



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

TÁBATHA DALLPOSSO MACHADO

**USO DE MODELAGEM HIDRO ECONÔMICA EM
ESTRATÉGIAS DE ALOCAÇÃO DA DEMANDA
AGRÍCOLA EM PERÍODOS CRÍTICOS**

Porto Alegre
Dezembro 2015

TÁBATHA DALLPOSSO MACHADO

USO DE MODELAGEM HIDRO ECONÔMICA EM ESTRATÉGIAS DE
ALOCAÇÃO DA DEMANDA AGRÍCOLA EM PERÍODOS CRÍTICOS

TRABALHO DE CONCLUSÃO APRESENTADO AO
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ENGENHEIRO
AMBIENTAL.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Fernandes Marques

Porto Alegre

Dezembro 2015

TÁBATHA DALLPOSSO MACHADO

USO DE MODELAGEM HIDRO ECONÔMICA EM ESTRATÉGIAS DE ALOCAÇÃO
DA DEMANDA AGRÍCOLA EM PERÍODOS CRÍTICOS

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido em 11/12/2015 pela Comissão avaliadora constituída pelos professores:

Banca Avaliadora:

.....
Prof^a. Dra. Ada Liz Arancibia Samaniego – Professora da Universidad Nacional de Ingeniería –
Facultad de Ingeniería Civil – LIHA, Peru.

.....
Prof. Dr. Guilherme Fernandes Marques – Professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas

.....
Prof. Dr. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva – Professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas

Conceito:.....

Resumo

MACHADO, T. D. Uso de Modelagem Hidro Econômica em Estratégias de Alocação da Demanda Agrícola em Períodos Críticos. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

A crescente demanda hídrica em decorrência do aumento da produção e eficiência na plantação da cana de açúcar vai de encontro com a diminuição da disponibilidade de água própria para este fim. O presente trabalho avaliou a aplicação de modelos hidro econômicos na alocação de água para irrigação em períodos de escassez, tendo como base de estudo a bacia do Araguari, em Minas Gerais. Os modelos têm como objetivo simular a demanda real de cada usuário agrícola que, ao contrário do que tradicionalmente é utilizado, varia conforme a disponibilidade e o preço da água. Para tanto, foi aplicado o Modelo Agro Econômico desenvolvido por E. R. Howitt et al (2001) e E.R. Howitt et al (2003). Este modelo possui como resposta a função econômica dos usuários agrícolas, caracterizada pelo benefício marginal da água. A partir desta, utilizou-se o método de integração trapezoidal para inferir a função custo da escassez, que foi utilizada como dado de entrada para o Modelo de Alocação de Água, elaborado por Marques et al (2006), o qual usa o critério de alocação equimarginal para estabelecer a melhor distribuição de água para o sistema, ou seja, aquela que gere menor custo de escassez. Foram explorados três cenários, durante 60 meses cada, de crescente estresse hídrico: o primeiro com redução em 10% da série temporal de água disponível, o segundo prevendo a expansão da cana de açúcar na bacia do Araguari e o terceiro demandando uma vazão mínima para a geração energética na hidrelétrica de NP, caracterizando os múltiplos usos da água. Em todos os cenários observou-se custo da escassez, e o mesmo progrediu significativamente no evoluir dos cenários. No cenário 1, o custo total da escassez foi 3.96 milhões de Reais, enquanto no cenário 2 este custo foi de 106.5 milhões e 200.44 milhões no cenário 3. O resultado dos cenários 2 e 3 indicam que, apesar de a demanda agrícola ter se mantido a mesma, a restrição energética estava indo de encontro com a alocação ótima do sistema, acarretando prejuízos aos usuários a montante de NP. Observou-se entre os usuários com escassez de água de mesma ordem um custo de escassez muito distinto, reiterando a importância da alocação equimarginal para que se alcance o menor prejuízo do sistema. Foi também analisada a utilização da água subterrânea dentre os usuários que possuem outorga, e observou-se crescente utilização de tal recurso, que chegou a 100% dos usuários a montante de NP no cenário 3. A aplicação dos modelos hidro econômicos apresentaram informações importantes sobre o sistema estudado, permitindo avaliar o impacto

econômico de políticas operacionais alternativas. Estes resultados devem dar subsídio e orientação para gestores na tomada de decisão no planejamento do uso de recursos hídricos e nas políticas de alocação a serem implementadas.

Palavras Chave: Modelo hidro econômico, escassez, custo da escassez, benefício marginal da água.

Abstract

MACHADO, T. D. Usage of Hydro Economic Models in Strategies of Agricultural Demand Allocation for Critical Time. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

The growing water demand as a result of increased production and efficiency in sugar cane crops disagrees with decreasing availability of water for this purpose. The present study evaluated the application of hydro economic models in water allocation for irrigation in seasons of water shortage, based on the basin of Araguari, Minas Gerais. The models are designed to simulate the real demand of each agricultural user and, on the contrary to what is traditionally used, varies according to the availability and price of water. Thus, the Agro Economic Model, developed by ER Howitt et al (2001) and ER Howitt et al (2003) was applied. This model's output is the economic function of agricultural users, characterized by the marginal cost of water. From this, we used the trapezoidal integration method to infer the cost of shortage function, which was used as input for the water Allocation Model, produced by Marques et al (2006), which uses equimarginal allocation criteria to establish the best water distribution to the system, meaning the one which generates the lowest cost of water shortage. Three scenarios were explored for 60 months each of increasing water stress: the first with 10% reduction in the time series of water availability; the second, foreseeing sugar cane expansion in the Araguari basin; and the third demanding a minimum flow for energy generation in hydroelectric NP, featuring the water multiple uses. In all scenarios, there was a cost for water shortage, and it increased significantly as the scenarios evolved. In scenario 1, the total cost of the shortage was 3.96 million reais, while in scenario 2 this cost was 106.5 million and 200.44 million in scenario 3. The result of Scenarios 2 and 3 indicate that even though agricultural demand remained the same, energy restriction was going against optimal allocation system, causing users upstream of NP an impairment. It was observed among users with water shortage of the same order a very distinct cost of shortage, reiterating the importance of equimarginal allocation for achieving the best benefit to the system. The use of groundwater from users who have granted was also analyzed, and there was increasing use of this feature from scenarios 1 to 3, reaching 100% of users upstream of NP in scenario 3. The application of hydro economic models presented important information about the system studied, in order to evaluate the economic impact of alternative operational policies. These results should give subsidy

and guidance to managers in decision making in planning the use of water resources and the allocation policies to be implemented.

Keywords: Hydro economic model, scarcity, scarcity costs, marginal cost of water

Lista de Figuras

Figura 1 - Evolução da produção de Etanol e Cana de Açúcar.....	6
Figura 2 - Evolução Frota Brasileira Veículos Flex.....	7
Figura 3 - Localização da Bacia do Araguari.....	8
Figura 4 - Variação no Armazenamento do Reservatório de Nova Ponte.....	11
Figura 5 - Atribuição de Valor Econômico aos múltiplos usos da água.....	14
Figura 6 - Função Econômica Exemplo	19
Figura 7 - Obtenção da Função Custo da Escassez a partir da Função Econômica.....	20
Figura 8 - Esquema Simplificado de Bacia Hidrográfica Exemplo com duas Sub-Bacias	21
Figura 9 - Diagrama Unifilar Modelada da Bacia do Araguari	24
Figura 10 - Função Custo da Escassez em Segmentos de Retas, adaptado de Guilherme Fernandes Marques et al. (2011).....	27
Figura 11 - Fluxograma Resumo da Metodologia	33
Figura 12 -Gráfico da Evolução do Armazenamento dos Reservatórios Cenário 1	35
Figura 13 - Gráfico da Evolução do Armazenamento dos Reservatórios Cenário 2	36
Figura 14 - Gráfico da Evolução do Armazenamento dos Reservatórios Cenário 3	36
Figura 15 - Gráfico de Evolução Armazenamento NP e Valor Marginal da Água nas Turbinas de NP.....	37
Figura 16 - Demandas das DA 0, 3, 6 e DC2 no mês de janeiro.....	42
Figura 17 - Valor Marginal da Água nas Sub Bacias Cenário 1	46
Figura 18 - Valor Marginal da Água nas Sub Bacias Cenário 2	47
Figura 19 - Valor Marginal da Água nas Sub Bacias Cenário 3	48

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Resultado das simulações de distribuições da Bacia Hidrográfica Exemplo	22
Tabela 2 - Descrição das Variáveis de entrada do ME	26
Tabela 3 - Descrição das Variáveis de Entrada do MA	28
Tabela 4 – Cenário 2 Expansão da Cana de Açúcar: Incrementos de Área e Demanda Agrícola por Sub Bacia	31
Tabela 5 - Resultado Geral dos Cenários Simulados	34
Tabela 6 - Distribuição de Água por ano e Sub Bacia Cenário 1	38
Tabela 7 - Custo da Escassez por ano e Sub Bacia do Cenário 1	39
Tabela 8 -Distribuição de Água por ano e Sub Bacia Cenário 2	39
Tabela 9 - Custo da Escassez por ano e Sub Bacia do Cenário 2	40
Tabela 10- Distribuição de Água por ano e Sub Bacia Cenário 3	41
Tabela 11 - Custo da Escassez por ano e Sub Bacia do Cenário 3	42
Tabela 12 - Captação de água de fontes subterrâneas e Outorga Autorizada Cenário 1	43
Tabela 13-Captação de água de fontes subterrâneas e Outorga Autorizada Cenário 2	44
Tabela 14 - Captação de água de fontes subterrâneas e Outorga Autorizada Cenário 3	44

