



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
FACULDADE DE ECONOMIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ECONÔMICAS

ISMAEL BARROS DA SILVA

MODELOS HIDROECONÔMICOS:
UMA REVISÃO DA LITERATURA

Salvador
2023

ISMAEL BARROS DA SILVA

**MODELOS HIDROECONÔMICOS:
UMA REVISÃO DA LITERATURA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Ciências Econômicas da Universidade Federal da Bahia, requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Ciências Econômicas.

Área de concentração: Economia do Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Reinan Ribeiro Souza Santos

Salvador

2023

Ficha catalográfica elaborada por Valdinea Veloso Conceição CRB5-1092

S586 Silva, Ismael Barros da
Modelos hidroeconômicos: uma revisão de literatura / Ismael
Barros da Silva. _ Salvador: 2023

60f. il. fig. tab.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências
Econômicas) Faculdade de Economia, Universidade Federal da
Bahia

Orientador: Prof. Dr. Reinan Ribeiro Souza Santos

1.Modelos hidroeconômicos 2. Meio ambiente 3. Economia I
Santos, Reinan Ribeiro Souza II. Título III. Universidade Federal da
Bahia

CDD 333



COLEGIADO DO CURSO DE ECONOMIA
COMISSÃO DE COORDENAÇÃO DO TRABALHO MONOGRÁFICO
RELATÓRIO FINAL DE AVALIAÇÃO

2. PARECER DA BANCA EXAMINADORA

ALUNO: Ismael Barros da Silva

Às 16 horas do dia 18 de outubro de 2023, o aluno Ismael Barros da Silva apresentou sua monografia na plataforma digital Google Meet. Após a apresentação, a banca fez suas considerações. Após, a banca se reuniu privadamente no ambiente virtual e considerou o trabalho aprovado com nota 8,5. A banca sugere modificações na gramática e coesão textual.

BANCA EXAMINADORA:

PRESIDENTE: Prof. Dr. Reinan Ribeiro Souza Santos

1º MEMBRO: Prof Dr. André Luis Mota dos Santos

2º MEMBRO: Prof. Dr. Andrei de Lima e Silva

RESUMO

Os modelos hidroeconômicos se apresentam como sistemas que integram elementos de engenharia hidrológica e conceitos econômicos de demanda e custo da água. Diferente dos modelos de engenharia que minimizam custos financeiros, ou modelos econômicos como de equilíbrio geral, análise de lucro, análise de entrada e saída. Nos modelos hidroeconômicos a alocação de água é conduzida ou avaliada segundo os valores econômicos que ela gera. Esses modelos tendem a considerar inúmeras variáveis como a disponibilidade de água, a demanda por água, as atividades econômicas dependentes de água, as infraestruturas de armazenamento e distribuição de água, os custos associados à captação, tratamento e distribuição de água, os ambientais e sociais das decisões relacionadas à água, entre outros fatores. Este trabalho tem como finalidade uma revisão da literatura desses modelos, apresentado seus elementos, as opções de design, os tipos, as escalas, os softwares que tendem a serem utilizados, suas aplicações, os problemas que eles cobrem as consequências na esfera política e quais as dificuldades de implementação. A fim de alcançar este objetivo, foi realizada uma pesquisa bibliográfica de natureza científica entre os anos de 2000 e 2022. Foi possível descrever as características acerca das aplicações de modelos hidroeconômicos, além disso, notou-se que embora estudos e pesquisas que se utilizam de modelagem hidroeconômica tenha aumentado ao decorrer dos anos na literatura acadêmica, o mesmo não ocorre na sua aplicação entre profissionais e gestores de recursos hídricos que tendem a não adotar esses sistemas ou terem desconfiança sobre seus resultados.

Palavras-chave: modelos hidroeconômicos; engenharia; recursos; água.

ABSTRACT

Hydroeconomic models emerge as systems that integrate elements of hydrological engineering and economic concepts related to water demand and cost. Unlike engineering models that minimize financial costs or economic models such as general equilibrium, profit analysis, input-output analysis, hydroeconomic models allocate or assess water based on the economic values it generates. These models tend to consider numerous variables such as water availability, water demand, water-dependent economic activities, water storage and distribution infrastructures, costs associated with water capture, treatment, and distribution, as well as environmental and social impacts of water-related decisions, among other factors. The purpose of this work is to provide a literature review of these models, presenting their components, design options, types, scales, commonly used software, applications, the issues they address, the political consequences, and implementation challenges. To achieve this goal, a scientific literature review was conducted spanning the years 2000 to 2022. It was possible to describe the characteristics of hydroeconomic model applications. Additionally, it was observed that, despite an increase in studies and research utilizing hydroeconomic modeling in academic literature over the years, the same trend is not reflected in its application among water resource professionals and managers, who tend to either not adopt these systems or express skepticism about their results.

Keywords: hydroeconomic models; engineering; resources; water.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma da plataforma de modelagem Integrada	44
--	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Algumas escolhas para a construção de um modelo hidroeconômico.....	27
Quadro 2- Aplicações de modelagem hidroeconômica.....	34
Quadro 3 - Descrição de submodelos de Moraes (2003).....	42

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Função de demanda pela água	19
Gráfico 2 – Relação entre a curva de demanda e os benefícios brutos	20
Gráfico 3 - Representação gráfica genérica da elasticidade-preço da demanda	24

LISTA DE SIGLAS

IPCC	Intergovernmental Painel on Climate Change
PMP	Modelos de Programação Matemática
GAMS	General Algebraic Modeling System
ICMS	Sistema de Modelagem de Componentes Interativos
WAdss	Water Allocation Decision Support System
CALVIN	California Value Integrated Network
WAS	Water Allocation System
DSS	Sistema de Apoio à Decisão
PMP	Positive Mathematical Programing

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	CONCEITO E ORIGEM	16
2.2	ATRIBUTOS E FINALIDADE	18
2.3	A IMPORTÂNCIA DA ABORDAGEM ECONÔMICA	19
2.3.1	Definições econômicas para valoração e alocação de água	20
2.3.1.1	Valor econômico e os custos de produção da água	23
2.3.2	Abastecimento urbano de água	24
2.3.3	Demandas agrícolas, hidrelétricas, industriais, ambientais e recreativas	26
2.3.4	Custos de produção	28
2.4	PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE MODELOS HIDROECONÔMICOS	28
2.4.1	Elementos do modelo	29
2.4.2	Opções de design e elaboração do modelo	30
2.4.2.1	Diferença entre otimização e simulação	32
2.4.2.2	Modelos determinísticos e estocásticos	33
2.4.2.3	Integração de submodelos	34
2.4.2.4	Os domínios que abrangem a escala de modelagem	36
2.4.2.5	Modelagem através de metas ambientais e sociais	36
2.4.2.6	Os softwares utilizados	37
2.4.2.7	Representação do design e estudo	37
2.5	APLICAÇÕES DE MODELAGEM	38
2.6	CONSEQUÊNCIA DO USO NA ESFERA POLÍTICA	44
2.7	DIFICULDADES DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO	45
2.8	MODELOS HIDROECONÔMICOS NO BRASIL	46
3.0	CONCLUSÃO	52

REFERÊNCIAS

1 INTRODUÇÃO

A preocupação acerca do aumento da demanda por água vem aumentando ao longo dos anos em virtude de diversos fatores como o aumento populacional, as mudanças climáticas e a degradação na qualidade da água. Em relatório divulgado pela UNESCO (2021) é exposto que o uso global de água doce aumentou seis vezes nos últimos cem anos e, desde a década de 1980, continua a crescer a uma taxa de cerca de 1% ao ano¹. A razão para essa elevação na demanda por água seria originada da combinação de crescimento populacional, desenvolvimento econômico e mudanças nos padrões de consumo. São temas de debates políticos, situações associadas a eventos extremos como inundações e fenômenos como o estresse hídrico¹. A preocupação acerca da gestão dos recursos hídricos, a manutenção da oferta e demanda está entrelaçada a como será o impacto de tal gerência sobre inúmeros setores da economia. Medidas que visem combater inseguridades que permeiam o acesso e a distribuição de água terão impacto direto na renda e no acesso da população a esse recurso. Tal afirmativa pode ser comprovada através do relatório sobre perspectivas econômicas globais do Banco Mundial (2016), que tinha como estimativa o panorama ao qual as regiões que fossem afetadas pela escassez de água poderiam visualizar suas taxas de crescimento cair até 6% do PIB até 2050. Essa queda seria derivada da perda em setores como a agricultura, saúde, renda e na propriedade. Essa situação, pela ótica da instituição financeira, levaria a um crescimento negativo sustentado.

O relatório da UNESCO (2017) prevê que até o ano de 2050, mantendo se o cenário atual, ou seja, não havendo nenhum tipo de modificações, o mundo precisaria aproximadamente de 60% mais alimentos, e que a produção baseada na irrigação aumentaria mais de 50%. O órgão ainda reconhece que não há disponibilidade (no lado da oferta) no tocante ao recurso hídrico para se chegar a esse aumento na produção dos alimentos.

¹ O fenômeno denominado estresse hídrico ocorre quando a demanda de água por habitante (mg0/h) é superior a capacidade que pode vir a ser ofertada por um corpo hídrico. Mekonnen e Hoekstra (2016) estima que 4 bilhões de pessoas vivem em áreas que sofrem grave escassez hídrica por pelo menos um mês ao ano.

Para Jiménez- Cisneros (2015) a ocorrência de variações climáticas interfere e altera o ciclo hidrológico, ocasionando alguns impactos e riscos que possuem uma correlação de dependência com condutores não climáticos de mudança e soluções do gerenciamento da água. A situação proveniente da contração na disponibilidade para abastecimento de água ou aumento da sua demanda, segundo o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2014), advém dos condutores não climáticos, como o aumento populacional, o desenvolvimento econômico, a urbanização e o uso da terra. Assim, subentende-se que a disponibilidade de água está vinculada a impactos ocasionados por mudanças de ordem climatológica e de utilização do solo. Visando garantir uma melhor distribuição de tal recurso, esses efeitos citados acima devem ser averiguados com o intuito de estabelecer formas ou alternativas de aperfeiçoar sua alocação.

Alguns modelos surgem com o propósito de melhorar essa alocação. Como os modelos hidroeconômicos.

Nas palavras de Emanoella et al. (2021)

(...). Em outras palavras, a modelagem hidroeconômica é guiada pela maximização dos benefícios econômicos, mas sujeita às regras de operação do sistema. Trata-se, pois, de um problema de otimização condicionada (EMANOELLA et al., 2021, p.2).

São modelos que ajudam a analisar as restrições físicas do sistema hídrico e a complexidade das decisões econômicas, trazendo mudanças nos comportamentos dos usuários e, conseqüentemente, com alocações mais eficientes.

Os modelos hidroeconômicos representam sistemas de recursos hídricos espacialmente distribuídos, infraestrutura, opções de gestão e valores econômicos de forma integrada. Nessas ferramentas, a alocação e a gestão da água são orientadas pelo valor econômico da água ou avaliadas por essa medida para fornecer visões de políticas e revelar oportunidades para uma melhor gestão. Um conceito central é que as demandas de água não são requisitos fixos, mas sim funções onde as quantidades de uso de água em diferentes momentos têm valores econômicos totais e marginais variados. (HAROU et al., 2009, p.628).

Trata-se de uma forma de desenvolvimento sustentável sobre o uso dos recursos hídricos. Segundo Silva (2017) a gestão integrada de recursos hídricos deve-se privilegiar de uma

integração de instrumentos regulatórios e econômicos, criando sinergias e diminuindo os conflitos, para contribuir para uma alocação intersetorial que viabilize o desenvolvimento econômico com sustentabilidade. O desenvolvimento sustentável, que incorpora estratégias ambientalmente mais adequadas e, ao mesmo tempo, busca um desenvolvimento socioeconômico mais equilibrado, tem um caráter instrumental de ações estruturantes de um novo modelo de crescimento econômico, que maximiza os resultados socioeconômicos e minimiza os impactos ambientais.

Cai et al. (2003) afirma que os modelos hidroeconômicos tem como proposta a substituição da demanda fixa por uma função endógena, que seguirá um comportamento diferente para cada usuário conforme o preço da água. Com a incorporação do viés econômico e seus conceitos, o valor da água tende a normalizar as relações de uso, fundamentado em seu próprio valor.

De acordo com Cardwell et al. (2006), a alocação de água nos modelos hidroeconômicos tende a ser realizada mediante um objetivo já traçado e pré-estabelecido. Em momentos de escassez, onde a demanda é superior à oferta do recurso hídrico, os modelos hidroeconômicos funcionam como uma ferramenta que pode nortear a uma distribuição eficiente e transparente de alocação da água.

Com intuito de analisar a origem dos modelos hidroeconômicos, seus elementos, os tipos de design, os softwares que tendem a ser utilizados, quais aplicações podem ser feitas, quais problemas podem ser explicados, como sua implementação é vista dentro da esfera política e quais os exemplos de aplicação já realizados no Brasil e no exterior.

O trabalho está estruturado em três capítulos, incluindo esta introdução, que propôs, de forma sucinta, contextualizar o tema de maneira geral.

O segundo capítulo conta com a revisão bibliográfica, que será dividida em oito seções: a primeira traz o conceito acerca dos modelos hidroeconômicos e suas primeiras aparições, a segunda trata da finalidade de tais modelos, a terceira demonstra a importância da abordagem econômica e seus conceitos econômicos, a quarta seção apresenta como é feita a implementação dos modelos hidroeconômicos, a quinta demonstra exemplos de modelos já realizados e documentados na literatura, a sexta seção descreve quais são as consequências no

âmbito político, a penúltima seção relata as dificuldades de implementação de tais modelos, e a última seção expõe alguns modelos hidroeconômicos no Brasil.

O terceiro e último capítulo é a conclusão, que revela os principais resultados encontrados ao decorrer da pesquisa, e faz uma reflexão acerca da importância do estudo acerca da modelagem hidroeconômica e suas propostas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCEITO E ORIGEM

Os modelos hidroeconômicos representam uma integração entre a engenharia e a economia dos recursos hídricos, com aspectos hidrológicos da engenharia, ambientais da modelagem dos recursos hídricos e econômicos de escala regional dos sistemas de recursos hídricos em uma estrutura que seja coerente. Esse comportamento de integração entre as áreas sempre existiu, segundo Lund et al. (2006).

