compromise Programming* classificou como as piores alternativas os cenários C8 e C2, em que se dá um aumento considerável do uso dos recursos hídricos, não só a montante da bacia, onde já existe o problema de uso intensivo da água para irrigação, mas também para o desenvolvimento significativo das áreas irrigadas nas partes média e baixa da bacia, o que ocasionaria uma forte pressão sobre a vazão ambiental. Na hierarquização feita para a política social, o método *Compromise Programming* demonstrou coerência com o objetivo da política, já que classificou, nas primeiras posições, os cenários que têm um maior desenvolvimento dos agricultores familiares, como é o caso dos cenários C6, C4 e C1; além disso, nesses cenários, apresenta-se o menor número de falhas no atendimento aos irrigantes. Nos resultados apresentados para a classificação de cenários, segundo a

política econômica, o método *Compromise Programming* classifica como prioritários os desenvolvimentos a jusante da bacia, independentemente do tipo de irrigante, o que não representa um maior ganho econômico, mas sim, um ganho na faixa média. Isso mostra que cenários com alto ganho econômico podem ser desconsiderados como melhores, dado o alto grau de afetação que apresentam aos outros critérios, mesmo esses tendo um peso menor ao peso do critério econômico.

A aplicação do método TOPSIS apresentou a mesma ordenação de alternativas que o método *Compromise Programming*, para cada uma das políticas de alocação propostas. O método apresentou a mesma ordenação de alternativas para as políticas neutra, ambiental e econômica, produzindo a seguinte hierarquia: C7, C6, C4, C3, C1, C5, C8 e C2. TOPSIS só apresentou variação na ordenação de alternativas na política social, em que a classificação dos três primeiros cenários foi C6, C4 e C1 (ainda assim a mesma do *Compromise Programming* para essa política). É de se ressaltar que a classificação, mesmo sendo igual à gerada pelo método da Programação por Compromisso, leva em consideração a maior distância da pior solução. Isso confirma que a classificação gerada não só seria a melhor, mas como também que é a que mais se afasta do pior conjunto de soluções possível.

Assim como nos métodos TOPSIS e *Compromise Programming*, o método PROMÉTHÉE-II também foi aplicado aos quatro grupos de pesos. Observou-se, para a política “neutra”, que as cinco melhores posições na classificação continuavam sendo ocupadas pelos mesmos cenários. A alternativa C7 mudou da primeira posição para a segunda, houve também uma inversão na colocação das alternativas C3 e C1, que passaram da quarta para a quinta posição e da quinta para a quarta posição, respectivamente. Na política ambiental de outorga, os cenários mais bem posicionados pelo PROMÉTHÉE-II continuam sendo o C7 e o C6. Apresentaram-se mudanças na quarta e quinta colocação, agora ocupadas pelos cenários C1 e C3, respectivamente. Na aplicação do método PROMÉTHÉE, para o caso da política econômica de outorga, observa-se que esse é o método mais sensível aos pesos, já que classifica as alternativas C3 e C1 como as melhores posicionadas, levando em conta o alto ganho que essas alternativas proporcionam, mas desconsiderando as falhas que se apresentam no atendimento aos irrigantes. Porém, sob o ponto de vista econômico, essa classificação pode ser aceita. Na aplicação do método PROMÉTHÉE-II para a política social de outorga, observou-se total coerência com os outros métodos aplicados, só mudando de posição os cenários C7 e C1, que trocaram de posição de quinta para quarta e de quarta para quinta, respectivamente.

Utilizando-se o método de consenso (Silva & Souza, 2023), os resultados dos três métodos podem ser resumidos pelos dados da Tabela 8. Isso significa que cada linha da Tabela 8 contempla sobremaneira uma determinada política para a bacia do rio Preto. Porém, se se quiser empregar um Cenário que contemple, de alguma forma, todas as políticas ao mesmo tempo nessa bacia, deve-se procurar o consenso dos resultados de consenso de todas as políticas adotadas para a alocação na bacia do rio Preto, o que é mostrado pelos resultados de hierarquização apresentados na última linha da Tabela 8: C7; C6; C4; C3; C1; C5; C8 e C2.

Tabela 8: Resultado da hierarquização dos cenários para a outorga de recursos hídricos na bacia do Rio Preto, considerando cada política e o método de consenso de resultados.