Sumário

Resumo	iv
Abstract	vi
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	ix
Sumário	x
1. Introdução	1
1.1. Justificativa.....	4
1.2. Objetivos.....	4
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1. Etanol no Brasil.....	5
2.2. Cana de Açúcar: projeções e impactos.....	7
2.3. Uso da Água.....	10
2.4. Modelos Hidro Econômicos.....	12
2.5. Emprego de modelos Hidro Econômicos.....	15
3. Metodologia	17
3.1. Contextualização.....	18
3.1.1. Funções Econômica (fe) e Custo da Escassez (ce).....	18
3.1.2. Alocação Equimarginal.....	20
3.2. Bacia Hidrográfica do Araguari.....	22
3.3. Modelo Agro Econômico (ME).....	25
3.3.1. Variáveis de Entrada e Função Objetivo.....	26
3.3.2. Variáveis de Retorno: função econômica e função custo da escassez.....	27
3.4. Modelo de Alocação (MA).....	28
3.4.1. Variáveis de Entrada e Função Objetivo.....	28
3.4.2. Variáveis de Retorno: Alocação Equimarginal da Água.....	30
3.5. Cenários Simulados.....	30
3.5.1. Cenário 1: Escassez.....	30
3.5.2. Cenário 2: Escassez e Expansão Cana de Açúcar.....	31
3.5.3. Cenário 3: Uso da Água – Competição com Demanda Energética.....	32
4. Resultados	34
4.1. Reservatórios.....	35
4.2. Distribuição de Água e Custo da Escassez.....	38
4.3. Água Subterrânea.....	43
4.4. Valor Marginal da Água.....	45
5. Conclusão	49

Referências	53
ANEXO I	56
ANEXO II	58

1. Introdução

A necessidade energética em detrimento do desenvolvimento econômico é uma premissa no mundo todo. Fontes diretas e indiretas de energia estão sendo cada vez mais exploradas, e o desenvolver tecnológico das mesmas aumentam a cada dia. Neste contexto, o etanol ganha destaque internacional pelo seu potencial de substituição e/ou incremental dos convencionais combustíveis fósseis como fonte alternativa e renovável. Os principais produtores mundiais de etanol são EUA e Brasil, tendo o Brasil uma projeção de 28,5 bilhões de litros produzidos na safra de 2014/15 (Apla - Arranjo Produtivo Local do Álcool). No Brasil, a cana de açúcar é utilizada como matéria prima na produção do etanol.

A cana de açúcar está presente na história do Brasil desde os tempos da colonização europeia, e desde então a área plantada e os colmos produzidos vêm sempre aumentando. Somente na última década, estima-se que a expansão do plantio de cana de açúcar na região centro-oeste brasileiro foi de 379% (Embrapa, 2015). Tradicionalmente, pelas condições naturais e climáticas do país, a cana de açúcar não possui cultivo irrigado. Entretanto, fatores como períodos de estiagem, expansão territorial e busca do aumento da produtividade vêm mudando o tipo de plantio, que cada vez mais conta com a implementação de tecnologias de fertilizantes e irrigação para produção satisfatória.

A necessidade de busca da otimização dos recursos produtivos, o aumento da competitividade no mercado produtivo, a necessidade de aumento de produtividade e a redução de custos levam a uma tendência de adoção de tecnologias capazes de tornar a exploração agrícola cada vez mais competitiva e rentável. A irrigação exerce papel fundamental no agronegócio, como uns dos principais instrumentos para modernização da agricultura brasileira, permitindo enormes benefícios, em especial no caso do cultivo da cana-de-açúcar. (Ricardo Galvão de Freitas et al., 2009)

Indo de encontro à tendência de aumento da demanda voltada para irrigação da cana de açúcar está a diminuição da disponibilidade de água própria para o consumo humano. No Brasil, este recurso está severamente prejudicado, com reservatórios chegando a níveis alarmantes, marcando os anos de 2014 e

2015 com uma iminente crise hídrica. A má conduta do usuário brasileiro, que se utiliza da água como recurso farto e pouco custoso, aliado ao uso de técnicas ultrapassadas de critérios de distribuição da mesma, são fatores que contribuíram para a situação atual.

A escassez da água é resultante do consumo crescente, mas também pelo mau uso dos recursos hídricos. O desperdício é observado tanto no uso doméstico, causado pelo desconhecimento, falta de orientação e informação aos cidadãos, na deficiência técnica e administrativa dos serviços de abastecimento com vazamentos e rompimento de redes e na agricultura em métodos ineficientes de irrigação. O não reuso da água para atividades industriais também é outro exemplo que mais se relaciona com o desperdício e à falta de políticas públicas eficientes de controle e gestão. (Amandio Almeida Júnior; Fernando Braz Tangerino Hernandez)

Além de desempenhar papel imprescindível à sobrevivência humana, os recursos hídricos também representam parte considerável da fonte energética brasileira. Os recursos hídricos têm grande influência nas atividades econômicas em contexto mundial e, no Brasil, dentre outras atividades, eles contribuem em 62% no sistema de abastecimento energético por hidrelétricas (ANEEL) e 5.8% do PIB quando vinculada à agricultura (CIA, 2014).

De acordo com a Política Nacional de Recursos Hídricos, lei 9.433/97, “a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico” e, portanto, possui um valor de mercado atribuído. Por conta desta característica, o preço da água está sujeito a variações de acordo com sua disponibilidade espacial e temporal, e quando escassa, seu valor aumenta, refletindo em alteração na demanda prevista pelo usuário – que pode optar ou não por diminuir seu consumo. Sendo assim, a demanda real do usuário não é constante, e está vinculada ao preço da água, o que historicamente não é levado em consideração no planejamento dos usos dos recursos hídricos para abastecimento urbano e agrícola. Em tempos de escassez, isto acarreta em um sistema ineficiente, causando prejuízos à irrigação, que usufrui de 47% da distribuição da água (Frederico do Valle Ferreira de Castro et al., 2005), e, conseqüentemente, perdas ao país.

Neste âmbito, escolheu-se avaliar o aumento no consumo da água em decorrência da expansão da cana de açúcar, assim como o impacto econômico subsequente do valor da água, utilizando a Bacia do Araguari, no Oeste de Minas

Gerais, como base de estudo. Para tanto, fez-se uso da Modelagem Hidro Econômica, ferramenta que vem ganhando força nos recursos de gestão e planejamento. Os Modelos Hidro Econômicos possuem o diferencial de reunir as diversas fontes de conflitos de uso de água, seja para abastecimento humano, industrial, agrícola, ambiental ou de geração de energia, através de um denominador comum: o custo da água.

Existe uma outra maneira de se pensar nos conflitos de água, de forma que leve à resolução das disputas com uma gestão otimizada da água. Esta maneira envolve pensar sobre o valor da água e mostra que a água pode, de fato, ser usada como trade off. (Franklin M. Fisher, 2002)

Para esta pesquisa, foram utilizados dois modelos de otimização. O primeiro atribuiu a função de demanda dos usuários agrícolas da região, de acordo com o benefício marginal da água, e o segundo teve função de alocar a água disponível perante os usuários agrícolas, urbanos e outros. Avaliou-se três cenários de sequente agravamento de estresse hídrico. No cenário inicial, a água foi reduzida a 10% da série histórica da bacia, o segundo cenário, com a mesma quantidade de água disponível, tem contabilizado em sua demanda a expansão da cana de açúcar irrigada, e o terceiro cenário simula os usos múltiplos da água por meio de uma restrição de vazão mínima em uma das usinas hidrelétricas presente no sistema. Tratando de englobar a Lei das Águas 9.433/97, estipulou-se que as demandas urbanas e outras (ambientais, industriais) fossem alocadas prioritariamente, não podendo a demanda agrícola receber água antes de o uso prioritário ser atendido.

Além da otimização na distribuição da água perante os usuários, o modelo hidro econômico ainda fornece informações importantes sobre o comportamento dos reservatórios do sistema, a evolução do uso de água subterrânea, o custo da escassez por unidade de água, o valor marginal da água e o impacto econômico de políticas operacionais alternativas – como no cenário em que havia obrigatoriedade de vazão mínima em hidrelétrica para geração de energia. Estes resultados devem dar subsídio e orientação para gestores na tomada de decisão no planejamento do uso de recursos hídricos e nas políticas de alocação a serem implementadas.

1.1. Justificativa

A crescente demanda hídrica em decorrência do aumento da produção e eficiência na plantação da cana de açúcar vai de encontro com a diminuição da disponibilidade de água própria para este fim. Desta forma, existe uma necessidade de exploração de ferramentas e estudos de apoio para as decisões dos usos da água por partes dos gestores, de forma que as decisões tomadas por estes sejam as de maior benefício para os stakeholders.

1.2. Objetivos

O trabalho tem como objetivo analisar os conflitos resultantes dos múltiplos usos da água em cenários de crescente estresse hídrico, e encontrar o sistema de alocação de água que culmina na melhor solução do ponto de vista econômico para a bacia hidrográfica de estudo.