Os engenheiros tradicionalmente avaliam os custos de construção, operação e manutenção de abastecimento de água, transporte, armazenamento, esgoto, drenagem e infraestrutura de reutilização de águas residuais e estimam as necessidades de água. Em modelos de sistema não econômicos, as demandas de água são comumente representadas por “requisitos” fixos de água ou metas de entrega. [...] Os modelos hidroeconômicos diferem de outros modelos econômicos ou de engenharia. A alocação de água é impulsionada ou avaliada pelos valores econômicos que ela gera, muitas vezes com transferências, compra e venda entre os usuários. Ao contrário dos modelos econômicos que envolvem a água, como otimização dinâmica dos estoques de água subterrânea, modelos de equilíbrio geral da economia, análise de entrada-saída, análise de custo-benefício, etc, as variações listadas anteriormente do termo “hidroeconômico” foram usadas para modelos que representam todos os principais aspectos hidrológicos e de engenharia espacialmente distribuídos do sistema. As representações incluem componentes do balanço hídrico, como flocos de rios, evaporação de corpos d’água, superficiais, recarga e descarga natural de águas subterrâneas e fluxos de retorno. A infraestrutura e as operações relevantes de abastecimento de água podem incluir canais, reservatórios, estações de dessalinização, estações de tratamento de águas e águas residuais, estações de bombeamento de águas subterrâneas ou de condutas, bacias artificiais de recarga e outras infraestruturas bancárias de águas subterrâneas. Esses recursos hidrológicos e de engenharia estão incluídos em uma rede matemática nó-link, onde as demandas econômicas têm localizações (nós) e os custos (ou benefícios) são incorridos nos links. A rede acomoda tanto sistemas físicos quanto econômicos distribuídos espacialmente, e é o elemento integrador dos modelos hidroeconômicos. (HAROU et al., 2009, p.628).

De acordo com Harou et al. (2009) a junção de elementos e princípios econômicos por parte dos engenheiros ocorreu durante os séculos XIX e XX, com foco na análise de sistemas. Ele afirma que a otimização propiciou a ligação matemática entre as áreas de economia e engenharia. Essa alegação pode ser representada através dos modelos de otimização voltados a melhor alocação de recursos hídricos.

Nas palavras de Santos (2020).

Modelos de otimização para apoio a alocação de recursos hídricos são modelos matemáticos que maximizam ou minimizam uma função-objetivo específica para fornecer valores das variáveis de decisão que são os valores alocados, simultaneamente, em todos os períodos, considerando todos os fluxos relativos ao horizonte de tempo em análise. Este horizonte em análise, em geral, não se constitui em longos períodos (SANTOS, 2020, p.55).

Na literatura é apresentado dois tipos de otimização. Esses tipos são relatados por Santos (2020), como a hidrológica (*hydrology-inferred*) onde a função objetivo empregue na deliberação acerca da alocação intersetorial se origina de especificações hidrológicas, e a econômica que faz uso do princípio microeconômico da equimarginalidade.

Esse princípio, também conhecido como a segunda lei de Gossen (1854) afirma que no papel de consumidores, nosso consumo deve ser organizado de modo que cada bem individual garanta a mesma utilidade marginal por unidade monetária de despesa. Além desses critérios, os de equidade e qualidade ambiental podem também ser inseridos aos modelos de otimização por intermédio de restrições.

Modelos de otimização que visam uma alocação ótima do recurso hídrico podem seguir critérios de ordem econômica ou de engenharia. Para economia, a alocação de água deve ser realizada com enfoque na maximização dos benefícios econômicos. O princípio da equimarginalidade é condição de primeira ordem. O que contrapõe os parâmetros de engenharia onde a alocação de água é feita de forma igualitária mediante a disponibilidade do recurso hídrico, não efetua-se uma diferenciação entre os tipos ou maneiras de uso.

Na tentativa de estabelecer quando se deu início a modelagem hidroeconômica é possível encontrar o uso de curvas de demanda econômica de água com o intuito de otimizar sistemas de recursos hídricos que remetem as décadas de 1960 e 1970. Harou et al. (2008), revela que tais aplicações ocorreram em regiões áridas como Israel e o sudoeste dos Estados Unidos. Seus idealizadores foram os engenheiros Bear et al. (1964; 1966; 1967; 1970), Rogers e Smith (1970) e Gisser e Mercado (1972, 1973). Mas foi Bear et al. (1966) que deu início a uma estrutura conceitual para modelos integrados de gestão hídrica de ordem e escala regional. Nesses modelos a água é alocada e gerenciada com o intuito de maximizar os benefícios

líquidos derivados das curvas econômicas de demanda hídrica. Ao longo dos anos os pesquisadores vêm utilizando diferentes nomenclaturas para se referir a esses tipos de estrutura de modelagem. Como os termos: hidrológico-econômico (GISSER; MERCADO, 1972), hidroeconômico (NOEL; HOWITT, 1982) e econômico-hidrológico –agrônômico (LEFKOFF; GORELICK, 1990b).

2.2 ATRIBUTOS E FINALIDADES

Diferente dos modelos de engenharia que minimizam custos financeiros, ou modelos econômicos como de equilíbrio geral, de análise de lucro, análise de entrada e saída, dentre outros. Nos modelos hidroeconômicos a alocação de água é conduzida ou avaliada conforme os valores econômicos que a alocação gera. São modelos que agregam todos os principais elementos de hidrologia e engenharia ordenados espacialmente.

Em sua estrutura estão presentes componentes do balanço hídrico, como os fluxos de rios, evaporação de corpos d'água, recarga e descarga natural de águas subterrâneas e fluxos de retorno. Já as infraestruturas e operações relevantes de abastecimento de água podem conter canais, reservatórios, estações de dessalinização, estações de tratamento de água, estações de bombeamento de águas subterrâneas, dentre outras infraestruturas de bancos de água.

Esses recursos apresentados de hidrologia e engenharia estão presentes no que denomina se uma rede *nó-link*. Moraes et al. (2006) descreve um exemplo de composição dessa rede no seu artigo denominado “Gestão de recursos hídricos usando modelagem econômico-hidrológica integrada na identificação de alocação ótima de água entre usos múltiplos”.

O modelo elaborado na UFPE representa a bacia hidrográfica como um todo, através de uma rede de nós e links (ROSEGRANT; RINGLER et al., 2000), nos quais os nós representam entidades físicas e os links, as conexões entre essas entidades. Os nós podem ser de dois tipos: os nós-fonte, que representam entidades físicas tais como: rios, reservatórios, águas subterrâneas, etc; e os nós-demanda, que podem ser: agroindústrias, cidades, pequenas centrais hidroelétricas - PCHs, etc. Há também os nós de demanda por efluentes, que são as áreas plantadas de cana ao longo do curso d'água em que se lançam efluentes do processo industrial das destilarias, na chamada fertirrigação. Os links entre os nós podem representar captações de usuário e lançamentos (MORAES ET AL, 2006).

É importante salientar que os recursos hídricos se dividem em água bruta (água do rio) e água

tratada (água encanada). Santos (2020) demonstrou a variação percentual de produção como consequência de uma variação do recurso hídrico utilizando uma metodologia que interliga a modelagem de otimização de recursos hídricos a uma matriz insumo produto inter-regional de nível municipal com 75 regiões e 76 setores no estado de Pernambuco. Na sua tese de doutorado nomeada de: “Acoplamento de modelo de alocação de água baseado em rede à modelagem de insumo produto: uma proposta metodológica e aplicação em bacias hidrográficas interligadas do agreste pernambucano”.

O que diverge modelos hidroeconômicos de modelos puramente de engenharia é o fato dos modelos hidroeconômicos além de incluírem o valor da água para a economia (para setores como agricultura, indústria, empresas e energia) incorporam também os custos/benefícios. A finalidade dos modelos estritamente de engenharia é a maximização do lucro (um exemplo a ser citado é uma operação hidrelétrica) ou o corte de custos de capitais e operacionais. Os modelos hidroeconômicos podem divergir entre si, principalmente os modelos mais simples que não consideram a variabilidade climática, a qualidade da água e o uso da terra. Podem ainda se contrapor em escala, duração e nível de detalhes (variáveis). Alguns exemplos de modelos que podem ser citados são: o HEC-RAS, SWAT, MODFLOW e WEAP.

2.3 A IMPORTÂNCIA DA ABORDAGEM ECONÔMICA

De acordo com Young (2005) embora muitos críticos se oponham ao uso da economia como instrumento de gerenciamento da água. Tal ciência pode ser um instrumento compatível ao tentar regular a demanda da água além das necessidades humanas básicas, ou seja, ao tentar administrar o uso do recurso hídrico em outros setores.

Como a ótica econômica auxilia as entidades gestoras de recursos hídricos difere da visão anteriormente estabelecida, pois tal recurso é contemplado a partir de sua natureza de escassez, sendo assim a demanda pelo bem que antes era um requerimento fixo, torna se variável estabelecida por valor econômico (MORAES et al., 2018; HAROU et al., 2009).

Essa natureza de recurso escasso traz a necessidade de uma gestão e alocação eficiente. Na literatura econômica a busca por tal grau de gerenciamento nos leva a eficiência de Pareto, que ocorre quando uma alocação de água já não pode fornecer mais ganhos na produção ou satisfação sem conjuntamente gerar uma perda. Essa eficiência de Pareto ainda foi

classificada por Griffin (2006) em neutra (Pareto front) e eficiência agregada (que visa maximizar os benefícios líquidos independentemente da distribuição) a intenção do economista era incorporar a equidade (gerada pelas preferências sociais) na busca da eficiência. O mesmo queria demonstrar que a economia além de avaliar equidade e eficiência pode a vir a promovê-las também.

A importância da abordagem econômica também está registrada na declaração de Dublin de 1992.

A água tem um valor econômico em todos os seus usos concorrentes e deve ser reconhecida como um bem econômico. Dentro deste princípio, é vital reconhecer primeiro o direito básico de todos os seres humanos de ter acesso à água potável e saneamento a um preço acessível. A incapacidade passada de reconhecer o valor econômico da água levou a usos desperdícios e prejudiciais ao meio ambiente do recurso. A gestão da água como bem econômico é uma forma importante de conseguir uma utilização eficiente e equitativa e de incentivar a conservação e a proteção dos recursos hídricos (ONU, 1992).

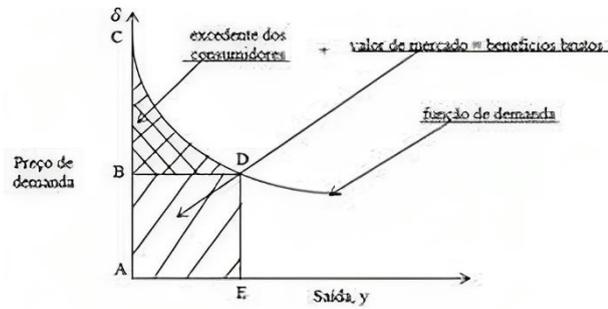
2.3.1 Definições econômicas para valoração e alocação de água

Para se entender melhor os modelos hidroeconômicos é necessário compreender alguns conceitos de economia aplicada à gestão da água.

O primeiro conceito a ser abordado será a alocação eficiente de água. Tal conceito está ligado aos valores e custos do uso da água que sofrem variações conforme as quantidades não se mantendo fixos. É importante entender que em períodos de ocorrência de seca um recurso como a água se torna mais valioso, fazendo com que os custos de abastecimento aumentem de forma desproporcional ao aumentar a produção, se todas as vias e fontes de exploração já estiverem sendo exploradas.

De acordo com Harou et al. (2009) essa situação é comum em modelos tradicionais de planejamento hídrico, pois tais projetos assumem metas fixas de uso da água independente de valores e custos. Buscando exemplificar essa relação, Harou et al. (2018), traz um exemplo através do gráfico abaixo.

Gráfico 1 – Função de Demanda que consiste no preço (disposição a pagar) pela água em diferentes quantidades.



Fonte: (HAROU et al. (2008) *apud* BEAR et al., 1964). Adaptado.

O gráfico 1 representa a curva de demanda pelo recurso hídrico, na abscissa está o quantitativo de água e na ordenada está o preço do recurso hídrico, podemos observar que quanto menor a quantidade de água maior o preço de demanda. A ordenada representa o preço unitário ou a disposição marginal a pagar, enquanto na abscissa é a quantidade disponível.

Desta forma, uma curva de demanda mais inclinada significa que o uso da água responde menos a alterações de preços (baixa elasticidade de preço) e o valor do usuário destinado ao uso da água é muito sensível à disponibilidade do recurso hídrico. As curvas de demanda são utilizadas para descrever a disposição a pagar dos diferentes usuários de água e conseqüentemente a representação do seu benefício econômico.

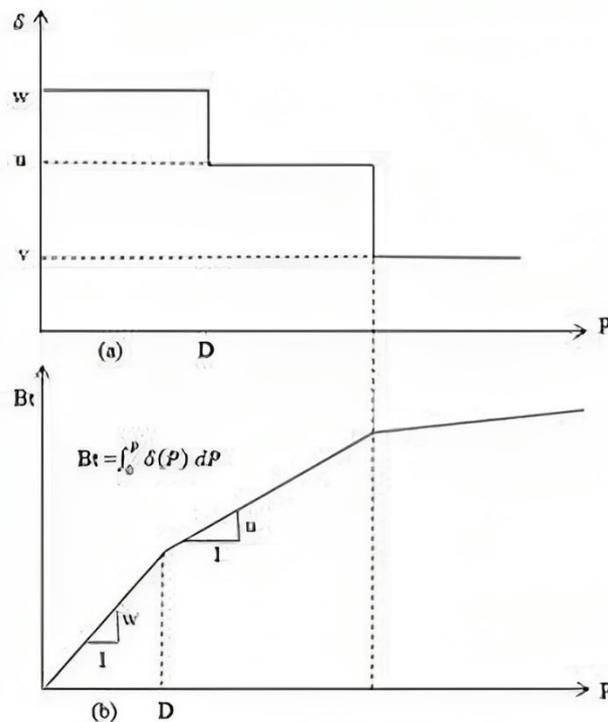
Como a demanda por água pode sofrer alterações devido a fatores como: localização, tipos de uso da água (para atividades agrícolas, indústrias e abastecimento humano), condições hidrológicas, etc. Os modelos hidroeconômicos podem fazer uso de mais de uma curva por modelo.

Antes de exibir a quantificação dos benefícios econômicos brutos derivados a partir da alocação de água por meio da integração da curva de demanda. É importante mostrar no que consiste esses benefícios.

No gráfico 1 temos o valor de mercado representado pela área ABCDE, e o excedente do consumidor pela área BCD, a soma de ambos resulta nos benefícios econômicos brutos de um “water delivery” (entrega de água). A quantificação de tais benefícios também foi

exemplifica por Harou et al. (2008) no gráfico abaixo.

Gráfico 2 – Relação entre a curva de demanda (a) e os benefícios econômicos brutos (b)



Fonte: Adaptado de Harou et al. (2008) apud Bear et al., (1964).

No graf. 2 os benefícios brutos são representados por Bt . Sendo que P é a quantidade de água, e δ a disponibilidade de pagar. Temos a presença de uma função em degrau que é a curva de demanda (a) constituída de dois pontos de dados. Quando essa função é integrada, (b) é linear por partes.

Segundo Harou et al. (2009) se a curva de demanda do gráfico 1 fosse integrada a função de benefício econômico seria suave (reta). Contudo, em ambos os casos os benefícios exibem retornos marginais decrescentes (benefícios diminuem à medida que a quantidade de água aumenta).

Desta forma, as funções de demanda podem ser utilizadas para alocar água em setores que visem a usufruir da maneira mais produtiva tal recurso. A alocação econômica ótima de água busca maximizar o benefício econômico líquido agregado (o valor) do uso da água no sistema. Uma maneira de elaborar a função objetivo é criá-la de maneira parecida a um problema de minimização de custos. Onde os custos modelados agregariam os benefícios do uso da água perdida (escassez) e os custos operacionais.