POLÍTICAS	Ordenamento das Alternativas (Cenários)							
	POSIÇÕES NO RANKING							
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a
“Neutra”	C7	C6	C4	C3	C1	C5	C8	C2
Ambiental	C7	C6	C4	C3	C1	C5	C8	C2
Econômica	C7	C6	C4	C3	C1	C5	C8	C2
Social	C6	C4	C1	C7	C3	C5	C2	C8
HIERARQUIA FINAL DA ANÁLISE (*)	C7	C6	C4	C3	C1	C5	C8	C2

(*) hierarquia obtida por consenso, segundo Silva & Souza (2023). Fonte: os autores

Pode-se concluir que o Cenário C7 predominou sobre os outros para todas as políticas, exceto para a política social, onde prevaleceu o Cenário C6. Contudo, devido ao fato de que as melhores alternativas classificadas sempre foram a C7, C6 e C4, e observando que essas três alternativas produziram valores muito próximos dos indicadores de decisão de cada método adotado (o índice de proximidade do método de programação por compromisso, o coeficiente de similaridade do método TOPSIS, e o fluxo líquido de importância do método PROMÉTHÉE-II), pode-se afirmar que qualquer das três alternativas (Cenários C7, C6 e C4), poderiam ser aceitas, com perdas ínfimas de eficiência entre os critérios de avaliação

adotados. Um resumo da descrição dos cenários C7, C6 e C4 é mostrado na Tabela 9, onde se constata que as três alternativas melhor posicionadas admitem um crescimento na bacia apenas “moderado”, e isso é um consenso entre elas. Apenas o Cenário C4 mantém um crescimento a montante da UHE Queimados, região que presencia no momento conflitos provenientes do uso da água, portanto essa seria uma situação indesejável. A única diferença entre os Cenários C6 e C7 é no tipo de irrigante adotado, familiar ou patronal, situação que faz o Cenário C6 estar melhor classificado quando se adota a política “social” (onde neste trabalho assumiu-se ser melhor ter-se o irrigante familiar).

Tabela 9: Resumo da descrição de cada um dos cenários melhor ranqueados na análise por multicritérios.

Alternativa / Cenário	Tipo de crescimento	Posição em relação à UHE Queimados	Tipo de irrigante
C4	Moderado	Montante	Familiar
C6	Moderado	Jusante	Familiar
C7	Moderado	Jusante	Patronal

Fonte: os autores

A simples observação sugere a realização de um estudo futuro com mais cenários entre o C6 e o C7, com variações dos percentuais entre os irrigantes patronais e familiares.

A partir das hipóteses e dos cenários adotados, segundo os resultados fornecidos pelos diferentes métodos, os melhores cenários para o desenvolvimento da bacia são o C7 e o C6, onde se teria crescimento moderado dos irrigantes a jusante da UHE Queimados, apenas diferindo no tipo de irrigante, sendo que o C6 premia o irrigante familiar. Esses cenários apresentaram melhor desempenho em relação à renda líquida para a produção de energia, menor número de falhas em relação à vazão ecológica, menor perda de energia na usina, e melhor atendimento médio ao irrigante. Além disso, pelos demais critérios, esses cenários ficaram em torno da média dos valores dos outros cenários.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com respeito à metodologia de outorga de recursos hídricos utilizada, a possibilidade de incluir aspectos econômicos, ambientais, técnicos e sociais, diferentes dos critérios hidrológicos normalmente utilizados, possibilita definir uma política de outorga que seja capaz de considerar os conflitos que se podem apresentar, de se articular com políticas sociais na bacia, de permitir a expansão dos projetos de recursos hídricos além dos limites normalmente utilizados e de promover o uso mais racional da água. Além disso, a metodologia de outorga desenvolvida permite encontrar uma política de outorga baseada em diferentes objetivos para outorga, tais como ambiental, social e econômico. Pelos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que a aplicação de análise multiobjetivo e multicritério, utilizando informações de naturezas diversas para definir uma política de outorga de uso da água em uma bacia hidrográfica, mostrou-se pertinente e se constitui em tema promissor para futuros desenvolvimentos e aperfeiçoamentos metodológicos.

Este trabalho constituiu-se em um estudo preliminar de averiguação da efetividade da metodologia empregada. As recomendações finais para que a pesquisa com a mesma metodologia possa avançar, são: (1) realizar a análise multicritério com mais outros métodos de análise multiobjetivo; (2) definir mais alguns critérios que possam abstrair e resumir as características da bacia em estudo para ter uma representação mais exata do problema estudado; (3) consultar os diferentes atores envolvidos no processo de alocação e de uso da água na bacia, para determinar critérios, indicadores e pesos, com o objetivo de levar em consideração o ponto de vista de todos os atores envolvidos; (4) utilizar métodos formais de aquisição de preferências entre os atores; (5) rever e aperfeiçoar o procedimento de geração de cenários; (6) refinar os procedimentos de obtenção de dados e de cálculo dos valores das eficiências de cada cenário segundo cada critério; e (7) discutir os resultados da política de outorga com os atores envolvidos na bacia.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão de bolsa de estudo de pós-graduação. À ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, pelo apoio recebido e pelas informações dadas por seus técnicos.