2. Revisão Bibliográfica

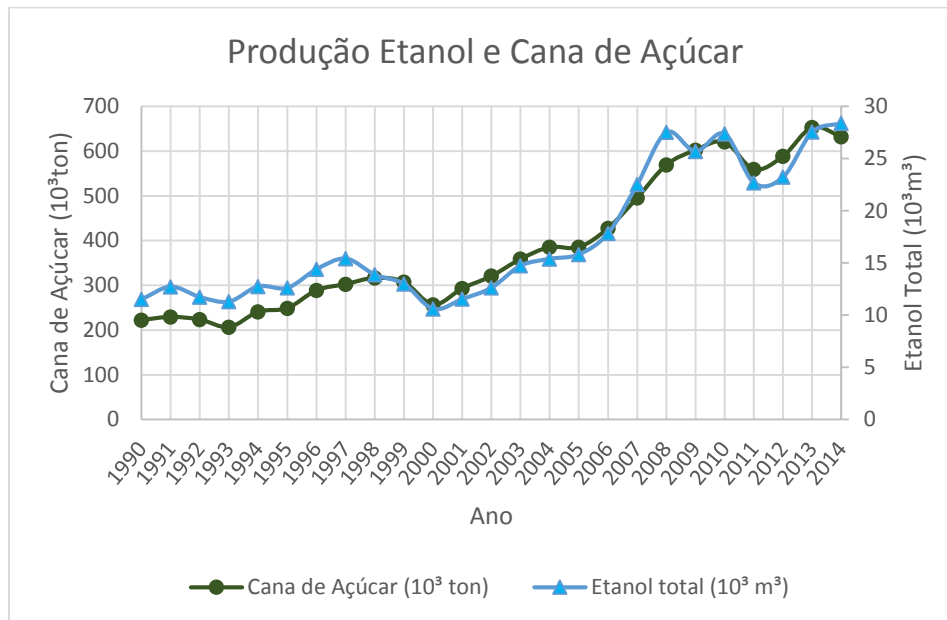
A crescente busca ao desenvolvimento e novas tecnologias está diretamente ligada à disponibilidade de energia. Em frente a insuficiência energética, trava-se o crescimento da maior parte dos setores industriais, econômicos, urbanos e sociais do país. Perante tal entrave, a busca por diferentes fontes energéticas é uma constante preocupação em todo o mundo, e no Brasil não é diferente. Por se tratar de um país de grande área, solos férteis e alto potencial para agricultura, a produção de etanol a partir da cana de açúcar tornou-se uma alternativa energética propícia e favorável as condições do país. O aumento da demanda energética associada à crise do petróleo de 1970, incentivou o governo brasileiro a avaliar a capacidade de substituição que o etanol possui perante os combustíveis de transporte tradicionais, passando a estimular e criar políticas de apoio ao crescimento deste setor (Puppim de Oliveira, 2002 apud Alexandros Gasparatos; Per Stromberg, 2012). Pode-se dizer que o Brasil foi o precursor na produção e utilização de biocombustível líquido como alternativa às fontes clássicas fósseis e não-renováveis (Alexandros Gasparatos; Per Stromberg, 2012).

2.1. Etanol no Brasil

O programa Proálcool foi desenvolvido pelo governo brasileiro no ano de 1975, e marcou o início da evolução da produção, consumo e venda do etanol. Além de diversos subsídios concedidos aos agricultores e destilarias, para promover expansão de plantação da cana de açúcar e a melhoria dos processos de produção (Puppim de Oliveira, 2002 apud Alexandros Gasparatos; Per Stromberg, 2012), o governo decretou como obrigatória a mistura do etanol à gasolina, que dentre 1976 e 1992 variava entre 10% e 22% (E10-E22), passando para a faixa de 20% a 25% em 2007 (E20-E25) e em março de 2015, foi aumentada para 27% (Ministério da Agricultura, portaria nº75 de 2015). A prática de tais políticas alavancou o crescimento do setor e garantiu o sucesso da implantação do etanol para segurança energética do país e moeda de troca em mercado internacional. A Figura 1 apresenta os índices de produção de cana

de açúcar e etanol, demonstrando a clara relação entre os dois e reforçando o principal destino da cana de açúcar do país.

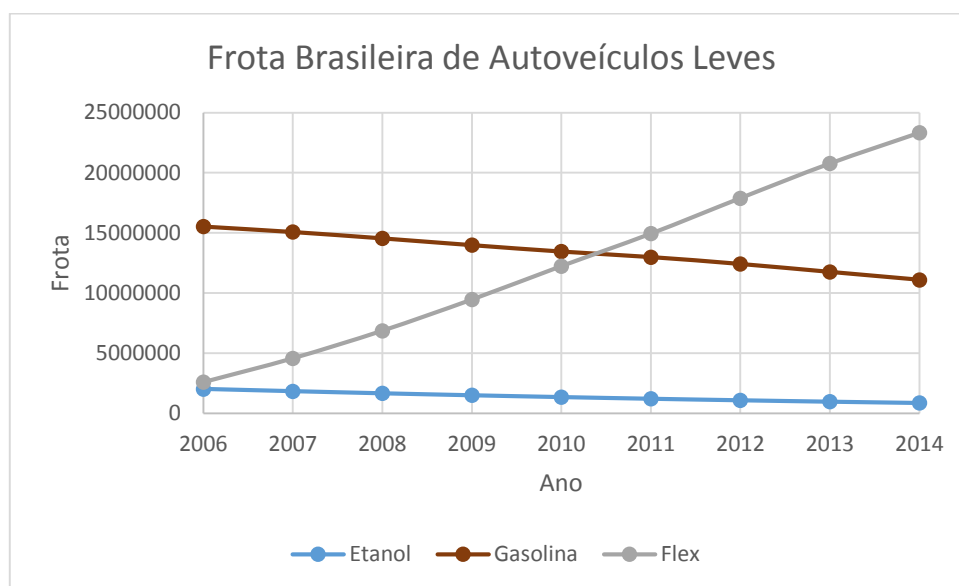
Figura 1 - Evolução da produção de Etanol e Cana de Açúcar



Fonte de dados: ÚNICA (2015)

Além disso, o mercado automobilístico brasileiro também se adaptou às mudanças promovidas, e em 2003 teve a estreia da primeira frota de veículos do tipo *flex*, que utilizam etanol e gasolina como combustível. A partir deste ano, o mercado de automóveis movidos somente a gasolina passou a diminuir, ao passo que os do tipo *flex* foi crescendo e se popularizando entre o mercado brasileiro e, concomitante a estes, o consumo de etanol. A Figura 2 representa a frota de veículos leves no Brasil, onde se nota a evolução dos combustíveis usados nos automóveis.

Figura 2 - Evolução Frota Brasileira Veículos Flex



Fonte de dados: ÚNICA (2015)

Perante o visível sucesso da implantação do etanol no mercado brasileiro, o setor de bioetanol é considerado um dos setores mais atrativos da economia brasileira, mesmo após a crise de 2008 (Alexandros Gasparatos; Per Stromberg, 2012)). Segundo o IBGE, a plantação de cana de açúcar está em cerca de 10.8 milhões de hectares em 2015, e espera-se que a expansão alcance uma nova área de 14 milhões de hectares em 2020 (Sanchs, 2007 apud Alexandros Gasparatos; Per Stromberg, 2012).

2.2. Cana de Açúcar: projeções e impactos

Historicamente, quando a cana ainda era visada para produção e exportação mundial de açúcar, a região de cultivo se estabeleceu no centro-sul brasileiro, estando São Paulo em destaque. Atualmente, o centro-sul é responsável por 90% da produção de cana (UNICA), tendo ainda margem para crescimento. Dentre as áreas visadas, destaca-se o cerrado brasileiro, caracterizado pela produção de grãos em geral (soda, feijão e café), por criação de gado e agora por cana de açúcar (Ronaldo Milani Zanzarini; Rosselvelt José Santos, 2008). No cerrado de Minas Gerais, a produção nacional da cana é a que mais tem ascendido (Ronaldo Milani Zanzarini; Rosselvelt José Santos,

2008). Dentro do contexto da expansão da fronteira agrícola, encontra-se a bacia hidrográfica do Araguari (MG), vide o mapa da Figura 3 cuja região tem prevista implantação de usinas sucroalcooleiras para abastecimento do triângulo mineiro (Ronaldo Milani Zanzarini; Rosselvelt José Santos, 2008).

Figura 3 - Localização da Bacia do Araguari



Adaptado de Guilherme Fernandes Marques et al. (2011)

Embora o desenvolvimento do setor sucroenergético represente uma vantagem econômica e de estabilidade energética para o país, ele também traz impactos sociais e ambientais nas áreas afetadas, especialmente quando não existe planejamento e manejo das pessoas, sociedades e recursos naturais envolvidos.

A ampliação desacompanhada da plantação de cana pode gerar diversos conflitos sociais, mesmo tendo apoio e incentivo por parte do governo. Por se tratar no geral de áreas latifundiárias, as plantações de cana tendem a necessitar se sobreporem aos cultivos de outras culturas, o que pode culminar na redução da diversidade e quantidade de produtos. Além disso, o fato de o plantio da cana ser economicamente rentável, faz com que os pequenos produtores se sintam atraídos a optar por substituir sua produção atual, principalmente hortifrúti e pecuária na bacia do Araguari, reforçando o potencial desequilíbrio. Com o rearranjo econômico destes produtos, os preços sofrem oscilações (Ronaldo Milani Zanzarini; Rosselvelt José Santos, 2008).

O mesmo tipo de processo de substituição de plantios por cana já foi observado no estado de São Paulo, quando entre 2001 e 2006 foi relatado em Franca, onde a expansão da cana dominou 69,43% da área de pastagem cultivada e 10.54 ha de terras que eram originalmente destinadas ao milho (Camargo et al, 2008 apud Ronaldo Milani Zanzarini; Rosselvelt José Santos, 2008).

Outro impacto social bastante evidenciado é o crescimento populacional desenfreado nas cidades com influência da cana, propiciando o surgimento de habitações irregulares, problemas de saneamento e eventual enfraquecimento da mão de obra local. Além da problemática das moradias, a população imigrante ainda sofre com más condições de trabalho que tradicionalmente se dão nos canaviais e provável substituição da mão de obra pela mecanização do sistema de produção (Alexandros Gasparatos; Per Stromberg, 2012), (Ronaldo Milani Zanzarini; Rosselvelt José Santos, 2008).