Aqui presenciamos outro conceito econômico fundamental. O conceito de marginalidade

que visa demonstrar o benefício ou custo de uma unidade de recurso, ou produto adicional. A equidade marginal presente na microeconomia assegura que em uma alocação ótima entre setores cada setor deriva a mesma utilidade da última unidade de recurso alocada. Contudo, Cai (2008), afirma que tal equidade não se mantém em todos os períodos locais, pois é limitada a inúmeras condições dinâmicas.

2.3.1.1 Valor econômico e os custos de produção da água

De acordo com Young (2005) a utilização de abordagens ou métodos alternativos na estimação do valor econômico da água advém do fato dos mercados deste recurso na maioria das vezes serem ausentes, ou ineficientes. O parecer sobre as abordagens e resultados está vinculado aos serviços de água a serem avaliados. Assim como qual o motivo que estabelece essa demanda avaliativa. A valoração da água pode acontecer a partir das perspectivas de oferta ou demanda, gerando uma curva de oferta ou uma curva de demanda por água.

Griffin (2006) afirma que para a maioria dos gestores de recursos hídricos, o valor econômico da água retrata o capital (investimento) e os custos operacionais através de uma curva de custo de abastecimento. Esse cálculo de custo é geralmente feito por economistas ou engenheiros.

A contribuição econômica está vinculada a indução de uma ótica avaliativa a partir da perspectiva da demanda. A valoração pode ser realizada de formas diferentes, pois está vinculada a como o recurso hídrico é classificado. A água pode ser considerada como um bem intermediário ou um bem final. Essa classificação infere na classificação de demanda derivada ou demanda final.

A demanda derivada ocorre quando a água é classificada como um bem de uso intermediário. Essa categorização é submetida quando o recurso hídrico torna-se um insumo utilizado no processo de produção, como na geração de energia hidrelétrica ou irrigação. E tem sua demanda derivada da demanda para o produto final.

A modelagem de gestão regional classifica a demanda final como o uso da água com fins residenciais ou recreativos. Para Hanemann (1998) essas diferenças de classificação são

vitais na hora de escolher o método avaliativo. Pois nesses casos as diferentes teorias econômicas (de demandas do consumidor e do produtor) são aplicáveis a cada caso. Entende-se que a água como bem final fornece uma utilidade direta aos consumidores, e estes dispõem de uma quantia específica a ser gasta nesse recurso. Ao realizar uma estimativa de valor econômico da água para bens intermediários é necessário entender que a demanda de água terá influência direta da tecnologia que gera os bens finais e da demanda final do produto final. Desta forma tal estimação consiste em isolar a contribuição marginal da água para o valor total da produção denominado valor residual.

Kindler e Russel (1984) estabeleceram duas técnicas de modelar a demanda de água. As técnicas de valoração indutiva e dedutiva. A primeira é realizada a partir da análise econométrica ou estatística dos dados analisados com o intuito de estimar uma resposta ao preço. Já a segunda se utiliza de programação matemática (otimização). A diferença dos métodos está no fato que as técnicas indutivas (métodos econométricos) são excessivas em dados e as dedutivas (modelos de otimização) são intensivas na computação.

2.3.2 Abastecimento urbano de água

A água distribuída para consumo humano de forma canalizada é o resultado do processo de tratamento da água bruta, realizado por intermédio de uma sistemática de abastecimento, que origina despesas e custos com toda a infraestrutura física que viabiliza a entrega da água tratada, dentro dos padrões determinados para o consumo. De acordo com Maddaus (1987) podemos dividir os usos da água em consumo residencial urbano em dois tipos: usos internos e usos externos. O externo resulta da regagem, jardins, lavagem de carros, etc. Já o interno refere-se ao consumo doméstico. Contudo, essas demandas são realizadas com base em estimativas segundo Sanchez (2007) o que dificulta uma melhor análise.

Para Harou et al. (2009), desde o trabalho de Howe e Linaweaver (1967) denominado “*The impact of price on residential water demand and its relationship with system design and pricing structure*” os economistas vêm se preocupando em avaliar respostas ao preço e benefícios marginais do abastecimento urbano de água.

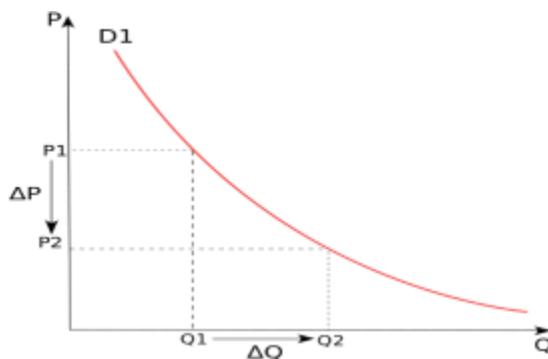
Arbues et al. (2003) afirma que métodos econométricos voltados para estimar respostas ao preço e os benefícios marginais para os consumidores tem sua origem desde estudos de Howe

e Linaweaver (1967). Nessas abordagens a utilização de dados transversais, séries temporais e dados em painel são normais. Contudo, Dalhuisenet al. (2003) infere que ocorrem debates acerca da estrutura do modelo, discussões sobre que variáveis inserir além das já utilizadas normalmente que são a quantidade e preço.

Para Young (2005) o problema de simultaneidade é um desafio para as estimativas econométricas de elasticidade – preço da água. Devido às tarifas por bloco, o nível de desagregação, além do tamanho do conjunto de dados e a especificação do preço. Aqui observamos outro conceito econômico fundamental, o de elasticidade – preço, que teve origem com o economista inglês Alfred Marshall em 1890 no seu manual “*Principles of Economics*” (Princípios de economia). A elasticidade- preço é a variação percentual no consumo por variação percentual no preço. Sua representação pode ser observada abaixo através de sua fórmula e gráfico.

Gráfico 3 – Representação gráfica genérica da elasticidade-preço da demanda

$$\varepsilon_p = \frac{\% \text{variação na quantidade demandada}}{\% \text{variação no preço}} = \frac{\Delta Q_d / Q_d}{\Delta P / P}$$



Fonte: Rankia.com (2023).

Segundo Griffin e Chang (1991) métodos econométricos tradicionais possuem em sua estrutura uma variável de preço marginal, uma variável de diferença *Taylor-Nordin*, além de demográficos e dados climáticos que operam como repressores para o uso da água. Estudos de Espey et al. (1997) afirmam que as estimativas de elasticidade- preço da demanda de água possuem uma variação de zero a quase dois em termos de valor absoluto.

Embora muitos estudos tenham sido realizados para estimar os custos econômicos da escassez urbana de água através de modelos de otimização como os de Lund (1995) e Alcubilla e Lund (2006). A falta de dados sempre foi um fator inibidor de expansão de pesquisas. Assim, o método de expansão de pontos caracterizou-se como uma forma mais acessível de representar a curva de demanda residencial em modelos hidroeconômicos.

A metodologia desse procedimento consistia em usar os dados sobre o preço observado e a água a esse mesmo preço, além de realizar uma estimativa sazonal de elasticidade-preço de longo prazo dessa demanda. Depois torna-se necessário calibrar os parâmetros para uma forma funcional de dois parâmetros e solucionar os sistemas resultantes.

2.3.3 Demandas agrícolas, hidrelétricas, industriais, ambientais e recreativas

O maior consumo humano de água vem da irrigação. Young (2005) afirma que a literatura em relação à derivação de curvas de demanda de água para agricultura e elasticidade-preço é vasta. Como exemplos têm os trabalhos de Daré (2013) intitulado: Caracterização da demanda de água em sistemas de irrigação na bacia do córrego sossego em Itarana-ES, e de Silva (2019) nomeado de: Modelagem da demanda de água de abastecimento para cidade de Pirassununga-SP. É importante entender que as demandas de água para irrigação são demandas derivadas, devido à natureza (de insumo) da água no processo produtivo. Scheierling et al. (2006) assegura que os valores médios e medianos das elasticidades – preço da água de irrigação habitam no intervalo inelástico. Funções de produção da água podem ser obtidas através das informações sobre a produtividade agrícola. A primeira derivada parcial dessas funções em relação à entrada de água (produto físico marginal) pode ser utilizada para distintas quantidades de água. Já a curva de demanda (valor marginal) obtém-se através da multiplicação das produtividades fiscais marginais pelos preços estabelecidos das safras. A decisão dos agricultores sobre o tempo de cultivo ou qual tecnologia de irrigação utilizar influenciam diretamente na demanda da água.

Existe dentro da literatura diversos Modelos de Programação Matemática (PMP) que tentam simular as decisões do agricultor ao nível do tamanho da fazenda ou áreas de irrigação. Na maioria deles ocorre a maximização do lucro ou da receita bruta. Esses modelos ajudam a calibrar os modelos de otimização na intenção de apresentar as decisões do agricultor a serem observadas.

As demandas de água para irrigação na maioria das vezes são demonstradas através de modelos hidroeconômicos que se utilizam de equações lineares ou quadráticas por partes, geradas exogenamente, ao relacionar a aplicação de água a aspectos econômicos.

Booker e Young (1994) através de estudos de modelagem que tiveram como objeto o rio Colorado nos EUA, afirmam que por intermédio de uma técnica denominada de custo alternativo é possível compreender os benefícios da produção de energia elétrica. A metodologia dessa ferramenta basicamente é comparar o custo da energia hidrelétrica com outra alternativa de produção de energia menos custosa. Derivando-se a quantidade de energia produzida e o preço de mercado da energia, podem-se obter também as funções de benefício. Contudo, a energia produzida depende alguns fatores como: a vazão da usina, da carga hidráulica e da eficiência da turbina e gerador.

Diaz et al. (2000) demonstra que através de uma função linear do armazenamento do reservatório é possível retratar a carga hidráulica. Porém, alguns fatores, segundo Harou et al. (2009) dificultam a análise econômica acerca da energia hidrelétrica. Entre eles estão a desregulamentação e descentralização do mercado de energia e o aumento dos compromissos de energia contratada.

No tocante ao uso de água nas indústrias Renzetti (2002) estabelece que tal elasticidade da demanda varia de forma similar aos usos urbanos comerciais, ocorre uma diferenciação entre os tipos de indústrias. A demanda industrial pode ser retratada através de uma função de perda de produção linear, estabelecida pelo consumo atual. Essa caracterização da demanda já foi utilizada em alguns trabalhos, como o estudo de Jekins et al. (2001,2003) denominado *“Improving California Water Management: Optimizing Value and Flexibility”* cujo objetivo era sugerir uma abordagem diferente na gestão de água no estado da Califórnia através de uma modelagem de otimização.

A classificação dos valores hídricos para recreação, como, por exemplo, para um rio segundo Colby (1990) tendem e podem ser abordadas pela ótica comparativa de valores de uso tradicionais. Por outro lado, os benefícios do uso ambiental são rotulados a partir das escolhas de gastos dos consumidores e suas perspectivas acerca dos valores conferidos aos serviços

ambientais. A valorização ambiental, na visão de Braden (2000) expressa em seu estudo “*Value of valuation: introduction*” “é uma arte imperfeita”, pois depende muito de interpretações e debates. Porém, em modelos hidroeconômicos onde estão presentes restrições de fluxos mínimos e dentro desses os valores de sombra. Torna se possível obter o custo de oportunidade da água ambiental.

2.3.4 Custos de produção

Os custos de produção de água são apresentados por Harou et al. (2009) como custos para bombear, tratar e melhorar a qualidade da água. Além desse ainda existem os custos fixos e de capital para infraestrutura e operações. Os modelos hidroeconômicos na maioria das vezes são planejados com o enfoque em gerenciamento e devido a este propósito incluem em sua estrutura apenas custos operacionais variáveis da infraestrutura existente. Ao se pensar na utilização de programação linear e não linear é necessário que os custos variáveis sejam convexos (na maioria das vezes acontece devido a retornos decrescentes de escala) com o intuito de garantir uma solução ótima global.

Entretanto, ao visar um planejamento de expansão da capacidade, a utilização desse tipo de programação é impossibilitada. Nesse tipo de projeto os custos fixos e de capital teriam que ser considerados. No entanto, esses tipos de custos geralmente não são convexos. Em virtude de os custos marginais de instalação ser descontínuos e decrescentes.

Na literatura existem maneiras de incluir esses custos. Dois exemplos seriam o trabalho de Moura (2011) intitulado de “Os custos totais da água como um bem econômico e social no município da Praia (Cabo Verde)” e o de Francisco e Morales (2018) nomeado de “Contribuição para análise dos custos no tratamento da água utilizando programação linear *fuzzy*: um modelo para o gerenciamento do abastecimento do município de Campos (RJ). A maioria dos estudos como o de Fisher et al. (2008) apontam que as decisões de expansão devem ser tidas como cálculo secundário fora do processo de otimização.

2.4 PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE MODELOS HIDROECONÔMICOS

Ao modelador se apresentam muitas escolhas durante a construção de um modelo, entre elas decisões a respeito da formulação matemática e da escolha do melhor algoritmo. O modelo

deve ser capaz de responder a questionamentos e fornecer ideias para gestores de recursos e formuladores de políticas. O modo como o design do modelo é produzido afeta diretamente os tipos de resultados obtidos.

2.4.1 Elementos do modelo

Existem elementos comuns na maioria dos modelos hidroeconômicos, como fluxos hidrológicos, demandas econômicas de água, infraestrutura de gerenciamento de água, custos operacionais, etc. A aparição da modelagem de recursos hídricos remete a estudos de Maass et al. (1962) onde a utilização de redes de armazenamento e nós de junção que se agrupam por elos de transportes para representar trechos de rios, canais e dutos, apareciam como elementos pertencentes aos modelos. Essa configuração de rede se demonstra eficiente e estável para modelos de simulação e otimização.

Modelos de circulação global em escala reduzida, retratando mudanças de ordem climática, podem ser utilizados como forma de apresentar cenários hidrológicos diferentes. Na ausência de dados históricos, as aplicações de modelos hidrológicos calibrados podem solucionar esse hiato. Esses modelos se apresentam como a principal fonte de fluxos não controlados, como evaporação e escoamento local.

Entre os elementos citados acima está a infraestrutura de gerenciamento de água. Que consiste em instalações naturais e elaboradas para armazenar, transportar, tratar e usar a água, como é caso de trechos de rios, canais, dutos, reservatórios, aquíferos, bombas, estações de tratamento, bacias de recarga e demanda de águas locais de captação, dentre outros. Cada elemento apresenta a especificação de sua capacidade mínima e máxima além dos custos operacionais.

De acordo com Harou et al. (2009) a utilização de dados e topologia de redes de modelos já existentes é uma forma eficiente e confiável de produzir um modelo hidroeconômico. Pois modelos de simulação calibrados e armazenados por instituições de gestão de recursos hídricos comprovam ser uma base ideal para modelos de gestão mais abstratos.

Para Bear et al. (1964) a representação das demandas econômicas de água podem ser feitas por funções que fornecem os benefícios econômicos brutos gerados durante certo período do

modelo. Já Newlin et al. (2002) expõe que se o objetivo do modelo for a minimização de custos, os custos de escassez de água incorridos por menores entregas podem ser expressos por funções de penalidade. Os usos ambientais podem ser representados com regras ou restrições operacionais.