REFERÊNCIAS

- Abolpour, B., Javan, M., & Karamouz, M. (2007). Water allocation improvement in river basin using Adaptive Neural Fuzzy Reinforcement Learning approach. *Applied Soft Computing*, 7(1), 265-285. <http://doi.org/10.1016/j.asoc.2005.02.007>
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. (2011). *Outorga de direito de uso de recursos hídricos* (Cadernos de Capacitação em Recursos Hídricos, No. 6, 50 p.). Brasília: SAG.
- Andrade, L. N. (2012). *Modelo de otimização multiobjetivo para outorga de diluição de efluentes e enquadramento de corpos d'água* (Tese de doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Sant, Vitória. Recuperado em 29 de outubro de 2024, de <https://repositorio.ufes.br/server/api/core/bitstreams/a66aca3c-30ee-42bd-813c-595db06a1660/content>
- Babel, M. S., Gupta, A. D., & Nayak, D. K. (2005). A model for optimal allocation of water to competing demands. *Water Resources Management*, 19(6), 693-712. <http://doi.org/10.1007/s11269-005-3282-4>
- Braga, B., & Gobetti, L. (1997). Análise multiobjetivo. In Associação Brasileira de Recursos Hídricos (Ed.), *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos* (1ª ed., pp. 361-419). Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Recuperado em 29 de outubro de 2024, de https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=5&LIVRO=235&TITULO=tecnicas_quantitativas_para_o_gerenciamento_de_recursos_hidricos
- Brans, J. P. (1982). L'ingénierie de la décision: elaboration d'instruments d'aide à la décision, methode PROMETHEE. In R. Nadeau & M. Landry (Eds.), *Laide a la Decision: Nature, Instruments et Perspectives D'avenir*, (pp. 183-214). Quebec: Universite Laval. Recuperado em 29 de outubro de 2024, de <https://www.pulaval.com/livres/l-aide-a-la-decision-nature-instruments-et-perspectives-d-avenir>
- Brans, J. P., & Mareschal, B. (1994). *How to decide with PROMETHEE: the PROMETHEE-GAIA decision support system for multicriteria investigations* (Série Mathématiques de la Gestion). Bruxelles: Institut de Statistique, Université Libre de Bruxelles.
- Brans, J. P., Mareschal, B., & Vincke, P. (1984). PROMETHEE: a new family of outranking methods in multicriteria analysis. *Operations Research*, 3, 477-490.
- Brans, J. P., & Vincke, P. (1985). A preference ranking organisation method. *Management Science*, 31(6), 647-656.
- Brasil. Presidência da República. (1997). Lei Federal nº 9443 de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília. Recuperado em 29 de outubro de 2024, de http://legislacao.planalto.gov.br/legisla/legislacao.nsf/Viw_Identificacao/lei%209.433-1997?OpenDocument
- Cardoso da Silva, L. M., & Monteiro, R. A. (2004). Outorga de direito de uso de recursos hídricos: uma das possíveis abordagens. In C. J. S. Machado (Ed.), *Gestão de águas doces* (cap. V, pp. 135-178). Rio de Janeiro: Interciência.
- Cordeiro Netto, O. M., Baltar, A. M., & Pimentel, C. E. B. (2000). Critérios para outorga de uso da água para irrigação: o caso da bacia do rio Preto no Distrito Federal-Brasil. In *Anais IV Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa* (pp. 1-20), Coimbra, Portugal. Lisboa: APRH.
- Costa, F. F., Machado, E. C. M. N., Ribeiro, S. N., Assis, W. D., & Martins, W. A. (2014). Técnicas de tratamento de restrições aplicado em um algoritmo evolucionário multiobjetivo para repactuação de outorgas em uma bacia hidrográfica. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 9(4), 69-77. <http://doi.org/10.18378/rvads.v9i4.3014>
- Dai, Z., & Li, Y. (2013). A multistage irrigation water allocation model for agricultural land-use planning under uncertainty. *Agricultural Water Management*, 2013(129), 69-79. <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.07.013>
- Distrito Federal. Secretaria de Estado de Obras e Infraestrutura do Distrito Federal – SEINFRA-DF (2006). *Plano de gerenciamento integrado dos recursos hídricos do Distrito Federal – PGIRH/DF*. Belo Horizonte: Consórcio GOLDER/FAHMA.
- Duckstein, L., & Opricovic, S. (1980). Multiobjective optimization in river basin development. *Water Resources Research*, 16(1), 14-20. <http://doi.org/10.1029/WR016i001p00014>
- El Alaoui, M. (2021) *Fuzzy TOPSIS: logic, approaches, and case studies*. New York: CRC Press. <http://doi.org/10.1201/9781003168416>.
- Figueroa, E. V., Mol, J. M. D., Souza, M. A. A., & Cordeiro Netto, O. M. (2004) Aplicabilidade do método de análise multiobjetivo TOPSIS à gestão dos recursos hídricos. In *Anais do 3º Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste* (13 p.), Goiânia. São Paulo: ABRH.
- Goicoechea, A., Hansen, D. R., & Duckstein, L. (1982). *Multiobjective decision analysis with engineering and business applications*. New York: John Wiley & Sons.