Os impactos ambientais começam na modificação da paisagem natural de vegetação, no caso Araguari, a substituição de cerrado pela cana. A implantação dos latifúndios e monoculturas promovem redução da biodiversidade vegetal e animal da paisagem, além de modificar as propriedades físico-químicas do solo e promover erosão e carreamento de nutrientes. Estes efeitos negativos devem ser sistematicamente monitorados e abrandados, tendo em vista a sustentabilidade do ecossistema. A utilização da vinhaça, subproduto do álcool, como fertilizante tem demonstrado o favorecimento da eutrofização de lagos ao redor das plantações, uma vez que a linhaça é rica em nitrogênio (Agência Fapesp, 2013).

O intenso processo de fertilização é apontado como uma das principais causas do declínio da qualidade da água dos rios do estado de São Paulo. No rio Ipojuca, foram constatados elevação de temperatura, turbidez, pH, coliformes de bactérias e decaimento de oxigênio dissolvido, efeitos atribuídos a atividade do plantio de cana na bacia em questão (Gunkel et al, 2007 apud Alexandros Gasparatos; Per Stromberg, 2012). Mesmo a substituição da gasolina pelo etanol ocasionando diminuição do lançamento de gases de efeito estufa, a qualidade do ar também é afetada pela produção da cana e do etanol. A queima

da cana é apontada como fonte expressiva de emissão material particulado aerodinâmico (MP_{2,5} e MP₁₀) (Martinelli et al 2002 apud Alexandros Gasparatos; Per Stromberg, 2012).

2.3. Uso da Água

A demanda por água também pode vir a ser fonte de conflitos sociais e ambientais. Tradicionalmente, a cana de açúcar possui necessidade ínfima de irrigação, uma vez que as condições climáticas do Brasil satisfazem as necessidades consuntivas da planta (Marcia Maria G. Alcoforado Moraes et al., 2006). No geral, o uso da água se dá dentro das destilarias e no processo industrial da cana, sendo esta reutilizada em diversas etapas (Marcia Maria G. Alcoforado Moraes et al., 2006). Existem, no entanto, diversos fatores que indicam tendência de irrigação da cana. Ballester (Agência Fapesp, 2013) assinala que muito se tem falado sobre a competição por terras entre geração agroenergética e alimentos, mas que pouco tem se falado sobre a água. Ele aponta que grande parte das áreas destinadas a agroenergia não possuem água suficiente para manter a alta produtividade desejada, gerando uma iminente necessidade de irrigação, o que certamente afetará o ciclo da água.

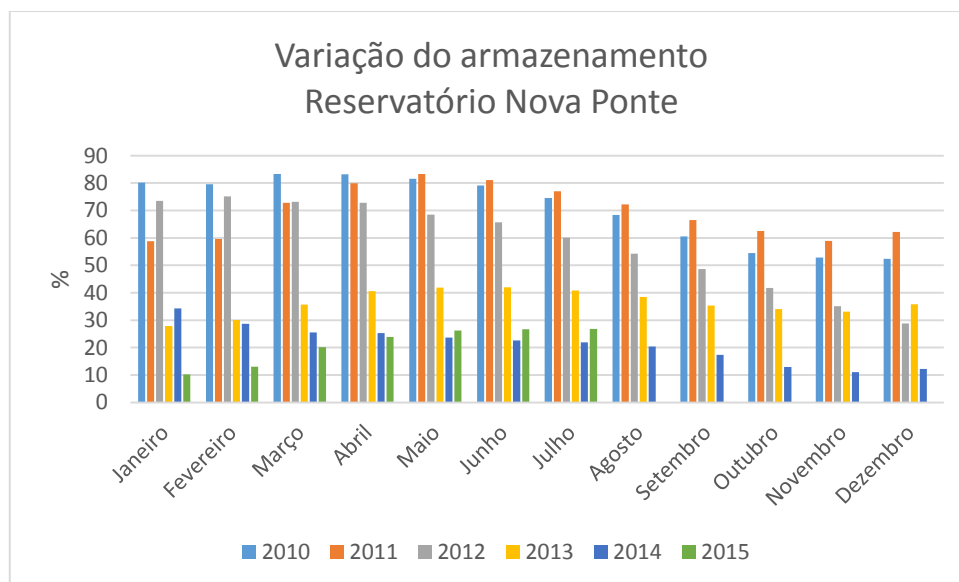
A expansão da cana para regiões com déficit hídrico, como no Nordeste e no cerrado, também acusa provável mudança no regime hídrico atual (Diego Paraizo, 2013). Além disso, a eficiência de produção para cana com sistema de irrigação é maior, o que deve levar os produtores atuais a recorrer para esta solução, visando atender a crescente demanda e aumentar seus lucros. Coligado ao aumento de demanda de água está o acréscimo populacional decorrente de imigrações para as regiões de expansão de cana.

Indo de encontro a tendência de aumento de demanda, está a disponibilidade de água, que vem diminuindo com o passar dos anos. O mau uso e gerenciamento dos recursos hídricos tem feito com que a quantidade de água de boa qualidade venha se tornando cada vez mais escassa. O Plano de Bacias Hidrográfica do Araguari marca em 2009, quando foi feito um estudo da

qualidade da água através do IQA (Índice de Qualidade da Água), o maior percentual de água com qualidade “boa” em 75% no segundo trimestre do ano. No entanto, este índice chegou apenas a 13% no quarto trimestre, sendo os 87% restantes em estado “médio” ou “ruim”. Apesar do índice alto de água com boa qualidade do segundo trimestre, considerando a melhor hipótese, ainda existe perda na quantidade efetiva de água disponível, uma vez que para a utilização de 100% dos recursos, haveria a necessidade da implantação de tratamentos intensivos prévios.

A quantidade de água armazenada nos reservatórios também vem evidenciando um período de estiagem, e está diminuindo com o passar dos anos, gerando insegurança tanto no abastecimento urbano, agrícola e industrial como ameaça energética. O principal reservatório da Bacia do Araguari é o da usina hidrelétrica de Nova Ponte, e este chegou ao nível alarmante de 10.23% de armazenamento do seu volume útil total em janeiro de 2015 (ONS). O comportamento do reservatório está retratado no gráfico da Figura 4 que segue, que reporta a porcentagem do volume útil disponível durante os anos de 2010 até julho de 2015.

Figura 4 - Variação no Armazenamento do Reservatório de Nova Ponte



Fonte de dados: NOS (2015)

A Figura 4 evidencia os efeitos do período de estiagem, que começou em 2012 e se estende até a presente data, gerando uma tendência ao esvaziamento

do reservatório de Nova Ponte. A diminuição da disponibilidade da água acarreta em severas perdas para as bacias, uma vez que a tentativa de repor o armazenamento de água significa liberar menos água a jusante do reservatório, causando escassez para os usuários que lá se localizam e menor geração de energia pela usina.

Quando somados o aumento da demanda e a diminuição da disponibilidade da água, temos um cenário de potencial conflitos de interesse nos múltiplos usos da água. Para evitar ou minimizar esta situação, é necessário que se faça planejamento e gestão dos recursos hídricos. Uma alternativa para manejo e auxílio na tomada de decisões por parte dos gestores é a utilização de modelos hidro econômicos. Este tipo de modelo tem se mostrado ferramenta poderosa na projeção da dinâmica de bacias hidrográficas, uma vez que considera a distribuição espacial dos recursos hídricos, as infraestruturas existentes, as políticas de uso e o valor econômico da água de maneira integrada (Julien J. Harou et al., 2009).

2.4. Modelos Hidro Econômicos

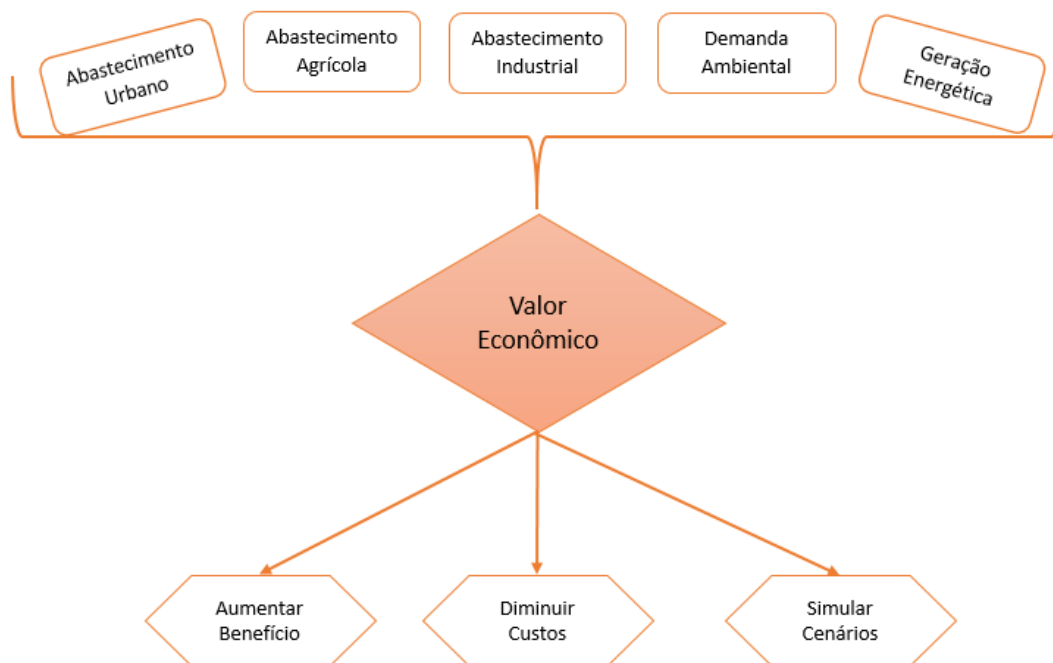
Muitos dos métodos atuais de planejamento e gestão dos recursos hídricos estão baseados em definições de demandas fixas, que não levam em consideração o preço da água e custos operacionais (Julien J. Harou et al., 2009). Este tipo de abordagem costuma abranger apenas a quantidade de água, tanto disponível quanto solicitada pelos usuários. Desta forma, para dois (ou mais) usuários abastecendo-se de água oriunda de um mesmo recurso, tem-se a impressão de que o consumo por cada usufrutuário representa uma potencial perda para o outro, como um “jogo de soma zero”, já que a água utilizada por um não estará mais disponível para o outro (Franklin M. Fisher, 2002). Esta visão estática do sistema de distribuição de água é extremamente limitada, uma vez que falha em comportar diversos aspectos econômicos, sociais, políticos, ambientais e de variação na disponibilidade de água, tornando o modelo inflexível às constantes mudanças no sistema e incapaz de adaptar-se a elas.