Estão presentes nos custos operacionais bombeamento, tratamento, recarga artificial além de outros custos para moção de água entre os nós da rede. Pode ser também a presença de custos negativos da geração hidrelétrica.

Uma forma de se avaliar os custos da qualidade da água para os usuários é representá-los como custos operacionais. Desta forma eles podem ser analisados dependendo da fonte de água que é fornecida a cada região ou área urbana, onde a qualidade da água recebida tenha eventualmente variado juntamente com a fonte. Essa formulação sobre como estabelecer representações das demandas econômicas, ambientais, os custos operacionais são importantes para que se construa e elabore um design de modelo que vise fornecer visões a formuladores de gestão e de política pública.

2.4.2 Opções de design e elaboração do modelo

O quadro abaixo elaborado por Harou et al. (2009) demonstra várias escolhas de projeto de modelo e opções que os modeladores hidroeconômicos devem fazer para construir um modelo.

Quadro 1 - Algumas escolhas de projeto, opções e implicações para a construção de um modelo hidroeconômico

Opções	Resumo	Vantagens	Limitações
Simulação	Constitui-se de algoritmos baseados em regras de marcha no tempo. Responde a pergunta “e se?”.	Conceitualmente simples: modelos de simulação existentes podem ser usados. Reproduz complexidade e regras de sistemas reais.	O modelo investiga apenas cenários simulados. Requer tentativa e erro para buscar a melhor solução em uma ampla região de viabilidade.
Otimização	Maximiza/minimiza um objetivo sujeito a restrições. Responde: o	As soluções ideias podem recomendar melhorias. Revela quais áreas do espaço	Objetivos econômicos requerem valoração econômica dos usos da água. Soluções ideias

	que é melhor?	de decisão são promissoras para simulação detalhada.	geralmente pressupõem conhecimento perfeito, planejamento central ou total e flexibilidade institucional.
Representação de tempo			
Determinístico	As entradas do modelo e as variáveis de decisão são séries temporais, históricas ou geradas sinteticamente.	Conceitualmente simples: fácil de comparar com séries temporais de dados históricos ou resultados simulados	As entradas podem não representar condições futuras: representação limitada da incerteza hidrológica (desempenho do sistema obtido apenas para uma única sequência de eventos).
Estocásticos	Distribuição de probabilidade de parâmetros ou entradas do modelo. Uso de múltiplas sequências de entrada (“Monte-Carlo” na ocorrência de sequências equiprováveis, ou abordagem se conjunto, se ponderada).	Considera a estocasticidade inerentes a sistemas reais.	Distribuições de probabilidade devem ser estimadas, séries temporais sintéticas geradas; apresentação de resultados mais difícil; dificuldades de produzir persistências (fenômeno <i>Hurst</i>) e não estacionariedade de séries temporais.
Otimização dinâmica	Representação de uma substituição intertemporal.	Considera o aspecto variável do valor do tempo. Ajuda a abordar questões de sustentabilidade.	Requer controle ideal ou programação dinâmica.
Integração de submodelos			
Modular	Componentes do modelo final desenvolvidos e executados separadamente.	Mais fácil de desenvolver, calibrar e resolver modelos individuais.	Cada modelo deve ser atualizado e executado separadamente. Difícil conectar modelos com escalas diferentes.

Holístico	Componentes alocados em um único modelo.	Mais fácil de representar relações causais, interdependências e realizar análise de cenário.	Deve resolver os todos os modelos de uma só vez. O aumento da complexidade do modelo holístico requer componentes de modelos mais simples.
-----------	--	--	--

*Se o horizonte de tempo otimizado for um único período, o modelo pode ser considerado um modelo de simulação que usa um mecanismo computacional de otimização.

Fonte: Adaptado de Harou et al. (2009).

Agora será apresentado uma visão ampla sobre essas escolhas.

2.4.2.1 Diferença entre otimização e simulação

Segundo Harou et al. (2009) ao visualizarmos as opções simulação e otimização as seguintes perguntas podem surgir ‘e se’ e o que é melhor respectivamente, podemos usá-las separadamente e em conjunto. A representação de forma mais realista de sistemas complexos que possuem processo físicos ou institucionais não lineares é mais bem realizada por modelos que exibem as decisões passo a passo. Segundo Marques et al. (2006) modelos que seempenham em decisões locais detalhadas na maioria das vezes consideram a simulação útil. Ocorre que a realização de uma análise econômica de alternativas simuladas tende a fornecer informações acerca dos benefícios e ineficiências do projeto ou até mesmo da política de gestão sem canalizar para a alocação e as operações de água.

A otimização trabalha para ter um objetivo definido matematicamente que se restringe a equações que representam restrições fiscais e de gerenciamento do sistema. É possível capturar os *trade-offs* da alocação de recursos ao longo do tempo através de uma otimização de multiperíodos que possibilita a vinculação de mais de um período em um único modelo. Além disso, esse tipo de otimização pode ocasionar modelos de otimização não linear, o que dificulta encontrar uma solução. Geralmente as funções objetivas de otimização tendem a maximizar os benefícios líquidos (valor gerado através da derivação dos benefícios brutos do uso da água retirando os custos) ou, de forma similar, conseguem minimizar custos como os custos de escassez de água, de capital, de investimentos e custos operacionais. A resolução dos modelos de otimização pode ser realizada analiticamente, através de programação matemática, otimização dinâmica, equilíbrio geral computável ou até fazendo uso de técnicas de pesquisa globais, de forma semelhante, minimizam custos como custos de escassez de água, custos de capital de investimentos e custos operacionais.

A otimização na teoria econômica possui um grande destaque (principalmente ao tentar maximizar o lucro em uma firma ou minimizar os custos de produção). Dada essa relevância, os modelos hidroeconômicos se utilizam de mecanismo computacionais de otimização, não importando sua finalidade de construção, sendo ela para simulação ou otimização. Em Draper et al. (2003) e seu trabalho intitulado “*Economic engineering optimization for California water management*” temos um exemplo da utilização da otimização para simulação. Ocorre que quando a otimização é empregue para tal objetivo, cada período é tido como um problema de otimização separado, com resultados em t-1 funcionando como condições de contorno para o modelo durante o “período t”. Um fato observado por Harou et al. (2009) é que os modelos de simulação podem gerar regras operacionais reais sem ter o benefício da previsão hidrológica perfeita da otimização multiperíodo. Uma forma de visualizar tal situação é a através das liberações simuladas de reservatórios baseadas no armazenamento existente, não havendo antecipação de entradas futuras.

Para Loucks et al. (1981) a simulação e a otimização atuam bem quando juntas, quando a otimização tem a função de reconhecer estratégias de soluções proeminentes e os modelos de simulação atuam como ferramenta de teste e refino.

2.4.2.2 Modelos determinísticos e estocásticos

Os modelos determinísticos ao representarem o tempo possuem como particularidade considerar um único conjunto de limites fixos (por exemplo, fluxos e demandas). Tais modelos se tornam probabilísticos no momento em que são processados inúmeras vezes com diferentes entradas. Um exemplo citado por Labadie (2004) é a simulação de Monte Carlo, mas outras metodologias estocásticas podem ser aplicadas.

De modo contrário aos modelos determinísticos, os modelos estocásticos levam em conta a natureza probabilística das entradas e parâmetros do modelo. Nessa modelagem os resultados podem assumir o formato de distribuições de probabilidade ou processos estocásticos. De acordo com Rosenberg et al. (2007) esses métodos são comuns em engenharia ou modelos econômicos puros, não sendo muito observados em abordagens hidroeconômicas, onde encontramos de forma significativa variações de otimização determinísticas que geram resultados em forma de séries temporais de operações de alocação ótima como armazenamentos.

Enquanto os modelos que maximizam o valor presente dos benefícios líquidos podem ser resolvidos por intermédio da programação matemática linear ou não linear (otimização). Os modelos de variação no tempo se utilizam de programação dinâmica ou controle ótimo por levarem em conta a substituição intertemporal de recursos, ou seja, não consideram apenas o valor presente.

2.4.2.3 Integração de submodelos

A referência à integração refere-se ao modo como diversos submodelos interagem e como se dá os processos e decisões ocasionadas dessas interações. Modelos holísticos possuem a capacidade de calcular de forma endógena as entradas e saídas em um único modelo. Já um design modular consegue uma conexão entre submodelos independentes sem que os mesmos tenham interação num único programa. Na literatura, tais modelos foram definidos por Braat e Lierop (1987), como tratamentos ou abordagens holísticas, ou compartimentais. Tal nomenclatura foi utilizada e adotada por Cai (2008) e Brouwer e Hofkes (2008). O principal questionamento levantado por Harou et al. (2009) é como resolver o modelo econômico, se de uma forma endógena dentro do modelo de gestão da água ou estimando as demandas de água com um modelo econômico externo. A modularidade traz consigo algumas vantagens como o fato de ter maior probabilidade de convergir para uma solução ótima, além de ter a possibilidade de adentrar em vários detalhes presentes em cada subcampo e ser atualizado e desenvolvido de maneira independente.

Porém, os modelos holísticos podem demonstrar de forma mais eficaz as relações causais de interdependências. Sua abordagem apresenta ser ideal em cenários onde não seja exigido as representações das políticas ou condições modificadas separadamente para cada submodelo. Cenários como o impacto da mudança climática se adequam a essa situação. Harou et al. (2009) cita alguns trabalhos como o de Draper et al. (2003) sendo um exemplo de abordagem modular, onde as curvas de custos da escassez econômica são definidas por um modelo econômico exógeno. Já o exemplo de um comportamento holístico apontado foi o de Cai et al. (2003) quando as curvas de demanda de água foram estimadas de forma endógena. Embora, poucos modelos tenham a característica de serem totalmente holísticos, na economia existem modelos como o de equilíbrio geral ou outros de entrada, saída que representam a hidrologia espacial como o de Jonkman et al. (2008) intitulado *“Integrated hydrodynamic and*

economic modelling of flood damage in the Netherlands” onde é estabelecido um modelo para estimar os danos causados por inundações na Holanda. Modelos holísticos possuem uma ótica expandida sobre como as políticas ou choques de recursos hídricos afetam todo o sistema econômico.

2.4.2.4 Os domínios que abrangem a escala de modelagem

Ao falar de escala de modelagem, a literatura refere-se ao domínio espacial, temporal e a discretização. Os limites de um modelo são descritos pelo domínio. Os espaciais podem estar atrelados a um sítio, uma casa ou um grupo de países, enquanto o domínio espacial se refere ao horizonte de tempo do modelo. A subdivisão dos domínios modelados espacial e temporal é demonstrada pela discretização. Os domínios espaciais são divididos em subdomínios (um exemplo seria as sub-bacias, enquanto no domínio temporal a subdivisão é realizada em intervalos de tempo. A escala que irá determinar e definir quais serão os problemas e questionamentos que o modelo será capaz de retratar.

De acordo com Alcubilla e Lund (2006) o domínio espacial comum dentro da modelagem hidroeconômica é regional, mesmo que a avaliação possa ter utilidade em escalas domésticas e internacionais. Os engenheiros civis argumentam que se a ótica e o foco estiverem na gestão e conservação da demanda de água, os modelos domésticos ou de nível de serviço público podem ajudar a reconhecer os melhores investimentos nas escalas domésticas, ou de serviço público de água. Fazer uso de limites da bacia hidrográfica com o intuito de restringir um modelo pode ajudar na definição das jurisdições que envolvem as agências de água. Há exemplos de modelos hidroeconômicos que foram elaborados em relação a conflitos de bacias hidrográficas que fazem fronteiras com mais de um país. Um exemplo é o trabalho realizado por Fisher et al. (2002) que elaborou um modelo para a região Israel-Jordânia-Palestina.

De acordo com Cai (2008) uma abordagem semi-distribuída estabelece uma dificuldade ao tentar vincular uma infraestrutura hidrológica e de abastecimento de água a áreas onde a demanda ou produção econômica de água é homogênea a ponto de ser modelada como uma unidade. Labadie (2004) apresenta a estrutura nó ligação como uma forma eficiente de se ligar diferentes escalas; a conectividade de rede consegue ser retratada de forma sintética por uma matriz de conectividade. Ocorre que apesar da escolha de uma escala de recursos hídricos ter a capacidade de impactar diretamente as equações usadas para modelar tais recursos, as

definições (formulações) econômicas não variam tanto em diferentes escalas.

As variações dos domínios temporais podem ocorrer em intervalos de alguns dias para modelos operacionais a décadas para aplicação de planejamento. Modelos que possuem o foco em operações de curto prazo como controle de enchentes fazem uso de pequenos intervalos de tempo na modelação de processos hidrológicos e hidráulicos.

2.4.2.5 Modelagem através de metas ambientais e sociais

Outra escolha para o design seria a representação dos fluxos ambientais ou ecológicos. A modelagem pode ser feita através de técnicas de avaliação econômica ambiental que forma brevemente citada na seção de valor econômico da água e a demanda ambiental e recreativa deste recurso. Além de utilizar das técnicas de avaliação, Jenkins et al. (2004), apresenta o tratamento de requisitos ambientais como restrições de baixo fluxo como uma alternativa de modelagem. Essa abordagem é interessante se dificulta fazer uma avaliação sobre os serviços ambientais.

Fisher et al. (2002) afirma que é factível a inclusão de metas ecológicas, políticas sociais, realidades institucionais e ponderações políticas nos modelos hidroeconômicos. A inclusão de tais fatores num modelo deve ter como finalidade a redução de conflitos. Existem exemplos dentro da literatura onde a utilização das ferramentas hidroeconômicas ajudaram a avaliar as implicações de equidade de diferenças políticas hídricas. Alguns estudos como os de Draper et al. (2003); Evans et al. (2003) seguem esse caminho de analisar os *trade offs* entre a equidade na alocação de água e distribuição de renda para uma bacia hidrográfica agrícola.

2.4.2.6 Os softwares utilizados

Existem diversas opções de software disponíveis para execução de modelos hidroeconômicos. Harou et al. (2009) aponta que um método eficiente seria implementar formulações de modelos personalizadas (definidas pelo usuário) em sistemas de modelagem genéricos. Sistemas de modelagem de otimização conseguem agrupar, além dos dados de modelo, formulações e definições de resultados. Alguns exemplos desses sistemas são o *General Algebraic Modeling System* (GAMS), AMPL e AIMMS; eles vinculam equações de modelo escritas em notações algébricas a solucionadores comerciais que implementam otimização linear ou não linear. Todos esses sistemas têm como características serem flexíveis,

transparentes e auto documentados. Além de possibilitar uma ligação clara entre a formulação do modelo e a resolução definida pelo solucionador, o que possibilitou sua utilização de forma ampla pelos economistas e engenheiros ao longo do tempo na formulação e implementação de modelos hidroeconômicos. Os sistemas de modelagem de simulação ou software de dinâmicas de sistemas (nomenclatura utilizada para se referir a esses sistemas) solucionam modelos de simulação definidos pelos usuários por intermédio de um solucionador comercial.