- Gomes, L. F. A. M., Araya, M. C. G., & Carignano, C. (2011). *Tomada de decisões em cenários complexos: Introdução aos métodos discretos de apoio multicritério à decisão*. São Paulo: Cengage Learning .
- Hanine, M., Boutkhoum, O., Tikniouine, A., & Agouti, T. (2016). Application of an integrated multi-criteria decision making AHP-TOPSIS methodology for ETL software selection. *SpringerPlus*, 5(263), 2016. <http://doi.org/10.1186/s40064-016-1888-z>
- He, H., Chen, A., Yin, M., Ma, Z., You, J., Xie, X., Wang, Z., & An, Q. (2019). Optimal allocation model of water resources based on the prospect theory. *Water*, 11(6), 1289. <http://doi.org/10.3390/w11061289>
- Hwang, C. L., & Yoon, K. P. (1981) *Multiple attributes decision making methods and applications: a state-of-the-art survey*. Berlin: Springer-Verlag.
- Kahneman, D., & Tversky, A. (1979). Prospect theory: an analysis of decision under risk. *Econometrica*, 47(2), 263-292. <http://doi.org/10.2307/1914185>
- Kralisch, S., Fink, M., Flügel, W.-A., & Beckstein, C. (2003). A neural network approach for the optimisation of watershed management. *Environmental Modelling & Software*, 2003(18), 815-823. [http://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00081-1](http://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00081-1)
- Li, M., Fu, Q., Singh, V. P., Ma, M., & Liu, X. (2017). An intuitionistic fuzzy multi-objective non-linear programming model for sustainable irrigation water allocation under the combination of dry and wet conditions. *Journal of Hydrology*, 2017(555), 80-94. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.055>
- Li, M., & Guo, P. (2014). A multi-objective optimal allocation model for irrigation water resources under multiple uncertainties. *Applied Mathematical Modelling*, 2014(38), 4897-4911. <http://doi.org/10.1016/j.apm.2014.03.043>
- Lin, P., You, J., Gan, H., & Jia, L. (2020). Rule-based object-oriented water resource system simulation model for water allocation. *Water Resources Management*, 34(10), 3183-3197. <http://doi.org/10.1007/s11269-020-02607-3>
- Machado, E. C. M. N., Galvão, C. O., & Souza Filho, F. A. (2012). Alocação quali-quantitativa de águas em bacias hidrográficas: metodologia multiobjetivo inserida no contexto da gestão dos recursos hídricos. *RBRH*, 17(2), 213-227. <http://doi.org/10.21168/rbrh.v17n2.p213-227>
- Mena, R., Godoy, M., Catalán, C., Viveros, P., & Zio, E. (2023). Multi-objective two-stage stochastic unit commitment model for wind-integrated power systems: a compromise programming approach. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 152, 2023. <http://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109214>
- Noori, M., Emadi, A., & Fazloulou, R. (2021). An agent-based model for water allocation optimization and comparison with the game theory approach. *Water Science and Technology: Water Supply*, 21(7), 3584-3601. <http://doi.org/10.2166/ws.2021.124>
- Olson, D. L. (2004). Comparison of weights in TOPSIS models. *Mathematical and Computer Modelling*, 40(7-8), 721-727. <http://doi.org/10.1016/j.mcm.2004.10.003>
- Perera, B., James, B., & Kularathna, M. (2005). Computer software tool REALM for sustainable water allocation and management. *Journal of Environmental Management*, 2005(77), 291-300. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.06.014>
- Porto, R. L. L., Roberto, A. N., Schardong, A., & Mélo Júnior, A. V. (2003) Sistema de suporte a decisão para análise de sistemas de recursos hídricos. In R. C. V. Silva (Ed.), *Métodos numéricos em recursos hídricos* (cap. 2, pp. 93-240). Porto Alegre: ABRH.
- Prasad, A. S., Umamahesh, N. V., & Viswanath, G. K. (2011). Optimal irrigation planning model for an existing storage based irrigation system in India. *Irrigation and Drainage Systems*, 2011(25), 19-38. <http://doi.org/10.1007/s10795-011-9108-z>
- Read, L., Madani, K., & Inanloo, B. (2014). Optimality versus stability in water resource allocation. *Journal of Environmental Management*, 2014(133), 343-354. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.045>
- Ribeiro, M. M. R., & Lanna, A. E. L. (2003). A outorga Integrada das Vazões de Captação e Diluição. *RBRH*, 8(3), 151-168. <http://doi.org/10.21168/rbrh.v8n3.p151-168>
- Selvachandran, G., & Peng, X. (2019). A modified TOPSIS method based on vague parameterized vague soft sets and its application to supplier selection problems. *Neural Computing & Applications*, 31(10), 5901-5916. <http://doi.org/10.1007/s00521-018-3409-1>
- Shih, H. S., Shyur, H. J., & Lee, E. S. (2007). An extension of TOPSIS for group decision making. *Mathematical and Computer Modelling*, 45(7-8), 801-813. <http://doi.org/10.1016/j.mcm.2006.03.023>