Com o crescente conflito entre os múltiplos usos da água, gerados por fatores como estiagem, poluição, crescimento demográfico, crescimento industrial, expansão agrícola e geração energética, é de suma importância que tais aspectos sejam contemplados na elaboração de políticas públicas de uso de água e no método analítico utilizado para a gestão das bacias hidrográficas. Integrar componentes de natureza tão distintas, como os anteriormente mencionados, é o principal desafio para o manejo descentralizado das bacias e para o comum entendimento dos sistemas hídricos e seu papel na sociedade (I Heinz et al., 2007). A gestão de recursos hídricos exige uma visão holística e completa do sistema, que contemple desde o abastecimento até a demanda de água, incluindo todos os aspectos intermediários a estes (Ximing Cai et al., 2003). A utilização da demanda-fixa vai de encontro com esta premissa, uma vez que ela representa uma visão regional e limitada do processo, e não a visão sistêmica desejada.

A atribuição de valor econômico da água e suas variações auxiliam na transição de visão de demandas fixas para demandas dinâmicas. O requerimento pré-determinado de água por parte dos usuários está embasado em fatores como direito sob a água, prioridades de uso, projeção de crescimento populacional, uso urbano e agrícola. Os modelos hidro econômicos propõe a substituição da demanda fixa por uma função endógena, que varia para cada usuário de acordo com o preço da água (Ximing Cai et al., 2003). Com enfoque econômico, o valor da água padroniza as relações de uso baseado no valor da mesma.

Dependo das quantidades disponíveis e o uso destinado, o valor da água muda, e tal monetarização transforma um problema complexo, de múltiplos objetivos de gerenciamento em um problema simples, com objetivo único (Julien J. Harou et al., 2009). Este objetivo pode variar de acordo com o resultado que se busca, podendo ser de aumento de benefício, diminuição de custos ou a projeção de cenários. O diagrama da Figura 5 sistematiza esta padronização, em que as diversas fontes de conflitos são unificadas pelo valor econômico da água, a partir do qual os objetivos podem ser definidos e explorados.

Figura 5 - Atribuição de Valor Econômico aos múltiplos usos da água



Elaboração própria

Nos modelos hidro econômicos, a alocação de água é feita de acordo com o objetivo ou meta previamente determinada (Hal E. Cardwell et al., 2006). Em bacias nas quais a demanda de água supera a disponibilidade da mesma, temos um cenário de escassez. A partir deste momento, a distribuição da água deve ser feita de maneira eficiente, isto é, otimizando o benefício para a sociedade (Julien J. Harou et al., 2009). Com base neste objetivo, os modelos hidro econômicos servem como instrumento para orientação de distribuição eficiente, que permite a investigação de diferentes soluções e transparência na alocação da água (Julien J. Harou et al., 2009).

Existem diversos designs para a implantação de modelos hidro econômicos. Modelos de simulação objetivam responder a questões de cenários recorrentes dada certas condições iniciais. São bem aplicados, pois conseguem reproduzir a complexidade dos sistemas e emprego de regras, porém fornecem resposta apenas para os cenários requeridos, sendo necessário então fazer análises de tentativa e erro para encontrar a melhor solução dentro dos aspectos desejados. Já os modelos de otimização são programados para fornecerem a solução ótima, de acordo com as condições iniciais e um objetivo desejado pré-estabelecido. São muito utilizados quando a questão avaliada é a melhoria do

sistema estudado. Nos modelos hidro econômicos de otimização, porém, existe uma dificuldade de avaliar todos os parâmetros do sistema para que se obtenha resposta satisfatória, o que muitas vezes nos obriga a inferir conhecimento perfeito do sistema – o que é uma visão idealizada e irreal (Julien J. Harou et al., 2009). Para fins deste estudo, foram utilizados modelos de otimização.

2.5 Emprego de modelos Hidro Econômicos

A ferramenta WAS (Water Allocation System) é apresentada por Franklin M. Fisher, 2002, e expõe exemplo das vantagens associadas a atribuição do valor econômico à água. O modelo visa a reprodução de um país genérico, onde diversos aspectos de uso de água são representados de maneira flexível e adaptável de acordo com o interesse do usuário. As demandas domésticas, industriais e de agricultura são definidas por uma função, e o uso ambiental é contabilizado através de restrição do uso da água a quantidades renováveis para cada fonte, com atribuição de penalidades para o despejo de efluentes e a possibilidade de implantação de eventuais novas estruturas, como instalações de estações de tratamento ou de dessalinização de água do mar. O modelo permite também a aplicação de diversas políticas e regras de distribuição, onde se pode priorizar o uso da água para o abastecimento doméstico, implementar restrições de uso protegendo áreas ambientalmente ameaçadas ou atribuindo custos diferentes para determinados usos. De acordo com as condições de contorno, o modelo retorna o “*shadow value*” (valor marginal) da água para cada distrito, que representa o quanto este poderia acrescentar no seu benefício total fosse à sua alocação adicionada um metro cúbico de água – conceito no qual o presente trabalho se baseia em sua implementação. Com isso, o modelo fornece informação valiosa no que diz respeito a custos e benefícios, assim como analisa a viabilidade e retorno de investimentos de infraestruturas a serem implantadas. O autor enfatiza que a atribuição de valor para água não se dá por esta ser um bem imprescindível para a sobrevivência humana, e sim por sua escassez, uma vez que não havendo escassez de água, ela não estará dotada de valor econômico.

No contexto brasileiro, podemos citar o modelo de alocação ótima de água de Marcia Maria G. Alcoforado Moraes et al. (2006), que utiliza o software General Algebraic Modeling System, para programação de problemas não lineares, que também é utilizado no trabalho presente. O modelo de Marcia Maria G. Alcoforado Moraes et al. (2006) integra aspectos importantes da bacia do rio Pirapama, em Pernambuco, especialmente no que diz respeito a quantidade de água disponível e a qualidade da mesma. Para tanto, dividiu-se o problema em dois sub-modelos, que primeiramente analisava as condições de disponibilidade hídrica seguido por regras de concordância à qualidade da água. No segundo sub-modelo, utilizou-se artifícios de restrição que garantiam a manutenção da qualidade da água nos níveis esperados, assim como limitavam o despejo de efluentes por parte das indústrias e atentava aos níveis de trofia dos reservatórios presentes na área de estudo. Como resultado, teve-se a diminuição no benefício geral por conta do déficit de disponibilidade da água, que é agravado nos setores de fertirrigação e industrial com as considerações de qualidade da água. Neste modelo, a demanda ambiental foi considerada como outro uso da água, o qual restringe a retirada e despejo de efluentes em prol da capacidade de autodepuração dos poluentes no rio. Este resultado é de extrema importância para a orientação dos gestores quanto as políticas de proteção ambiental a serem adotadas no local.

Outro exemplo da aplicação de modelos hidro econômicos no país é o do estudo realizado por M. de O. Torres et al. (2014) na bacia do rio Buriti Vermelho, em Brasília. M. de O. Torres et al. (2014) desenvolveu um modelo cujo objetivo era levantar as potenciais variações de renda da atividade de agricultura a curto prazo causadas pelas mudanças nos índices climáticos de precipitação e escassez de água. Mais uma vez, foram empregados dois modelos computacionais interligados, o primeiro se tratando de modelo hidrológico, que reproduz as condições climáticas da região através de dados reais de calibração e o segundo sendo o modelo econômico. Por sua vez, este é baseado no método de Programação Matemática Positiva (PMP), método utilizado também no presente trabalho. Os autores chegaram ao resultado de queda em 1.2% da renda no caso de diminuição de 5% nos índices climáticos de precipitação e

disponibilidade de água, e que a renda estaria comprometida em 32% caso os índices fossem reduzidos 90%.

3. Metodologia

Com o intuito de avaliar a variação da demanda e distribuição de água perante os usuários agrícolas em cenários de expansão da plantação de cana de açúcar e períodos de escassez, fez-se uso de dois modelos hidro econômicos de otimização. O primeiro leva o nome de Modelo Agro Econômico (ME), cujo intuito é determinar as funções econômicas (f_e) de cada usuário. Uma vez obtida a função econômica, é possível inferir a função custo da escassez (c_e), a qual servirá de base para o segundo modelo: Modelo de Alocação (MA). Este, por sua vez, retorna o sistema de melhor alocação de água de acordo com a função objetivo estabelecida.