Existem alguns sistemas de modelagem específicos para a água. Um exemplo é o Sistema de Modelagem de Componentes Interativos (ICMS) utilizado no trabalho de Lectcher (2005), denominado “*Implementation of a water allocation decision support system in the Namoi and Gwydir valleys*” para implementação do modelo hidroeconômico chamado de *Water Allocation Decision Support System (WAdss)*.

A escolha pelo sistema ICMS no modelo hidroeconômico de Lectcher (2005) foi pelo fato de tal sistema propiciar o desenvolvimento de um modelo e base de dados que podem ser sobrepostos por Interfaces Gráficas de Usuário (GUI) customizadas.

De acordo com Harou et al. (2009) outra opção é a criação de um software específico do aplicativo ou utilização de uma plataforma modelo. Como exemplo ele cita o *California Value Integrated Network (CALVIN)* utilizado por Draper et al. (2003) e o *Water Allocation System (WAS)* por Fisher et al. (2002). Ele ainda apresenta uma plataforma de modelo de código aberto com base geográfica, o *HydroPlatform*, que funciona com modelos hidroeconômicos existentes construídos com sistemas de modelagem como o GAMS.

No caso de uma formulação de modelo personalizado demonstrar se não ser necessário a utilização de um Sistema de Apoio à Decisão (DSS) sobre recursos hídricos pode ser usado. Na literatura temos exemplos desses sistemas, como MITSIM (STRZEPEK et al., 1989), AQUARIUS (BROWN et al., 2002; DIAZ; BROWN, 1997) e AQUAPLAN (TILMANT et al., 2008).

2.4.2.7 Representação do design e estudo

Um estudo de modelagem tem como parâmetros básicos um caso base representando a infraestrutura atual e práticas de gestão da água. É importante a reprodução dos resultados

históricos no estabelecimento de confiabilidade ao modelo.

A importância de se estabelecer um caso base está associada à calibração do modelo, tal processo enquadra os dados de entrada do modelo, parâmetros, suposições e equações são testadas e modificadas no intuito de se adequarem aos resultados observados. Harou et al. (2009) esclarece que esse processo de calibração do modelo é demorado, porém, é a partir dele que os modeladores aprendem sobre o sistema de água em consideração e sobre as suposições, limitações e benefícios de seu modelo. Alguns métodos de calibração parcialmente automatizados têm sido aplicados a modelos de otimização, como Cai e Wang (2006) que se basearam no conceito de *Positive Mathematical Programming* (PMP) metodologia que também foi testada por Howitt (1995) e teve seus resultados publicados no *Jornal Americano de Economia Agrícola*.

É esclarecido por Harou et al. (2009) que a simulação e otimização determinística multiperíodo geram como resultado o desempenho econômico geral e as séries temporais das operações do sistema hídrico (como, por exemplo, lançamento de reservatórios e bombeamento de águas subterrâneas). Esses parâmetros em pequenos sistemas podem ser solucionados rapidamente segundo Schoups et al. (2006) já em grandes sistemas eles podem ser derivados pela análise estatística de operações ótimas. Essa utilização da otimização faz com que os valores marginais (valor de mais uma unidade) de água e infraestrutura sejam resultados significativos dos modelos hidroeconômicos.

Tais valores marginais (valores sombra, multiplicadores de Lagrange, etc.) são criados por programas matemáticos somente quando uma restrição limita a solução ótima. Modelos de otimização hidroeconômica produzem informações valiosas sobre valores marginais de água, infraestrutura e fluxos ecológicos.

2.5 APLICAÇÕES DE MODELAGEM

As aplicações de modelagem hidroeconômica na literatura cobrem uma variedade de problemas, locais e inovações de recursos hídricos (Quadro 2). O Quadro abaixo elaborado por Harou et al. (2009) divide as aplicações em sete grupos permeáveis. Descritos abaixo.

Quadro 2 - Aplicações de modelagem hidroeconômica selecionadas e agrupadas em categorias

Principais problemas	Localização	Recursos e inovações do modelo	Citações
Alocação e uso intersetorial dentro e fora do rio Escassez de água, alocação ineficiente	Bacia hipotética, Oeste dos EUA	Alocação para hidrelétricas da água obtida pela supressão vegetal	Brown et al. (1990), Diaz et al. (1992)
Explorar sinergias entre empresas não consumistas usa	Rio Chama Basin, Novo México, EUA	Complementaridades entre recreação fluvial, recreação lacustre e hidrelétricas	Ward e Lynch (1996,1997)
Preservar nascentes para recreação e habitat ecológico	Aquífero Edwards, Texas, US	Gestão de águas subterrâneas para proteção do habitat ecológico, investigação do mercado de água	McCarl et al. (1999)
Trade-offs entre objetivos ecológicos e econômicos	Região de Border Rivers, Queensland, Austrália	Consequências do comércio e alocação de água para uso ambiental; minimiza as diferenças entre os regimes de fluxo real e natural	Tisdell (2001)
Planejamento ideal de alocação de seca com demandas agrícolas	Distrito de Irrigação de Bacia do Guadalquivir, Espanha	Análise de componentes principais usados para gerar variáveis estocásticas para três submodelos hierárquicos: cultura, distrito de irrigação, bacia	Reca et al. (2001)
Hidrelétricas competitivas e demandas agrícolas	Reservatório de Vadielo, Espanha	Identificar ganhos econômicos de um acordo comercial intertemporal	Bielsa e Duarte (2001)
Usos agrícolas, urbanos e ambientais	Bacia do Maipo, Chile	Fluxos de retorno, considerando eficiência hidrológica e econômica	Rosegrant et al. (2000), Cai et al. (2003), Cai (2008)
Suprimentos superalocados de águas superficiais e subterrâneas	Bacia de Namoi, Austrália	Trade-offs das políticas de alocação de água; avaliação integrada	Letcher et al. (2004)
Alocação entre setores com retornos econômicos dessemelhantes	Nong Pla Lai Reservatório, Tailândia	Equidade multi objetiva e maximização do benefício econômico líquido	Babel et al. (2005)
Distribuição dos fluxos da estação seca entre agricultores, desmatamento, erosão, qualidade da água superficial	Mae Chaem, Tailândia	A modelagem integrada inclui o crescimento da cultura, erosão, escoamento pluvial, decisão familiar, modelos de impacto socioeconômico	Letcher et al. (2006)
A escassez de água ameaça o habitat de espécies ameaçadas de extinção habitat; fonte de menor custo para ecologia precisa	Bacia do rio Platte, Oeste dos EUA	Suprimentos de água de menor custo da agricultura identificados para reduzir a escassez de água ambiental; Modelo estocástico de mistura de culturas agrícolas	Houk et al. (2007)
Operando cascatas de reservatórios em um contexto multiobjetivo e transfronteiriço	Bacia do Eufrates (Turquia, Síria)	Programação estocástica para avaliar a distribuição estatística de valores marginais de água em sistema multiuso de reservatórios múltiplos (hidrelétrica, irrigação)	Tilmant e Kelman (2007), Tilmant et al. (2008)
Altas demandas agrícolas e urbanas de verão; demandas espacialmente heterogêneas	Bacia do Neste, França	Simulação de otimização econômica (usuários agrícolas, domésticos, industriais), cenários: agrônomo, climático ou econômico	Reynaud e Lenhardt (2008)

Abastecimento, de água infraestrutura de engenharia e expansão de capacidade			
Infraestrutura de cultivo e abastecimento de água para Irrigação	Projeto Tista, irrigação Paquistão	Interações do sistema água superficial-água subterrânea no contexto econômico da irrigação	Rogers e Smith (1970)
Abastecimento de água; dessalinização; alocações setoriais	San Luis Obispo Condado, Califórnia	Programação inteira mista	Armstrong e Willis (1977)
Desenvolvimento de regras operacionais	Rio Missouri, Rio Colúmbia, EUA	Otimização implícita-estocástica baseada em economia	Lund e Ferreira (1996)
Abastecimento de água agrícola e urbana; usos ambientais	Em todo o estado da Califórnia, EUA	Gerenciamento de banco de dados; grande sistema diversificado; políticas flexíveis; expansão da infraestrutura	Draper et al. (2003), Jenkins et al. (2004), Nulo e Lund (2006)
Usos competitivos da infraestrutura	Canal do Panamá, Panamá	Trade-off entre navegação e energia hidrelétrica, expansão de capacidade	Watkins e Moser (2006)
Planejamento e operações probabilísticas de seca	Município de East Bay, Califórnia, EUA	Modelos de planilhas de oferta e demanda vinculadas	Wilchfort e Lund (1997), Jenkins e Lund (2000)
Conservação de água e infraestrutura expansões com disponibilidade de água variável	Jordânia	Programação inteira mista estocástica com programas de conservação de água sem preço e expansões de infraestrutura	Rosenberg et al. (2008)
Uso conjunto de águas subterrâneas e superficiais			
Otimização econômica do uso conjuntivo	Rio São Joaquim Vale, Califórnia, EUA	Maximizar os benefícios líquidos esperados da produção agrícola; programação dinâmica estocástica	Burt (1964) Bear et al. (1964)
Otimizando as águas subterrâneas em um sistema integrado	Israel	Otimização econômica do uso da água subterrânea com um sistema integrado usando curvas de demanda de água	Bear e Levin (1966, 1970)
Interação córrego-aquífero, hidrologia espacial efeitos	Hipotético e Vale Platte, Colorado, EUA	Simulação de sistema de uso conjuntivo com simulação distribuída de águas subterrâneas e modelo econômico	Bredehoeft e Young (1970), Young e Bredehoeft (1972)
Economia regional e agricultura plano de desenvolvimento considerando suplementos estocásticos	Varamin Plain, Iran	Combina um modelo de otimização de produção agrícola com um modelo distribuído de simulação de águas subterrâneas e uma rede de águas superficiais de ligação de nós	De Ridder e Erez (1977)
Alocação de água agrícola	Condado de Yolo, Califórnia, EUA	Modelo integrado de águas subterrâneas usando equações de regressão	Noel et al. (1980)
Uso conjuntivo eficiente e abastecimento de irrigação projeto de sistema	Bacia do Indus Paquistão	Simulação do efeito conjunto da alocação de água e impostos sobre poços de água subterrânea ou subsídios sobre a eficiência econômica	Noel e Howitt (1982) O'mara e Duloy (1984)
Agricultura irrigada com água subterrânea	Vale Salinas, Califórnia, EUA	Eficiência da gestão das águas subterrâneas em toda a bacia; recarregar de fluxos efêmeros	Reichard (1987)

Bombeamento em estado estacionário economicamente	Condado de Madera, Califórnia, EUA	Aproximando o bombeamento ótimo de água subterrânea para uso conjuntivo estocástico de múltiplos aquíferos	Provencher e Burt (1994)
Bombeamento economicamente ideal	Condado de Kern, Califórnia, EUA	Otimização do uso conjuntivo de águas subterrâneas e infraestrutura	Knapp e Olson (1995)
Infraestrutura de uso conjunto e banco de água	Sul da Califórnia, EUA	Otimização do uso conjuntivo de águas subterrâneas e infraestrutura	Pulido-Velazquez et al. (2004),
Aumento da demanda agrícola, intrusão de água do mar	Bacia do rio Adra, Espanha	Modelo incorporado de fluxo-aquífero com método de múltiplos reservatórios, modelo de águas subterrâneas com método de autovalor, NLP	Pulido-Velazquez et al. (2006)
Os custos da água de superfície causam o esgotamento das águas subterrâneas	Bacia de Tulare, Califórnia, EUA	Simulação orientada economicamente; quantifica o efeito do preço da água de superfície nas águas subterrâneas	Marques et al. (2006)
Seca, agricultura irrigação costeira	Vale Yaqui, Sonora, México	Modelo agrônômico integrado de águas subterrâneas distribuídas; otimização interanual multi objetivo para sustentabilidade e controle de derramamento; regra de uso conjuntivo derivado	Schoups et al. (2006)
Instituições, mercados de água e preços			
Escassez de água por falta de infraestrutura	Califórnia, EUA	Funções de oferta e demanda não lineares distribuídas espacialmente, desigualdade entre o número de funções de oferta e demanda	Vaux e Howitt (1984)
Questões de direitos de água de aquíferos	Rio da Prata Sul, Colorado, EUA	O quase-mercado maximiza a renda regional e protege os direitos da água do rio para idosos	Young et al. (1986)
Suprimentos de irrigação escassos; diminuiu produtividade agrícola a partir da salinidade	Vale do Arkansas, Colorado, EUA	Simulação de mercado de mudanças no valor das águas superficiais e subterrâneas devido à salinidade	Lefkoff e Gorelick (1990,1990)
Custo de novos projetos de abastecimento urbano no suldoestados EUA	Rio Colorado, EUA	Mercado para usos de consumo, produção hidrelétrica, rio salinidade; seis alternativas institucionais testadas	Booker e Young (1994)
Restrições institucionais ineficientes no mercado de água	Baixo Rio Grande Vale, Texas, EUA	Restrições institucionais do mercado de água; carteiras ótimas de direitos, opções e arrendamentos	Characklis et al. (1999,2006)
Escassez de água e demanda por importações de água	Sul da Califórnia,EUA	Benefício econômico de políticas flexíveis de alocação de água	Newlin et al. (2002)
Demanda crescente, oposição a novos reservatórios, limites institucionais sobre transferências	Condado de Califórnia,EUA	Otimização dinâmica de mercados e gestão intertemporal de águas subterrâneas	Knapp et al. (2003)
Esgotamento de aquíferos e danos ambientais	Estado de Tamil Nadu, Índia	Precificação adaptativa de águas subterrâneas com preço em função dos níveis de águas subterrâneas e previsões de monções	Brown e Rogers (2006), Brown et al. (2006)
Projeto, implementação e avaliação da política de tarifação da água	Bacia do Rio Grande, Novo México, EUA	Impactos hidrológicos e econômicos de programas de precificação de água, restrições de qualidade de água	Ward e Pulido-Velazquez (2008, 2009)