- Silva, W. T., & Souza, M. A. A. (2023). Development of a multicriteria model for crises in urban water supply and its application to the case of Brasilia, Brazil. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 19(1), 99-113. <http://doi.org/10.1002/ieam.4671>
- Son, N. T., Jaafar, J., Aziz, I. A., Anh, B. N., Binh, H. D., & Aftab, M. U. (2021). A compromise programming to task assignment problem in software development project. *Computers. Materials & Continua*, 69(3), 3429-3444. <http://doi.org/10.32604/cmc.2021.017710>
- Tshibangu, W. A. (2015) Taguchi method or Compromise Programming as Robust Design optimization tool: the case of a flexible manufacturing system. In *Proceedings of the 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)* (pp. 485-492), Colmar. Setúbal: Science and Technology Publications. <http://doi.org/10.5220/0005547404850492>.
- Urtiga, M. M. B. A., Silva Filho, J. L., Guimarães, L. A., & Moraes, D. C. (2013). Modelo de alocação e negociação de recursos hídricos em regiões semiáridas. In *Anais do XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, Salvador. São José dos Campos: ABEPRO.
- Vichete, W. D., Mélo Júnior, A. V., & Soares, G. A. S. (2023). A water allocation model for multiple uses based on a proposed hydro-economic method. *Water*, 2023(15), 1170. <http://doi.org/10.3390/w15061170>
- Wang, L., Fang, L., & Hipel, K. W. (2008). Basin-wide cooperative water resources allocation. *European Journal of Operational Research*, 2008(190), 798-817. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.06.045>
- Xuan, W., Cui, Q., & Li, S. (2012). An optimal water allocation model based on water resources security assessment and its application in Zhangjiakou Region, northern China. *Resources, Conservation and Recycling*, 69, 57-65. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.09.005>
- You, J. J., Gan, Z., Gan, H., & Jia, L. (2011). Development and application of water allocation model based on ET-control. In *Risk in Water Resources Management: Proceedings of Symposium H03* (IAHS Publ., No. 347), Melbourne. London: International Association of Hydrological Sciences.
- Zeleny, M. (1973). Compromise programming. In J. L. Cochrane & M. Zeleny (Eds.), *Multiple criteria decision making* (pp. 263-301). Columbia: University of South Carolina Press.
- Zeleny, M. (1974). A concept of compromise solutions and the method of the displaced ideal. *Computers & Operations Research*, 1(4), 479-496. [http://doi.org/10.1016/0305-0548\(74\)90064-1](http://doi.org/10.1016/0305-0548(74)90064-1)
- Zeleny, M. (1982). *Multiple criteria decision making*. New York: McGraw Hill.

Contribuições dos autores:

Diego Reyes: pesquisa e revisão bibliográfica. uso de software. levantamento de informações e dados de campo. obtenção de resultados e análise de resultados. redação e revisão da redação.

Oscar de Moraes Cordeiro: estabelecimento da conceituação e da metodologia. obtenção de recursos para a pesquisa.

Welitom Tatom Pereira da Silva: elaboração de software. contribuição na obtenção dos resultados. revisão da técnica de consenso dos resultados.

Marco Antonio Almeida de Souza: estabelecimento da conceituação e da metodologia. obtenção de financiamento para a pesquisa. administração do projeto de pesquisa. orientação e supervisão do trabalho. obtenção dos resultados dos métodos multicritério. revisão e edição do texto.