3.1. Contextualização

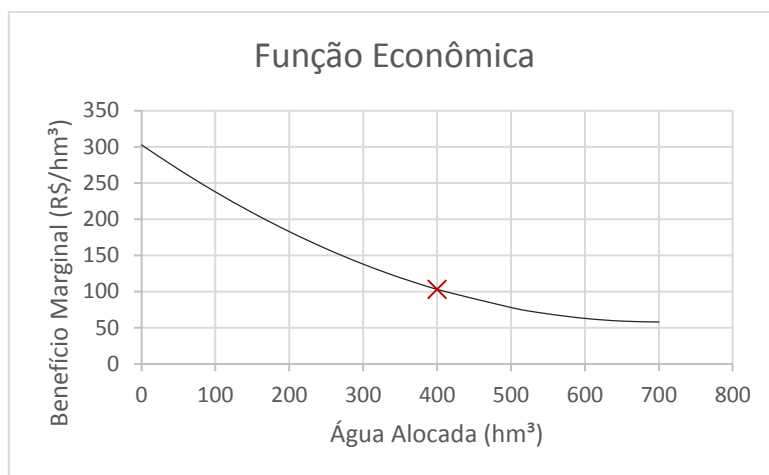
Para que se entenda claramente a metodologia e o embasamento teórico-matemático do trabalho, é necessário que se faça uma contextualização de alguns termos e teorias previamente à descrição dos modelos utilizados.

3.1.1 Funções Econômica (f_e) e Custo da Escassez (c_e)

A função econômica (f_e) objetiva simular a análise real da demanda dos usuários agrícolas, representando a disposição destes em pagar pela água, baseando sua decisão nas perdas e ganhos que certa quantidade de água gera. Esta função é dada pelo valor marginal da água, que traduz o benefício que o usuário terá ao alocar a próxima unidade de água disponível. O benefício marginal - também chamado de custo marginal ou *shadow value* - está relacionado com a disponibilidade espacial e temporal da água, implicando que conforme o recurso esteja parco, seu valor será elevado, afetando a produtividade regional (Guilherme F. Marques et al., 2006). Sendo assim, o usuário irá optar por consumir água até o ponto em que o custo da próxima unidade se iguale ao benefício que a mesma gera. Na Figura 6 que segue, temos uma função econômica genérica, com o ponto (400;100) destacado, e o limite de existência de $x \in [0,700]$, correspondente à demanda total do usuário em

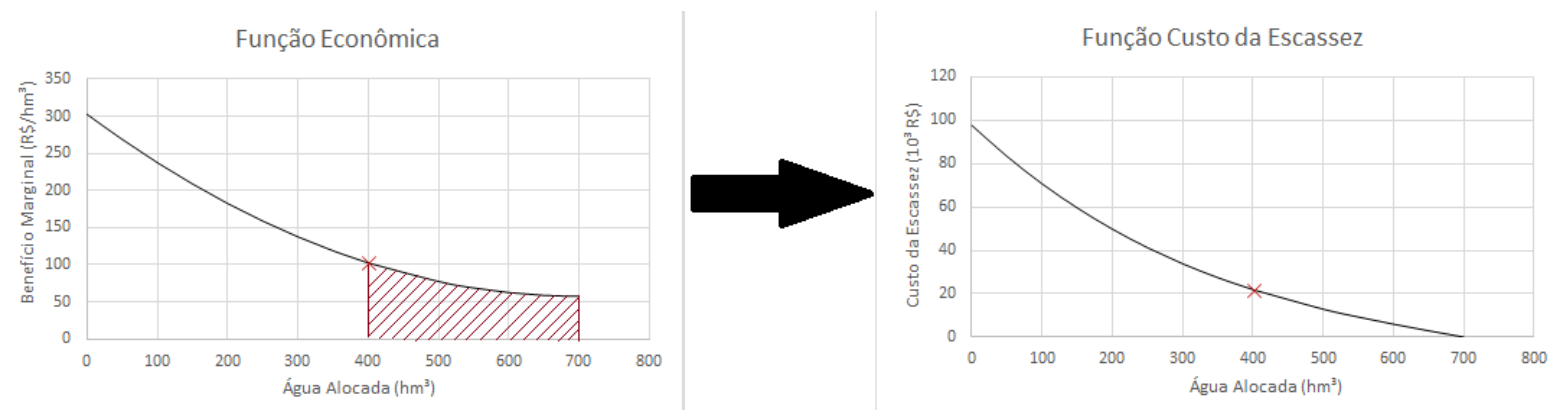
questão. Essencialmente, o gráfico nos informa que, o usuário em questão já está com 400hm^3 de água alocada, e caso ele passe a receber 401hm^3 , seu benefício aumentará em R\$100.

Figura 6 - Função Econômica Exemplo



Marion W. Jenkins et al. (2003) define a escassez como a diferença entre a quantidade de água que foi de fato alocada e a quantidade que seria alocada caso não houvesse restrições de disponibilidade (demanda total do usuário). O custo da escassez é determinado como a integral da função de demanda econômica nos limites aa (água alocada) e demanda total. No exemplo da Figura 6, os limites de integração seriam 700 e 400, e o resultado seria o custo da escassez do usuário. Na prática, o custo da escassez da água indica o valor econômico da produção que se deixa ganhar por não ter água suficiente (valor alocado inferior a demanda total). O valor máximo do custo da escassez é obtido quando os limites de integração forem de zero até demanda total – correspondente à área total da fe dentro de seus limites de existência.

Figura 7 - Obtenção da Função Custo da Escassez a partir da Função Econômica



A Figura 7 ilustra o custo da escassez representado em ambos os gráficos da *fe* e da *ce*. Na parte esquerda, a área hachurada representa o valor do custo da escassez, isto é, a integral entre os limites 400 e 700. Na parte direita, podemos ver que este valor é de aproximadamente R\$20000, e que o custo da escassez vai diminuindo conforme a água alocada se aproxima da demanda total, onde atinge o valor zero.

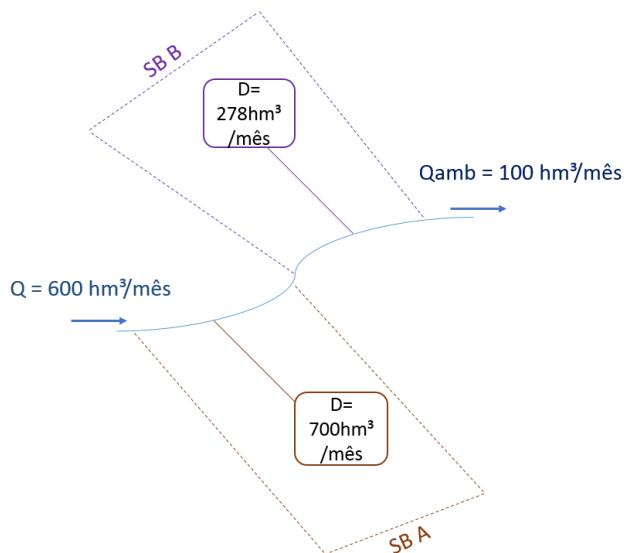
3.1.2. Alocação Equimarginal

Em períodos de estiagem, o procedimento de alocação de água é alvo de críticas e polêmicas por parte da população, e sempre uma decisão difícil para os gestores. Existem correntes que acreditam que a maneira correta de alocação é a igualitária, em que todos os usuários recebem a mesma quantidade de água, independentemente de sua demanda individual. Há também os que acreditam que a redução deve ser proporcionalmente igual, de acordo com a demanda de cada usuário. Já a abordagem econômica, na qual baseia-se o presente trabalho, acredita que a melhor alocação de água é aquela onde o valor da *fe* dos usuários é o mesmo, e culminará no menor custo total da escassez para a bacia hidrográfica estudada. Esta última recebe o nome de alocação equimarginal.

Para o melhor entendimento da diferença entre os conceitos e a justificativa da escolha de alocação equimarginal, utilizaremos de um exemplo

extremamente simplificado de uma bacia hidrográfica com dois usuários. A Figura 8 ilustra a bacia exemplo, onde existe apenas dois usuários: Da Sub Bacia A (SB A), cuja demanda é de $700\text{hm}^3/\text{mês}$, e a Sub Bacia B (SB B), com demanda de $278\text{hm}^3/\text{mês}$.

Figura 8 - Esquema Simplificado de Bacia Hidrográfica Exemplo com duas Sub-Bacias



A Figura 8 ainda apresenta os valores da vazão do rio (Q), igual a $600\text{hm}^3/\text{mês}$ e a vazão ambiental (Q_{amb}), de $100\text{hm}^3/\text{mês}$, resultando em de $500\text{hm}^3/\text{mês}$ disponíveis. Como o somatório das demandas dos usuários ($978\text{hm}^3/\text{mês}$) é maior que a disponibilidade total de água ($500\text{hm}^3/\text{mês}$), a bacia está em período de escassez.

Baseado nas funções de custo da escassez de cada SB, simulou-se os três tipos de distribuições anteriormente mencionadas: igualitária, redução proporcional e equimarginal para o período de um mês. Para cada resultado, foram analisados o custo individual da escassez dos usuários e os valores marginais da água dos mesmos, assim como o custo total da Bacia Hidrográfica Exemplo. Os resultados podem ser observados na Tabela 1 que segue.

Tabela 1 - Resultado das simulações de distribuições da Bacia Hidrográfica Exemplo

Variáveis de Decisão	SB A	SB B	Custo total Escassez (R\$)	Distribuição
Água Alocada (hm ³)	250	250		
Custo da Escassez (R\$)	41100	1800	42900	Igualitária
Benefício Marginal da Água (R\$/hm ³)	160	70		
Água Alocada (hm ³)	357.9	142.1		
Custo da Escassez (R\$)	26400	13700	40100	Redução Proporcional (51%)
Benefício Marginal da Água (R\$/hm ³)	120	150		
Água Alocada (hm ³)	328.2	171.8		
Custo da Escassez (R\$)	30000	9600	39600	Equimarginal
Benefício Marginal da Água (R\$/hm ³)	130	130		

Os resultados da Tabela 1 indicam que o menor custo total foi, efetivamente, quando o critério de distribuição utilizado foi o Equimarginal. Quando comparados os resultados da distribuição com redução proporcional de 51% e a distribuição equimarginal, verifica-se que a perda do usuário B diminui em R\$4100 (13700 – 9600) ao passo que o usuário A tem seu custo da escassez aumentado em R\$3600 (26400 – 30000), resultando em uma diferença (ganho líquido) de R\$500. A possibilidade desse ganho líquido indica que estratégias de alocação com eficiência econômica podem produzir resultados que não necessariamente são de soma zero, servindo de ponto de partida para negociações de distribuição dos ganhos.