Efeitos desconhecidos de mudanças nos custos de irrigação ou acesso à água no comportamento do agricultor	Bacia de São Francisco, Brasil	Especialmente explícito, nível de fazenda, modelo PMP; modelo hidrológico de alta resolução simula fluxo de sub superfície saturado variável e transporte de	Maneta et al. (2007, submetido para publicação)
Resolução de conflitos, gestão transfronteiriça e sustentabilidade			
Alocações de água; demandas crescentes	Israel, Jordânia e Palestina	Cooperação entre as partes; preços e políticas sociais	Fischer et al. (2002,2005)
Conflitos entre agricultura e Conservação ambiental	Bacia de Syr Darya, Ásia Central	Modelagem de longo prazo com critérios de sustentabilidade quantificados	Cai et al. (2002,2003)
Bacia transfronteiriça, competição entre setores (por exemplo, dentro do rio vs. fora do rio) e países	Bacia do rio Mekong (seis países no SO Ásia)	Caracterizar os trade-offs entre os usos de água dentro e fora do rio; energia hidrelétrica, irrigação, pesca, valores de água de zonas úmidas considerados	Ringler e outros. (2004), Ringler e Cai (2006)
Gestão binacional de rios Escassez de água, falta de capital para o desenvolvimento de infraestrutura	Rio Colorado; EUA-México Bacia do Rio Gediz, Peru	Fluxos ambientais econômicos Otimização multi objetivo com métodos heurísticos e simulação dinâmica, incluída em um DSS orientado para as partes interessadas	Medellin-Azuara et al. (2007) Phaedra et al. (2007), Cetinkaya et al. (2008)
Gerenciando para mudanças climáticas e secas			
Secas em grandes bacias compartilhadas	Rio Colorado, EUA	Perdas por seca para usos no rio (hidrelétrica, recreação) vs. usos de consumo	Booker (1995)
Efeitos de cenários de mudanças climáticas em grandes economias desenvolvidas	Sistema interligado da Califórnia, EUA	Adaptações de infraestrutura e políticas para o aquecimento climático	Harou et al.(Tanaka et al. (2006), Medellin-Azuara et al. (2008)
Superapropriação seca e mudança climática; demandas crescentes	Bacia do Rio Grande,EUA	Ajustes institucionais para limitar os danos causados pela seca	Booker et al. (2005), Ward et al. (2006)
Gestão do uso da terra: inundações e qualidade da água			
Quantificando o impacto econômico da Europa Diretiva Quadro da Água (WFD) sobre a gricultura e setores recreativos	BaciaHumber ,Inglaterra	Integrar economia espacialmente distribuída, uso da terra agrícola, hidrologia e modelagem da qualidade da água; considere os custos agrícolas e o valor recreativo gerado pela DQA	Bateman et al. (2006)
Várzeas protegidas por diques; adaptação ao aumento do risco de inundação	Rio americano, Califórnia, EUA	Programação dinâmica baseada em risco; frequência cheia, probabilidades de ruptura de diques; simulação hidráulica; maximizar a diferença entre o valor de uso da terra e o dano esperado	Zhu et al. (2007)
Custos econômicos diretos e indiretos das inundações	Áreas propensas a inundações na Holanda	Danos causados por inundações e efeitos de inundações em toda a economia usando modelo hidrodinâmico espacial	Jonkman et al.(2008)
Diretivo-Quadro Europeu da Água (WFD) em bacias hidrográficas de cultivo intensivo	Bacia Superior do Ems, Alemanha	O DSS espacial vincula modelos hidrológicos, de qualidade da água e econômicos para estimar os efeitos econômicos de opções alternativas de manejo agrícola	Volk et al. (2008)

Fonte: Adaptado de Harou et al. (2008).

De acordo com Harou et al. (2009), aplicações para usos no rio incluem energia hidrelétrica, navegação e recreação. Os usos que não advém do fluxo são geralmente de consumo (agricultura irrigada ou abastecimento urbano). Como visto anteriormente, a alocação

eficiente de água depende que os valores do fluxo no rio sejam incorporados ao processo de alocação. Os usos ambientais da água, como fluxos ecológicos mínimos nos cursos de água na maioria das vezes não são representados economicamente; essas aplicações não foram encontradas no quadro acima. Modelos agronômicos endógenos têm por finalidade representar os efeitos das práticas agrícolas no uso da água e vice-versa. A eficiência da produção agrícola pode ser simulada de acordo com aplicações específicas de água, tecnologia de irrigação e níveis de salinidade da água.

Temas como Infraestrutura de engenharia e expansão de capacidade são exemplos de modelos com enfoque em engenharia que se utilizam de critérios econômicos para avaliação. Uma vantagem de utilizar otimização na análise infraestrutura de abastecimento de água, está no fato de que os valores de sombra conseguem avaliar o valor marginal da capacidade.

A descoberta acerca do potencial dos bancos subterrâneos de água pode vir de um gerenciamento conjunto entre as águas subterrâneas e superficiais (uma gestão completa do sistema de recursos hídricos). Existem uma descrição feita por Harrou et al. (2009) sobre os modelos que representam custos de bombeamento de água subterrânea, e os modelos de água subterrânea com parâmetros distribuídos. O primeiro varia com a profundidade são não lineares (quadráticos), pois os níveis de água dependerão do volume bombeado. Já o segundo adiciona informações espaciais que permitem a relevância local dos resultados do modelo, em vez de tendências regionais amplas.

Na tabela acima observa se a existência de muitos artigos que se propõe a analisar os benefícios da alocação flexível através de variados tipos de mercados de água. Ocorre que os mercados de água possuem a regulação definida por instituições que visam a impor restrições na intenção de preservar recursos ambientais contra a degradação ou efeitos econômicos secundários (externalidades). Modelar mercados restritos pode trazer como benefício à identificação de ajustes eficazes e vantajosos para economia regional.

Conforme Harrou et al. (2009) e análise de Fisher et al. (2005) aqueles modelos de gestão hídrica que incluem critérios econômicos não corroboram com as teorias sobre a proximidade de ocorrer conflitos regionais ou globais mediante problemas hídricos. Esses modelos possuem como intuito fornecer uma solução colaborativa e adaptativa aos conflitos

transfronteiriços.

Existem modelos hidroeconômicos abordados nos artigos expostos na tabela acima que fornecem informações sobre mecanismos de operações flexíveis, que tendem a ajudar contra os efeitos negativos ocasionados pela escassez de água e mudanças climáticas.

Uma nova geração de modelos hidroeconômicos vem surgindo com a preocupação de analisar a gestão do uso da terra no tocante as inundações e as poluições constantes da agricultura. Esses modelos conseguem integrar sistemas de informações geográficas (GIS) a diversas ferramentas de modelagem.

2.6 CONSEQUÊNCIA DO USO NA ESFERA POLÍTICA

Ao tentar debater sobre as implicações políticas e os possíveis usos dos modelos hidroeconômicos em diversas áreas, Harou et al. (2009), elaborou a lista abaixo.

- expansão da infraestrutura e planejamento de operações,
- alocação e mercados de água,
- vias de adaptação (por exemplo, às mudanças climáticas)
- desenho de políticas institucionais para alcançar o sucesso ambiental, e metas econômicas (governança, direitos, etc.),
- análise de impacto da política econômica, e
- base para regulamentação e lei.

Os modelos hidroeconômicos na maioria das vezes são aplicados para planejamento de infraestrutura, alocação de água e mercados, além de análises de impacto da política econômica e de adaptações às mudanças climáticas.

Não é incomum, como visto em artigos citados nesse trabalho, que abordagens institucionais e políticas incentivem a eficiência econômica na gestão de água. Estratégias de marketing de água também aparecem com essa mesma finalidade. A importância da introdução de mercados de água e como eles se desenvolveram ao redor do mundo foi expressa por Easter et al. (1998) no livro intitulado *“Markets for Water: potential and performance”*. Esses mercados também estão sujeitos a falhas de mercado devido à existência de externalidades,

monopólios naturais e bens públicos que competem com demandas privadas. Alguns autores como Griffin e Hsu (1993) demonstraram através de suas pesquisas que essas falhas de mercado podem ser corrigidas, ou reduzidas através da inserção de direitos de água apropriados e estruturas ou programas de incentivos.

Em situações onde o abastecimento de água está sobre controle do governo, Rogers et al. (2002) afirma que o preço eficiente será um instrumento administrativo na gestão da demanda de água. Além disso, ele ainda estabelece que quando o preço da água reflete seu verdadeiro custo marginal, o que integra as externalidades ambientais e custos de oportunidade, tal recurso é alocado para os usos mais valiosos.

Algumas instituições como Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) tentam analisar as práticas atuais e as tendências recentes nas práticas de precificação da água para os setores doméstico, agrícola e industrial em seus países membros. Além de abordar questões de preços relacionadas a toda a gama de serviços de água, incluindo abastecimento público, tratamento e descarte de esgoto, taxas de captação e descarga e recuperação de custo.

Uma dúvida que pode surgir é sobre o que ocorre na ausência de mercados de água que funcionem de modo estável. Segundo Briscoe (1996) tal deficiência seria sanada através de uma análise sistemática dos impactos sobre os custos de oportunidade. Essa avaliação teria que ter como base um sistema de precificação, permitindo identificar e fazer uma estimativa do valor da água para diferentes usuários do sistema, assim como modelos hidroeconômicos.

2.7 DIFICULDADES DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO

A indagação a respeito da serventia da análise de sistemas para melhorar a gestão da água decorre do fato que alguns autores como Rogers e Fiering (1986) acreditam que os benefícios demonstrados pelas soluções de otimização são pequenos devido ao nivelamento que acontece das funções objetivas próximas ao ótimo, além de apresentarem diversas soluções quase ótimas.

O fato de esses modelos integrarem critérios econômicos aumenta o nível de teoria e complexidade, além do fato de que os modelos hídricos geralmente não possuem uma alta

gama de aceitação pelos gestores de recursos hídricos, muitos acreditam que esses sistemas são difíceis e duvidosos. Por isso os modeladores hidroeconômicos devem sempre demonstrar aptidão para trabalhar além do mundo acadêmico com gestores de recursos hídricos utilizando e ampliando modelos que já estão estabelecidos, enriquecendo os com dados econômicos sem utilizar softwares de difícil aprendizagem.

Outra dificuldade de fazer uso dos modelos hidroeconômicos segundo Harou et al. (2009) está na dificuldade de implementação dos resultados do modelo. Ele explica que a simplificação e agregação de processos e dados físicos, econômicos e regulatórios são fundamentais para a construção e resolução oportuna de modelos regionais. Porém, se essa agregação de acordo com ele for mais grosseira do que os modelos de simulação existentes, os gerentes podem perceber o modelo hidroeconômico como muito teórico ou insuficientemente detalhado para apoiar a tomada de decisão local.

Aproveita se de equações de processo simplificadas pode ocasionar uma pressão no conjunto de parâmetros reduzidos para representar o sistema com precisão. Essa simplificação colabora para uma falta de robustez na escala local, que pode gerar uma alteração no custo de um link em um modelo de rede, fazendo que os fluxos tomem uma rota completamente diferente. O que não deve ocorrer em uma escala regional com maior amplitude, onde os efeitos locais tendem ao equilíbrio, ocasionando resultados bem fundamentados e úteis aos questionamentos que podem surgir em variados cenários.

Na visão de Sahinidis (2004) algo que seria benefício a modelagem econômica seria a aplicação de abordagens proativas com o intuito de lidar com incertezas comuns em estudos que envolvem operações como programação robusta, probabilística e flexível.

Para Harou et al. (2009) existe uma concepção errônea que deve ser deixada de lado que é a de que os modelos hidroeconômicos impõem soluções de mercado para os problemas de recursos hídricos. Essa ideia fundamenta se na dificuldade de um modelo conseguir representar o comportamento do agente individual e os custos de transação.

2.8 MODELOS HIDROECONÔMICOS NO BRASIL

É importante relatar sobre os modelos hidroeconômicos no Brasil, qual a autoria desses

estudos e em que regiões foram aplicadas. Com esse intuito os trabalhos de Moraes (2003), Torres et al. (2014) e Moraes et al. (2021) servirão como exemplo.

O modelo de alocação ótima desenvolvido por Moraes (2003) em sua tese de doutorado faz uso do *General Algebraic Modeling System* (GAMS) um sistema de modelagem utilizado para otimização matemática, tal software foi projetado para a resolução de problemas de otimizar linear e não linear. A área de estudo ao qual o modelo se concentrou foi a bacia do rio Pirapama, no estado de Pernambuco. Em sua modelagem, elementos da bacia como a quantidade de água disponível e a qualidade desta foram incorporados. Tendo o enfoque nesses parâmetros e sabendo que até os melhores softwares podem apresentar erros com grandes modelos não lineares, a autora decidiu por fazer uso da modelagem holística através do método de decomposição por temas, criando dois submodelos para a quantidade de água disponível e a qualidade.

A explicação acerca da formulação do modelo relata por Moraes (2003) foi a seguinte:

O Modelo utiliza a abordagem piece-by-piece apresentada em Cai et al. (2001), que usa o fato de que grandes modelos podem ser decompostos em várias partes, que são resolvidas sequencialmente, com cada parte sendo adicionada a cada passo. O pedaço ou sub-modelo composto de restrições adicionais que vão sendo adicionadas as partes anteriores e essas restrições podem envolver novas variáveis que não existiam nos pedaços anteriores. No nosso caso, temos dois sub-modelos e a decomposição foi feita por temas, no caso quantidade e qualidade de água. (MORAES, 2003)

A descrição acerca dos submodelos pode ser visualizada no quadro abaixo.

Quadro 3 – Descrição dos submodelos de Moraes (2003)

Modelos	Descrição
Submodelo 1	Balanço hídrico, balanço de massa de reservatórios, fluxos mínimos para atender demandas ecológicas institucionais, funções de produção de álcool e aguardente, produção de vinho, produção de energia máxima de acordo com capacidade instalada, produção de cana inicial (disponível no ano corrente) e estimada para a próxima safra em função do efluente aplicado. Cálculo do volume e do local de aplicação dos efluentes, o que leva a determinação das áreas a se fertirrigar em cada trecho e mês. Em função desta alocação, obtém-se as proporções de água oriundas da drenagem pluvial natural e as cargas associadas. Tudo isso

	sem calcular e restringir os constituintes de qualidade resultantes nos representativos trechos do rio.
Submodelo 2	Submodelo 1 incluindo o cálculo da concentração, transporte e decaimento ao longo dos segmentos de oxigênio dissolvido (OD) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). Estima-se também a partir do cálculo das cargas orgânicas o aporte de fósforo aos reservatórios. Com estes valores calculados introduz-se então as restrições institucionais de níveis mínimos de OD, de acordo com a classe de uso, bem como restrições relativas à carga orgânica para prevenir um futuro processo de eutrofização nos reservatórios.

Fonte: Adaptado de Moraes (2003).

O resultado deste trabalho demonstrou a diminuição no benefício geral devido ao déficit da disponibilidade de água. Em setores como o de fertirrigação (uma técnica de adubação que faz uso da água de irrigação com o propósito de levar nutrientes ao solo cultivado) e industrial essa situação se mostrou agravada devido às ponderações feitas acerca da qualidade da água.

Esse modelo considera a demanda ambiental como outra forma de se fazer uso da água, tal abordagem ocasiona em restrições a descartes de efluentes (resíduos originados das indústrias, dos esgotos e das redes pluviais) em função da autodepuração dos poluentes presentes no rio, ou seja, tal limitação tende a visar uma restauração das características ambientais do rio. A elaboração desse estudo é um exemplo de diretriz a ser seguida pelos gestores a cerca de qual política de proteção ambiental podem ser instauradas nessa localidade.

O outro modelo hidroeconômico aplicado a ser exposto aqui é o elaborado por Torres et al. (2014) na sub bacia hidrográfica do rio Buriti Vermelho (BHBV), em Brasília, no estado de Goiás. Tal sub-bacia é reconhecida por uma vigorosa atividade agrícola. O enfoque de M. de O. Torres et al. (2014) foi desenvolver um modelo hidroeconômico que quantificasse os inúmeros possíveis impactos de curto prazo na renda da atividade agrícola originadas por mudanças de ordem climática (precipitação e escassez de água). De forma parecida a Moraes (2003) neste trabalho foram utilizados dois modelos de diretrizes computacionais que se conectam. Um de ordem econômica e outro de ordem hidrológica. O primeiro a ser abordado pelos autores é o modelo hidrológico cuja função é reproduzir as condições climáticas da região por intermédio de uma calibração de dados reais.

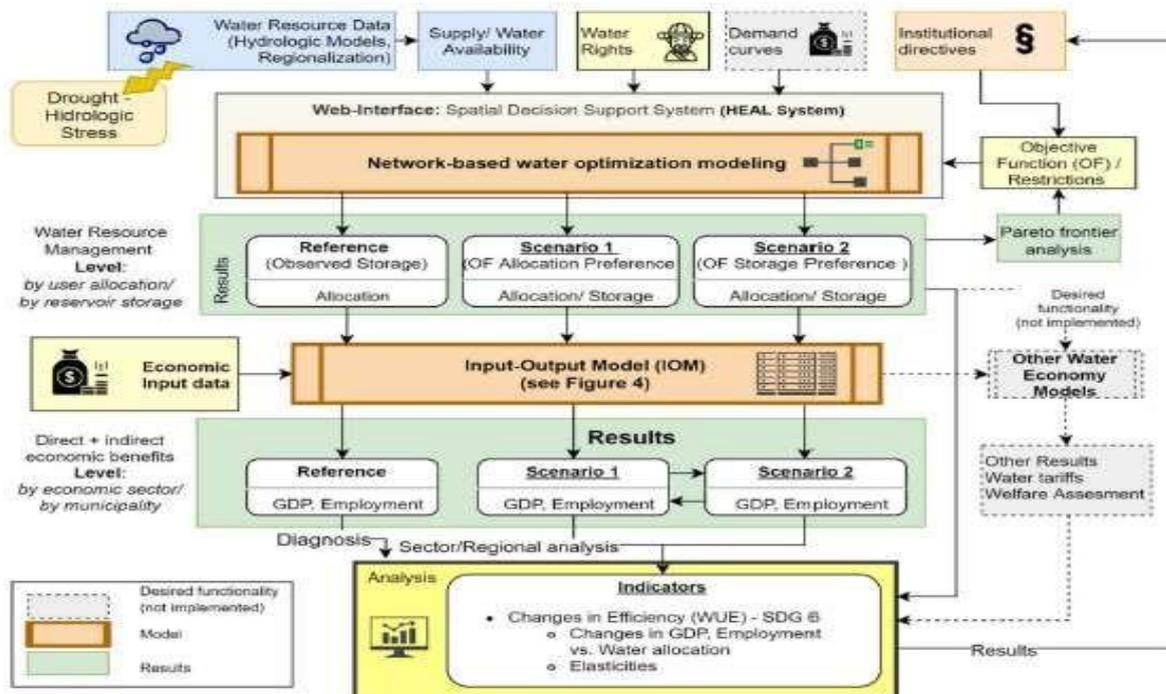
Já o modelo econômico é baseado no método de Programação Matemática Positiva (PMP) um método que permite obter de forma rápida a calibração exata do modelo em termos dos níveis das atividades, da produção e dos preços. Esse método foi apresentado ao longo desse trabalho de conclusão de curso por intermédio de Howitt (1995). O resultado alcançado através dessa metodologia foi de que caso ocorresse a diminuição de 5% nos índices climáticos de precipitação e disponibilidade de água a renda teria uma diminuição de 1.2%. E caso esses índices citados tivessem uma redução de 90% a renda seria afetada em 32%.

O último trabalho a ser exposto foi publicado por Moraes et al. (2021), intitulado “*Integration of a Network-Based and an Economy-Wide Water Model to Support Decision Making on Water Resources Planning and Management in Northeastern Brazil*”. Esse estudo foi baseado em desenvolver uma modelagem integrada, buscou se a representação de um modelo que retratasse problemas do mundo real de forma apropriada. Tendo em vista essa concepção vinculou se modelos de otimização hidrológica com modelos *economywide*. O motivo para tal segundo os autores estaria no fato de que, mesmo os modelos baseados em redes de otimização ao incorporarem critérios econômicos como é o caso dos modelos de: Brouwer and Hofkes (2008); Maneta et al. (2009); Salla et al. (2014); Chakroun et al. (2015); Kahil et al. (2015); Garbe and Beevers (2017); Ghosh et al. (2017); Ahmadaali et al. (2018); Giri et al. (2018); Gunawardena et al. (2018); Maria et al. (2020), não conseguem alcançar indicadores socioeconômicos amplos, como o PIB, taxa de emprego, receitas governamentais, nível de consumo, de investimento, volume de exportações e importações, distribuição de rendimentos, ou vantagens comparativas em setores.

Modelos *economywide* como os de *Input-Output* (conhecido também como modelo de insumo produto) ou o *Computable General Equilibrium* (CGE), conseguem obter esses os indicadores citados acima. Porém necessitam de representações espaciais e hidrológicas adequadas.

O fluxograma abaixo demonstra o conceito de modelagem que foi proposto.

Figura 1 – Fluxograma da plataforma de modelagem Integrada



Fonte: Moraes et al. (2021).

Fazendo uso de um Sistema de Suporte à Decisão específico para recursos hídricos (HEAL), foi possível o desenvolvimento de modelos de otimização não lineares com base em uma rede de nós e links, compreendendo mais de 700 nós, representando quatro bacias interligadas no Nordeste do Brasil.

Foi realizada uma conexão desses modelos a uma Matriz de I-O (*Input-Output*) inter-regional que por sua vez foi baseada em uma matriz de Imput-Output brasileira para o ano de 2011 (GUILHOTO et al., 2010), que representava os 76 setores econômicos em cada uma das 75 regiões de interesse.

Esse modelo integrado foi capaz de medir os impactos socioeconômicos setoriais e regionais relacionados às decisões de alocação de água para cada usuário. A representação acerca de um contexto de fornecimento de água escasso na área estudada tomou como medida um período de três anos (2011–2013). Critérios hidrológicos foram empregues como os mais representativos dos instrumentos regulatórios de água.

Como resultado o setor econômico mais afetado negativamente pelo uso do instrumento regulatório foi o setor industrial. Principalmente as indústrias de açúcar e etanol, que são os

principais usuários de água no setor industrial (93,1% do uso de água do setor).

3 CONCLUSÃO

Os modelos hidroeconômicos conseguem agregar em sua estrutura sistemas de engenharia hidrológica e conceitos econômicos de demanda e custos dos recursos hídricos. Eles conseguem apresentar um panorama para os gestores de água, formuladores de políticas ambientais e instituições acerca do valor dos serviços de água. O valor econômico da água pode ser estimado de diversas maneiras e por inúmeras técnicas. A importância de uma boa gestão do valor da água permite que mudanças econômicas, sociais ou ambientais que ocorram não acabem engessando e arcaico o sistema hídrico.

A aparição e aplicação desses modelos remetem as décadas de 1960 e 1970, quando começou a utilização de curvas de demanda econômica de água com o intuito de otimizar sistemas de recursos hídricos. Essas aplicações ocorreram em diversos lugares pelo mundo como: Israel, Estados Unidos e Índia. Ao longo dos tempos os termos foram se alterando, hidrológico-econômico, econômico- hidrológico- agrônômico são exemplos dessas mudanças. As aplicações de modelos hidroeconômicos conseguem abordar inúmeros problemas, entre eles estão: abastecimento de água, expansões de capacidade e infraestrutura, o uso conjunto de águas superficiais e subterrâneas, mercados, preços, gestão entre fronteiras, mudanças climáticas, qualidade da água, etc.

A escolha sobre quais questões abordar no modelo é uma parte complicada para o modelador, devo utilizar simulação e otimização ou apenas um dos dois, devo integrar questões ambientais, o design será holístico ou modular, como representarei o tempo neste modelo.

É notório que a maioria dos trabalhos de modelagem hidroeconômica são feitos e consumidos em ambientes acadêmicos e políticos, gestores de recursos ambientais ainda não recomendam ou possuem um apreço as aplicações desses modelos. Contudo, é função dos modeladores hidroeconômicos continuarem a apresentar seus estudos, apresentando resultados robustos e credibilizados, incluindo dentro de modelos de operações já existentes e manipulados elementos hidroeconômicos.

Um exemplo de modelagem que pode servir de base para o estabelecimento de instrumentos de gestão de água bem projetados, evitando as consequências negativas de conflitos

decorrentes de uma abordagem orientada para o fornecimento na gestão de água. Foi realizada por Moares et al. (2021) e descrita sucintamente na oitava seção desta revisão bibliográfica. A plataforma inovadora presente no trabalho denominado “*Integration of a Network-Based and an Economy-Wide Water Model to Support Decision Making on Water Resources Planning and Management in Northeastern Brazil*” que foi publicada na *Frontiers in Water* (revista que apresenta pesquisas de temas relacionados à água, possui um teor rigoroso de publicação e revisão por parte da comunidade científica) foi um exemplo que a modelagem econômica integrada pode ampliar os aspectos envolvidos nas questões de segurança hídrica, auxiliando na gestão ao introduzir medidas de impacto socioeconômico, em uma escala mais ampla, associadas a decisões de alocação.

Tais ações como o aumento de pesquisas e trabalhos como o realizado por Moraes et al. (2021) possibilitarão que economistas e engenheiros consigam trabalhar com profissionais e gestores de recursos hídricos na análise e tomada de decisões a respeito da eficiência no uso, na transferência, na distribuição e no abastecimento de água.

REFERÊNCIAS

- ALCUBILLA, Roberto Garcia; LUND, Jay R. Derived Willingness-to-Pay for Household Water Use with Price and Probabilistic Supply. **Journal of Water Resources Planning and Management**, online, v. 132, n. 6, p. 424-448, 2006. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9496%282006%29132%3A6%28424%29>. Acesso em: 17 set. 2023.
- ARBUÉS, F.; GARCÍA-VALIÑASM. Á.; MARTÍNEZ-ESPIÑEIRAR. Estimation of residential water demand: a state-of-the-art review. **The Journal of Socio-Economics**, online, v. 32, n. 1, p. 81–102, mar. 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1053535703000052>. Acesso em: 17 set. 2023.
- BEAR, J., LEVIN, O. The Optimal Yield of an Aquifer. International Association of Hydrological Sciences, **IASH Publ.** n.72, p. 401-412, mar. 1967.
- BEAR, J.; LEVIN, O.; BURAS, N. Optimal Utilization of Aquifers as Elements of Water-resource Systems. **IASH Publ.** n.69, p.84 ,dez. 1964.
- BOOKER, J. F.; YOUNG, R. A. Modeling Intrastate and Interstate Markets for Colorado River Water Resources. **Journal of Environmental Economics and Management**, online, v. 26, n. 1, p. 66–87, jan. 1994. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0095069684710059>. Acesso em: 17 set. 2023.
- BRADEN, J. B. Value of Valuation: Introduction. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 126, n. 6, p. 336–338, 2000.
- BRISCOE, J. **IWRM Action Hub RESOURCE Water as an economic good: the idea and what it means in practice.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://iwrmaactionhub.org/node/1482/printable/pdf>. Acesso em: 14 jul. 2023.
- BROUWER, R.; HOFKES, M. Integrated hydro-economic modelling: Approaches, key issues and future research directions. **Ecological Economics**, online, v. 66, n. 1, p. 16–22, maio 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800908000803>. Acesso em: 17 set. 2023.
- BROWN, Thomas C.; DIAZ, Gustavo E.; SVEINSSON, Oli G. B. **Planning Water Allocation in River Basins, Aquarius: a system's approach.** A SYSTEM'S APPROACH. 2002. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/242158854_PLANNING_WATER_ALLOCATION_IN_RIVER_BASINS_AQUARIUS_A_SYSTEM'S_APPROACH. Acesso em: 10 jul. 2023.
- CAI, X. Implementation of holistic water resources-economic optimization models for river basin management – Reflective experiences. **Environmental Modelling & Software**, online, v. 23, n. 1, p. 2–18, jan. 2008.
- CAI, Ximing; MCKINNEY, D. C.; LASDON, L. S. Integrated hydrologic-agronomic-economic model for river basin management. **Journal of Water Resources Planning and Management**, online, v. 129, n. 1, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364815207000746>. Acesso em 16 set. 2023.
- CAI, X.; WANG, D. Calibrating Holistic Water Resources–Economic Models. **Journal of Water Resources Planning and Management**, online, v. 132, n. 6, p. 414–423, nov. 2006. Disponível em:

<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9496%282006%29132%3A6%28414%29>. Acesso em 16 set. 2023.

CARDWELL, H.; MARTIN, L. Integrated Water Resources Management: Definitions and Conceptual Musings: IWRM: Definitions and Conceptual Musings. **Journal of Contemporary Water Research & Education**, online, 2009. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Integrated-Water-Resources-Management%3A-Definitions-Cardwell-Cole/f49a7b6626b98d82754977cad5d958bb4906128e>. Acesso em: 16 set. 2023.

COLBY, B. G. Enhancing instream flow benefits in an era of water marketing. **Water Resources Research**, online, v. 26, n. 6, p. 1113–1120, jun. 1990.

THE DUBLIN Statement on Water and Sustainable Development - UN Documents: Gathering a body of global agreements. Disponível em: <http://www.un-documents.net/h2o-dub.htm>. Acesso em: 10 jul. 2023.

DALHUISEN, J. M. et al. Price and Income Elasticities of Residential Water Demand: A Meta-Analysis. **Land Economics**, online, v. 79, n. 2, p. 292–308, 2003. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/3146872>. Acesso em: 17 set. 2023.

DARÉ, José Carlos. **Caracterização da demanda de água em sistemas de irrigação na bacia do córrego sossego em Itarana-ES**. 2013. 86f. Dissertação (*Magister Scientiae*) – Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2013. Disponível em: <https://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/bitstream/item/2669/1/BRT-caracterizaodademandadeaguaemsistemasdeirrigacaonabaciadocorregodosossego-darfe.pdf>. Acesso em: 16 set. 2023.

DIAZ, G. E. **AQUARIUS, a modeling system for river basin water allocation**. [s.l.] U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, 1997.

DIAZ, Gustavo E.; BROWN, Thomas C.; SVEINSSON, Oli. **Aquarius: a modeling system for river basin water allocation**. A Modeling System for River Basin Water Allocation. 2000. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20170115213739/https://www.fs.fed.us/rm/value/aquarius>. Acesso em: 10 jul. 2022.

DRAPER, A. J. et al. Economic-Engineering Optimization for California Water Management. **Journal of Water Resources Planning and Management**, online, v. 129, n. 3, p. 155–164, 2003.

DUPUIT, J. De la mesure de l'utilité des travaux publics (1844). **Revue française d'économie**, v. 10, n. 2, p. 55–94, 1995.

EASTER, K. W.; DINAR, A.; ROSEGRANT, M. W. Water Markets: Transaction Costs and Institutional Options. **Natural Resource Management and Policy**, online, p. 1–18, 1998.

ESPEY, M.; ESPEY, J.; SHAW, W. D. Price elasticity of residential demand for water: A meta-analysis. **Water Resources Research**, online, v. 33, n. 6, p. 1369–1374, jun. 1997.