Desta forma, entende-se que esta é a distribuição que gera um maior benefício para a Bacia Hidrográfica como um todo, e por isso, esta foi a distribuição escolhida na aplicação do modelo hidro econômico utilizado na realização deste trabalho.

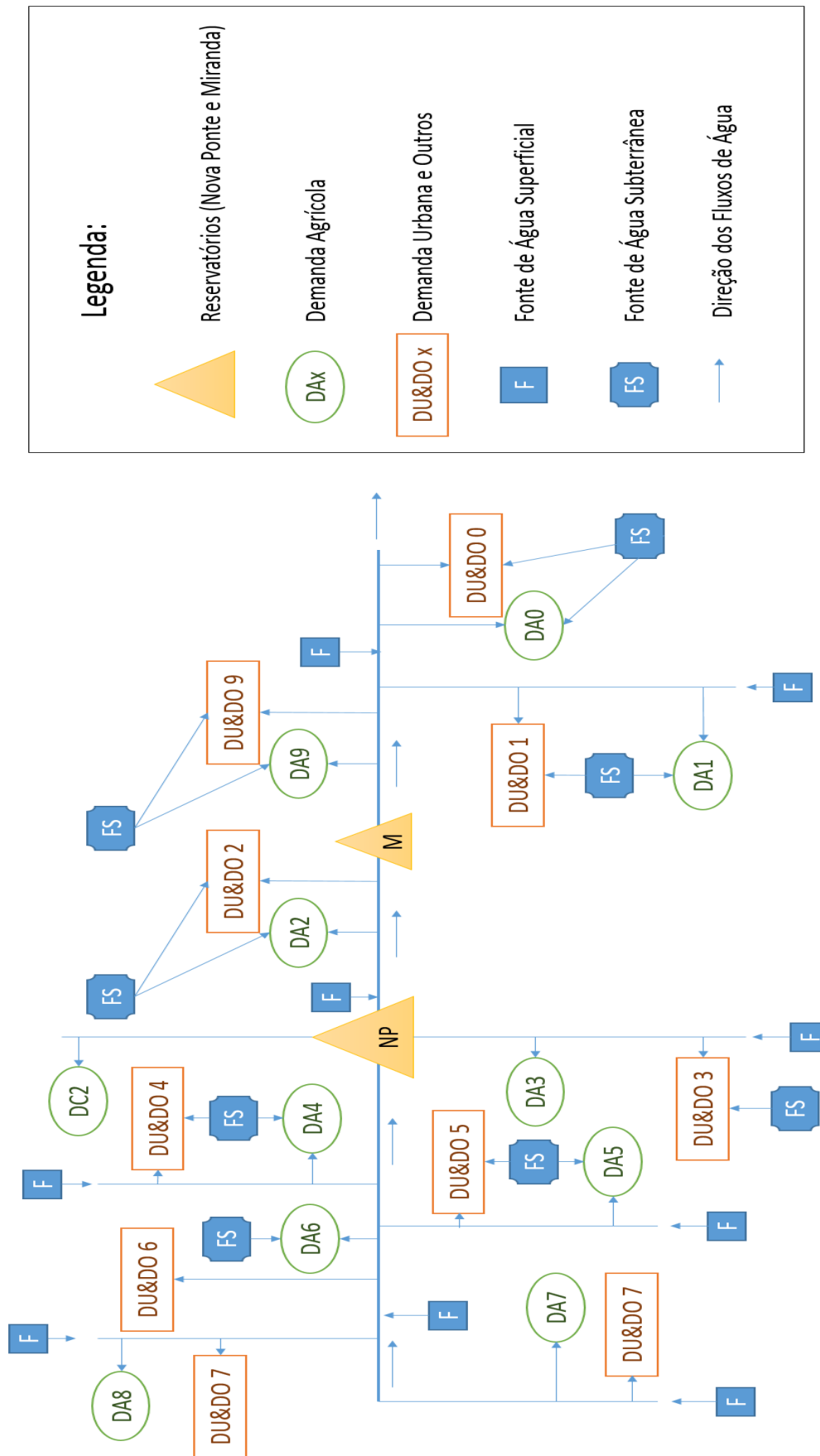
3.2. Bacia Hidrográfica do Araguari

A bacia do Araguari, como apresentado anteriormente, localiza-se no triângulo mineiro do estado de Minas Gerais, abrangendo uma área de 22086km²

(Guilherme Fernandes Marques et al., 2011) sendo sua vegetação predominante de cerrado com resquícios de mata atlântica (Prefeitura de Araguari). A bacia do Araguari está inserida no contexto de expansão agrícola, especialmente no que diz respeito da substituição do cerrado pela cana de açúcar, tanto para produção sucroenergética como de açúcar. Nela, ainda estão presentes duas Usinas Hidrelétricas com reservatórios: Miranda e Nova Ponte. O reservatório de Miranda possui área alagada de 50.61km³, volume total de 1.12 bilhões m³ e sua usina potência instalada de 408MW. Já a usina de Nova Ponte é expressivamente maior, com área alagada igual a 442km², volume total de 12.8 bilhões de m³ e potência instalada de 510MW (CEMIG). A presença das usinas em uma região destacada pela produção agrícola caracteriza o tradicional impasse entre os usos múltiplos da água, onde existe a competição entre geração de energia e abastecimento agrícola.

Na modelagem da bacia do Araguari, separou-se os diversos usos da água em apenas três tipos: Demanda Urbana (DU), Demanda Agrícola (DA) e Demanda Outros (DO). A bacia foi dividida em 11 sub bacias, numeradas de 0 a 9 e uma especial, que contempla apenas plantação de cana de açúcar e leva o nome de DC2. Também foram inseridas as usinas hidrelétricas NP e Miranda, com suas respectivas capacidades de armazenamento, e pontos de fontes de água de captação superficial (F) e subterrânea (FS). Em cada uso de água, existe também uma vazão de retorno ao sistema, de 70% do valor original que retorna pelo mesmo link de retirada. O esquema de links, que representa o diagrama unifilar modelado da bacia está ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Diagrama Unifilar Modelada da Bacia do Araguari



Conforme o esquema apresentado na Figura 9, foram estabelecidas as demandas urbanas e outras da maneira tradicional, sendo, desta forma, um número fixo. Já para as demandas agrícolas, foi implementada a abordagem econômica, representada por uma função. Os dados de fontes superficiais de água foram calculados a partir de diversas fontes, e alguns ajustes foram feitos para que se adaptassem ao esquema modelado. Entretanto, os dados ainda precisam ser mais refinados para que se adequem a realidade e, portanto, os resultados obtidos neste trabalho são fundamentalmente teóricos. Além disso, por diferença na ordem dos dados utilizados, o reservatório de NP utilizado no modelo possui volume total de 1038 hm³, e por isso foi chamado de NP. A hidroelétrica de Miranda, no modelo, foi dimensionada com capacidade total de 145.6 hm³.

Os valores das demandas DU&DO (urbanas e outros) foram inferidas a partir do CENSO 2006, mas para a ciência das funções econômicas das demandas agrícolas, fez-se uso do Modelo Agro Econômico.

3.3. Modelo Agro Econômico (ME)

O Modelo Agro Econômico (ME) foi desenvolvido por E. R. Howitt et al (2001) e E.R. Howitt et al (2003), e se baseia no princípio de Positive Mathematical Programming (PMP), e utiliza o software GAMS (General Algebraic Modeling System). O método PMP, descrito por Richard E. Howitt (1995), tem como objetivo calibrar modelos de produção agrícola a partir de parâmetros não lineares de rendimento e funções de custo. A ideia é que os dados de calibração sejam obtidos empiricamente por observações e/ou análises locais, e desta forma, as aproximações feitas pelo modelo estejam condizentes com a realidade. O método permite que a calibração seja feita com o mínimo de restrições possíveis, o que confere ao ME a capacidade de se adaptar a diversas modificações de cenários – característica almejada para que os modelos se aproximem da dinâmica real.

3.3.1. Variáveis de Entrada e Função Objetivo

Para calibrar o ME de acordo com as condições agrícolas da bacia do Araguari, é preciso fornecer dados de entrada. Para todas as Sub Bacias (SB) e para todas as culturas (arroz, batata, cana, milho, etc), deve-se informar os índices apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Descrição das Variáveis de entrada do ME

Variáveis de Entrada	Descrição
Preço	Preço de venda por cultura produzida, calculada em R\$/ton
Produtividade	O quanto se produz de cada cultura por área plantada, em ton/ha.
Área	Área plantada de cada cultura por SB, em ha.
Demanda de Água	Demanda anual de água por cultura, em m ³
Trabalho	Horas anuais de trabalho por sub bacia por cultura, em horas
Sazonalidade	Distribuição da demanda anual por mês, de acordo com a estação própria para cada cultivo.

Uma vez calibrado, a função objetivo do ME (Equação 1) automaticamente se adapta as condições iniciais, e tem como meta maximizar o retorno econômico dos produtores agrícolas de cada sub bacia descrita na Figura 9. Durante a otimização, o modelo é sujeito a restrições de produção, estratégias políticas e recursos disponíveis, calculando desta forma o *shadow value* para 13 valores incrementais de água a cada mês, durante um ano.