EVANS, E. M. et al. Achieving efficiency and equity in irrigation management: an optimization model of the El Angel watershed, Carchi, Ecuador. **Agricultural Systems**, online, v. 77, n. 1, p. 1–22, 1 jul. 2003.

FISHER, F. M. et al. Optimal water management and conflict resolution: The Middle East Water Project. **Water Resources Research**, online, v. 38, n. 11, p. 25–125–17, nov. 2002.

FISHER, Franklin M.; HUBER-LEE, Annette. **Liquid Assets: an economic approach for water management and conflict resolution in the middle east and beyond**. Washington: Rff Press, 2005.

- FRANCISCO, L. DO E. S.; ARICA, G. M. DE. Contribuição para análise dos custos no tratamento da água utilizando programação linear fuzzy: um modelo para o gerenciamento do abastecimento do município de Campos (RJ). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, online, v. 23, n. 4, p. 655–664, 2018.
- GISSER, M.; MERCADO, A. Economic Aspects of Ground Water Resources and Replacement Flows in Semiarid Agricultural Areas. **American Journal of Agricultural Economics**, online, v. 55, n. 3, p. 461–466, 1973.
- GISSER, M.; MERCADO, A. Integration of the agricultural demand function for water and the hydrologic model of the Pecos Basin. **Water Resources Research**, online, v. 8, n. 6, p. 1373–1384, 1 dez. 1972.
- GRIFFIN, R. C. The Potential for Water Market Efficiency When Instream Flows Have Value. **American Journal of Agricultural Economics**, online, v. 75, n. 2, p. 292–303, 2 fev. 1993.
- GRIFFIN, R. C. **Water resource economics the analysis of scarcity, policies, and projects**. London: MIT Press, 2006.
- GRIFFIN, R. C.; CHANG, C. Seasonality in Community Water Demand. **Western Journal of Agricultural Economics**, online, v. 16, n. 2, p. 207–217, 1991.
- HAROU, J. J.; PULIDO-VELAZQUEZ, Manuel; ROSENBERG, David; MEDELLÍN-AZUARA, Josué; LUND, Jay; HOWITT, Richart. Hydro-economic models: Concepts, design, applications, and future prospects. **Journal of Hydrology**, online, v. 375, n. 3-4, p. 627-643, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169409003588>. Acesso em: 16 set. 2023.
- HOWE, C. W.; LINAWEAVER, F. P. The impact of price on residential water demand and its relation to system design and price structure. **Water Resources Research**, online, v. 3, n. 1, p. 13–32, mar. 1967.
- HOWITT, R. E. Empirical analysis of water market institutions: The 1991 California water market. **Resource and Energy Economics**, online, v. 16, n. 4, p. 357–371, nov. 1994.
- HOWITT, R. E. Positive Mathematical Programming. **American Journal of Agricultural Economics**, online, v. 77, n. 2, p. 329–342, 1 maio 1995
- IKEDA, Y. Hermann Heinrich Gossen: a Wirkungsgeschichte of an ignored mathematical economist. **Journal of Economic Studies**. v. 27, n. 4/5, p. 394–415, 1 ago. 2000.
- JENKINS, M. W.; LUND, J.; HOWITT, R.; DRAPER, A.; MSANGI, S.; TANAKA, S.; RITZEMA, R.; MARQUES, G. Optimization of California's Water Supply System: Results and Insights. **Journal of Water Resources Planning and Management**, online, v. 130, n. 4, p. 271–280, 2004. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9496%282004%29130%3A4%28271%29>. Acesso em: 16 set. 2023.
- JENKINS, M. W.; LUND, J. R. Integrating Yield and Shortage Management under Multiple Uncertainties. **Journal of Water Resources Planning and Management**, online, v. 126, n. 5, p. 288–297, set. 2000.
- JIMENEZ-CISNEROS, B. Responding to the challenges of water security: the Eighth Phase of the International Hydrological Programme, 2014–2021. **Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences**, online, v. 366, p. 10–19, 10 abr. 2015.
- JONKMAN, S. N.; BOCKARJOVA, M.; BERNARDINI, P. Integrated hydrodynamic and economic modelling of flood damage in the Netherlands. **Ecological Economics**, online, v. 66, n. 1, p. 77–90,

2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800907006155>. Acesso em 16 set. 2023.

KINDLER, J.; RUSSELL, C. S. **Modeling Water Demands**. [s.l: s.n.].

KNEESE, A. Economic-ecological modeling: Economic-ecological modeling. Leon C. Braat and W.F.J. van Lierop (Editors). Studies in regional science and urban economics, 16. North-Holland, Amsterdam, 1987. xii + 330 pp., Dfl. 170.00. ISBN 0- 444-70298-9. **Ecological Economics**, v. 4, n. 1, p. 76–78, 1991.

L. JEFF LEFKOFF; GORELICK, S. M. Simulating physical processes and economic behavior in saline, irrigated agriculture: model development. **Water Resources Research**, online, v. 26, n. 7, p. 1359–1369, 1 jul. 1990.

LABADIE, J. W. Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review. **Journal of Water Resources Planning and Management**, online, v. 130, n. 2, p. 93–111, 2004.

LEFKOFF, L. J.; GORELICK, S. M. Benefits of an irrigation water rental market in a saline stream-aquifer system. **Water Resources Research**, online, v. 26, n. 7, p. 1371–1381, jul. 1990.

LETCHER, R. **Implementation of a water allocation decision support system in the Namoi and Gwydir Valleys**. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Implementation-of-a-water-allocation-decision-in-Letcher/67b311cba40d6d0513b82892a4a7a508ce1a8073>. Acesso em: 10 jul. 2023.

LOUCKS, D. P.; STEDINGER, J. R.; HAITH, D. A. **Water Resource Systems Planning and Analysis**. [s.l.] Prentice Hall, 1981.

LUND, J. R.; CAI, X.; CHARACKLIS, G. W. Economic Engineering of Environmental and Water Resource Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, online, v. 132, n. 6, p. 399–402, 2006.

LUND, J. R.; ISRAEL, M. Water Transfers in Water Resource Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, online, v. 121, n. 2, p. 193–204, mar. 1995.

MAASS, A. et al. **Design of Water-Resource Systems: New Techniques for Relating Economic Objectives, Engineering Analysis, and Governmental Planning**. Cambridge: Harvard University Press, 1962.

MADDAUS, W. **Water conservation**. Denver, American Water Works Association, 1987. Paginação irregular.

MORAES, M. M. G. A. et al. Sistema de Apoio a Decisão Espacial para Gestão de Bacias Hidrográficas Incorporando Modelagem Econômico-Hidrológica Integrada para Alocação de Água: SADEGBHidro. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 8, 2006, Gravatá. **Anais..** Gravatá: ABRH, 2006b.

MORAES, M. M. G. A.; CIRILO, J. A.; SAMPAIO YONY, R. S. P. V. Gestão de recursos hídricos usando modelagem econômico-hidrológica integrada na identificação de alocação ótima de água entre usos múltiplos. **REGA**, v. 3, n. 1, p. 29 – 44, jun 2006.

MORAES, M. M. G. A. et al. Apoio a Decisão Na Gestão de Recursos Hídricos Usando Modelo Econômico-Hidrológico Integrado Para Alocação Ótima de Água: Uma Aplicação na Bacia do Rio Pirapama. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16, 2005, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: ABRH, 2005.

MORAES, M. M. G. A. et al. Avaliação de mecanismos econômicos alocativos na gestão de bacias hidrográficas usando modelo econômico-hidrológico integrado. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 7, 2006, Gravatá. **Anais.** Gravatá: ABRH, 2006.

MORAES, Márcia Maria Guedes Alcoforado de; SILVA, Gerald Norbert Souza da; CUNHA, Marcelo Pereira da; DIAS, Nilena; CARDOSO, Terezinha de Fatima; GUILHOTO, Joaquim; CANDIDO, Laise Alves; SANTOS, Reinan. **Integration of a Network-based and an Economy-wide Water Model to Support Decision Making on Water Resources Planning and Management in Northeastern Brazil**, 2021. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/water/articles/10.3389/frwa.2021.681723/full>. Acesso em: 17 set. 2023.

MORAES, Márcia Maria Guedes Alcoforado de; SAMPAIO, Yony; CIRILO, José Almir; CAI, Ximing. Modelo econômico-hidrológico integrado para gestão de bacias hidrográficas: abordagem piece-by-piece para incorporar a capacidade de autodepuração dos rios e limites de trofia dos reservatórios. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, online, v. 13, n. 1, p. 43-55, 2008.

MARQUES, G.F., et al. Economically driven simulation of regional water systems: Friant-Kern, California. **Journal of Water Resources Planning and Management**, online, v. 132, n. 6, p. 468–479, 2006.

MARSHALL, A. **Princípios de economia**. [s.l.: s.n.].

MARSHALL, ALFRED. “On Value.” In: WHITAKER, J.K. **The Early Economic Writings of Alfred Marshall 1867-1890**. Nova York, NY: The Free Press Macmillan, 1975. p. 126

MCKINNEY, D. C.; CAI, X.; ROSEGRANT, M.; RINGLER, C.; SCOTT, C.; **Modeling water resources management at the basin level: review and future directions**. Colombo: International Water Mangement Institute, 1999. Disponível em: <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/36527>. Acesso em: 17 set. 2023.

MOURA, M. Â. B. DA. **Os custos totais da água como um bem econômico e social no município da Praia (Cabo Verde)**. 2011. 109f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Fortaleza, UFC, 2011.

NEWLIN, B. D.; JENKINS, Marion; LUND, Jay; HOWITT, Richard. Southern California Water Markets: Potential and Limitations. **Journal of Water Resources Planning and Management**, online, v. 128, n. 1, p. 21–32, 2022. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9496%282002%29128%3A1%2821%29>. Acesso em: 17 set. 2023.

NOEL, J. E.; HOWITT, R. E. Conjunctive multibasin management: An optimal control approach. **Water Resources Research**, online, v. 18, n. 4, p. 753–763, ago. 1982. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/WR018i004p00753>. Acesso em: 17 set. 2023.

OECD. **The Price of Water Trends in OECD Countries**. [s.l.] OECD Publishing, 1999.

OLIVEIRA, Emanoella; FONTES, Andrea; GARRIDO, Raymundo; VICHETE, William; MEDEIROS, Yvonilde; ANDRADE, Paulo Romero. Abordagem Hidroeconômica como Subsídio à Tomada de Decisão na Alocação de Água em Reservatório do Semiárido Brasileiro. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, Porto Alegre, v. 18, n. 21, p. 1-27, 2021.

SANTOS, Reinan Ribeiro Souza; MORAES, Márcia Maria Guedes Alcoforado de; CUNHA, Marcelo Pereira da; SILVA, GERALD Norbert Souza da; DIAS, Nilena. **Acomplamento de modelo de**

alocação de água baseado em rede a modelagem de insumo-produto para avaliação de instrumentos de gestão regulatórios: proposta metodológica e primeiros resultados em bacias interligadas do agreste pernambucano, In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2021, Belo Horizonte. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=13338>. Acesso em: 17 set. 2023.

UNESCO. **Relatório mundial das Nações Unidas sobre desenvolvimento dos recursos hídricos 2021:** o valor da água; fatos e dados. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375751_por. Acesso em: 17 set. 2023.

RENZETTI, S. **The Economics of Water Demands**. [s.l: s.n.].

ROGERS, P. The Integrated Use of Ground and Surface Water in Irrigation Project Planning. **American Journal of Agricultural Economics**, online, v. 52, n. 1, p. 13–24, 1970. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/1238158>. Acesso em: 17 set. 2023.

ROGERS, P. Water is an economic good: how to use prices to promote equity, efficiency, and sustainability. **Water Policy**, online, v. 4, n. 1, p. 1–17, 2002.

ROSEGRANT, M. W.; RINGLER, C.; MCKINNEY, D. C.; CAI, X.; KELLER, A.; DONOSO, G. Integrated economic-hydrologic water modeling at the basin scale: the Maipo river basin. **Agricultural Economics**, online, v. 24, n. 1, p. 33–46, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169515000001134>. Acesso em: 17 set. 2023.

ROSENBERG, D. E.; TARAWNEH, T.; ABDEL-KHALEW, R.; LUND, J. Modeling integrated water user decisions in intermittent supply systems. **Water Resources Research**, online, v. 43, n. 7, 2007. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2006WR005340>. Acesso em: 17 set. 2023.

SAHINIDIS, N. V. Optimization under uncertainty: state-of-the-art and opportunities. **Computers & Chemical Engineering**, online, v. 28, n. 6-7, p. 971–983, 2004.

SAMUELSON, Paul A.; NORDHAUS, William D. **Economia**. Lisboa: McGraw-Hill, 2011.

SANCHEZ, D. C. **Estudo para caracterização da demanda urbana de água no setor residencial da cidade de São Paulo**. 2007. 168Ff. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica de São Paulo – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-15022008-095605/publico/DiegoCesarSanchezCorr2007.pdf>. Acesso em: 17 set. 2023.

SCHIERLING, S. M.; LOOMIS, J. B.; YOUNG, R. A. Irrigation water demand: A meta-analysis of price elasticities. **Water Resources Research**, online, v. 42, n. 1, 2006. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2005WR004009>. Acesso em: 17 set. 2023.

SCHOUPS, G.; ADAMS, Lee; MINJARES, José Luis; GORELICK, Steven. Reliable conjunctive use rules for sustainable irrigated agriculture and reservoir spill control. **Water Resources Research**, online, v. 42, n. 12, dez. 2006. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2006WR005007>. Acesso em: 17 set. 2023.

SILVA, G. N. S. DA. **Apoio à gestão sustentável de recursos hídricos através de um modelo hidro-econômico desenvolvido em diferentes cenários de uso do solo e clima:** o caso do sub-médio do São Francisco. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/25295>. Acesso em: 8 ago. 2023.

SILVA, J. B. DA. **Modelagem da demanda de água de abastecimento para a cidade de Pirassununga - SP**. 2019. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Centro de Ciências

Exatas e de Tecnologia – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/11457?show=full>. Acesso em: 17 set. 2023.

STRZEPEK, K. M. MITSIM-2: A Simulation Model for Planning and Operational Analysis of River Basin Systems. **IIASA Working Paper**, online, WP 81-124, 1981. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/33893108.pdf>. Acesso em: 17 set. 2023.

TILMANT, A.; PINTE, D.; GOOR, Q. Assessing marginal water values in multipurpose multireservoir systems via stochastic programming. **Water Resources Research**, online, v. 44, n. 12, dez. 2008. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2008WR007024>. Acesso em: 17 set. 2023.

TORRES, M. de O.; RODRIGUES, L. N.; PAZ, J. M. Hydro-economic model for the assessment of water resources allocation and availability impacts on agricultural income. In: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 2, 2014, Fortaleza. **Anais.** Fortaleza: EMBRAPA, 2014.

UN WORLD WATER DEVELOPMENT REPORT 2021. Disponível em: <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2021>. Acesso em: 10 jul. 2023.

YOUNG, Robert A.; LOOMIS, John. **Determining the Economic Value of Water**. New York: Routledge, 2005. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9780203784112/determining-economic-value-water-robert-young-john-loomis>. Acesso em: 17 set. 2023.