Equação 1 - Função Objetivo ME

$$y = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} - [x_1 \ x_2 \ x_3] \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \gamma_{23} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \gamma_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

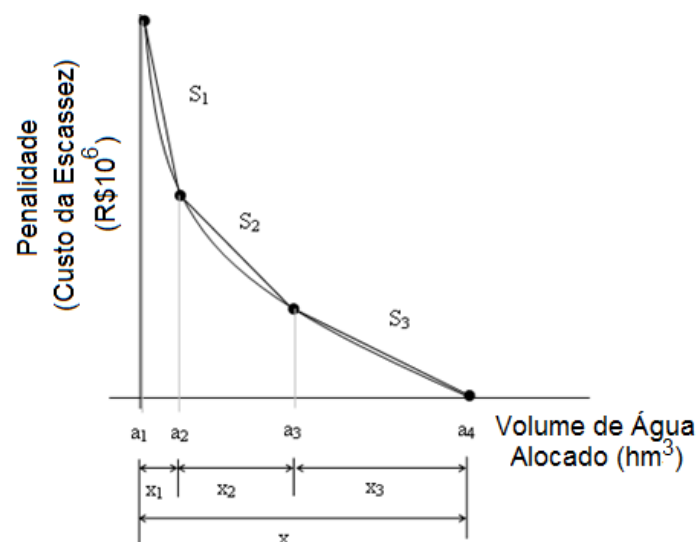
Onde:

- y : Resultado final da cultura em questão, por região
- x : Quantidade da variável de entrada avaliada (vide Tabela 2)
- α : Coeficiente de Leontieff
- Matriz Y : Engloba a diminuição gradativa da produção marginal e interações das variáveis de entrada.

3.3.2. Variáveis de Retorno: função econômica e função custo da escassez

Após o processamento do ME, obtemos os resultados de *shadow value* vinculado à água alocada por sub bacia por mês, durante o período de 12 meses. No entanto, este resultado nos informa os pontos da função econômica, mas não sua equação propriamente dita. Como nosso objetivo é transformar o benefício marginal da água em custo da escassez, usa-se o método de integração trapezoidal para obtermos os pontos da função custo da escassez, que representa a função do custo da escassez por segmentos de retas, como a Figura 10 mostra.

Figura 10 - Função Custo da Escassez em Segmentos de Retas, adaptado de Guilherme Fernandes Marques et al. (2011)



Os elementos da Figura 10, que resultam no custo da escassez, são representados por frações da demanda (x_1 , x_2 , x_3), cujo somatório resulta na

demanda total de água (x) e a declividade de cada segmento de reta (S_1, S_2, S_3), cujo produto com a demanda alocada de mesmo índice, apresenta a redução na penalidade da bacia – ou seja, a redução no custo da escassez. Estes são os elementos utilizados como dados de entrada para o Modelo de Alocação (MA).

3.4. Modelo de Alocação (MA)

O Modelo de Alocação foi desenvolvido por Guilherme F. Marques et al., (2006) no software GAMS, fazendo uso do princípio de alocação equimarginal, onde a água destinada para o uso agrícola é distribuída de forma que a penalidade na bacia do Araguari (custo total da escassez) seja a menor possível. O modelo utiliza a rede interligada da Figura 9, onde as conexões representam estruturas de abastecimento ou canais naturais.

3.4.1. Variáveis de Entrada e Função Objetivo

O MA analisa a partir das variáveis de entrada o volume de água disponível versus a demanda total da bacia realizando um balanço de massa em todas as conexões representadas na Figura 9 e tendo como variável de decisão o volume de água alocada a cada passo de tempo. As variáveis de entrada que participam do balanço de massa estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 - Descrição das Variáveis de Entrada do MA

Variáveis de Entrada	Descrição
Coeficiente de Evaporação	Lâmina de evaporação nos reservatórios de Miranda e Nova Ponte, em mm/mês.
Capacidade dos Reservatórios	Volume máximo de armazenamento dos reservatórios de Miranda e Nova Ponte, em hm ³
Precipitação	Precipitação mensal por Sub Bacia, em mm
Influxos	Influxos de água por fonte, em hm ³ /mês
Influxo Subterrâneo	Influxos de água subterrânea, em hm ³ /mês
Demandas Urbanas e Outros	Demandas por Sub Bacia dos tipos Urbana e Outros, em hm ³ /mês.
Funções Custo da Escassez	Funções Custo da Escassez dos usuários agrícolas por Sub Bacia, inferidas a partir dos resultados fornecidos pelo ME.

No modelo, o custo da escassez é calculado a partir de penalidades, que ocorrem quando a quantidade total de água demandada não é atingida. O somatório do conjunto de penalidades atribuídas para cada Sub Bacia, a cada passo de tempo, forma a função objetivo do modelo, representada pela Equação 2.

Equação 2 - Função Objetivo MA

$$CET = \sum_t \left(\sum_{PT} (C_{MAX_{PT}} - \sum_{CST} X_{t,PT,CST} * C_{M_{CST,PT}}) + \sum CEX * EX_{t,PT} \right)$$

Onde:

- CET: Custo Escassez Total, para o período de tempo simulado (t);
- CMAX: Custo máximo da Escassez a cada passo de tempo (PT);
- X: Fração da demanda total alocada em cada Sub Bacia, por passo de tempo (PT) (vide Figura 10);
- CM: Declividade do segmento de reta por Sub Bacia (CST), por passo de tempo (PT);
- CEX: Pequena penalidade (custo) atribuída para quando houver extravasamento de água pelo vertedouro dos reservatórios de Miranda e NP;
- EX: Vazão extravasada pelos reservatórios Miranda e NP no passo de tempo (PT);

Com o intuito de evitar a adição de restrições no modelo, que o tornaria menos flexível a eventuais mudanças desejadas, propôs-se a atribuição de penalidades para que o mesmo dê preferência para o armazenamento da água nos reservatórios, e por isso a Equação 2 conta com o último elemento de penalidade. Pelo mesmo motivo, foram atribuídas penalidades no caso da não distribuição de água para as demandas Urbanas e Outras, para que o modelo englobe a Política Nacional dos Recursos Hídricos que preconiza o abastecimento humano como uso prioritário da água.

O MA também conta com restrições como o balanço de massa nos pontos de intersecção, quantidades mínimas atribuídas às linhas de fluxos representando demandas ambientais, as capacidades dos reservatórios e os valores das condições iniciais do sistema.

3.4.2. Variáveis de Retorno: Alocação Equimarginal da Água

Como resposta das simulações do MA, encontramos a distribuição ótima de água do ponto de vista econômico. O modelo fornece informações sobre a demanda mensal recebida de cada Sub Bacia, a demanda total da mesma e o custo da escassez, quando cabível, por Sub Bacia e geral da Bacia do Araguari. O tempo simulado para este estudo foi de 60 meses (5 anos), e foi presumido que as demandas mensais não se alteravam de um ano para o outro durante este período.

3.5. Cenários Simulados

Para a Bacia do Araguari, foram simulados três cenários, que foram gradativamente agravando o estresse hídrico da região. Também foi estabelecido que as demandas agrícolas deveriam receber, em períodos de escassez, no mínimo 40% de sua demanda total ao invés de demanda zero. Esta determinação se dá pelo fato que, em realidade, os prejuízos na ocorrência seca total (não recebimento de água) vão além do valor econômico da água, e estariam discrepantes caso fossem incorporados. Todos os cenários foram simulados para o período de 60 meses (5 anos).

3.5.1. Cenário 1: Escassez

O cenário 1 simula uma redução em 10% na série histórica de disponibilidade de água presente na bacia do Araguari. Com essa redução,

pretende-se avaliar o estresse hídrico em períodos de estiagem e avaliar qual vai ser a distribuição da água perante os usuários agrícolas.

3.5.2. Cenário 2: Escassez e Expansão Cana de Açúcar

O cenário 2 pretende averiguar o acréscimo na demanda de água perante os usuários agrícolas no caso da expansão do cultivo da cana de açúcar na bacia do Araguari, seguido da distribuição da nova demanda com a mesma disponibilidade de água do cenário 1.

Estudos da expansão da cana de açúcar destinada a produção de etanol elaborado por Marques, (não publicado) indicam um crescimento de 23776 ha na bacia do Araguari. O mesmo estudo considera que esta área deverá ser acrescida proporcionalmente à área já existente, assim como esta deverá contar com um sistema de irrigação por gotejamento, com índice de 90% de eficiência. As áreas plantadas nos cenários 1 e 2, a área expandida e o incremento na demanda total do cenário 2 podem ser verificados na Tabela 4.

Tabela 4 – Cenário 2 Expansão da Cana de Açúcar: Incrementos de Área e Demanda Agrícola por Sub Bacia

Sub Bacia	Área Cenário 1 (ha)	Acréscimo de Área Plantada (ha)	Área Cenário 2 (ha)	Incremento Demanda de Água (hm ³)
SB0	61460	676.2	62136.2	5.1
SB1	205260	2258.5	207518.5	17.2
SB2	270990	2981.7	273971.7	22.6
SB3	415510	4571.8	420081.8	34.8
SB4	329680	3627.4	333307.4	27.7
SB5	133040	1463.8	134503.8	11.2
SB6	296910	3266.9	300176.9	24.8
SB7	139990	1540.3	141530.3	11.8
SB8	142920	1572.5	144492.5	12.0
SB9	119940	1319.7	121259.7	10.1
DC2	45180	497.1	45677.1	3.8
Soma	2160880	23776	2184656	181.2

3.5.3. Cenário 3: Uso da Água – Competição com Demanda Energética

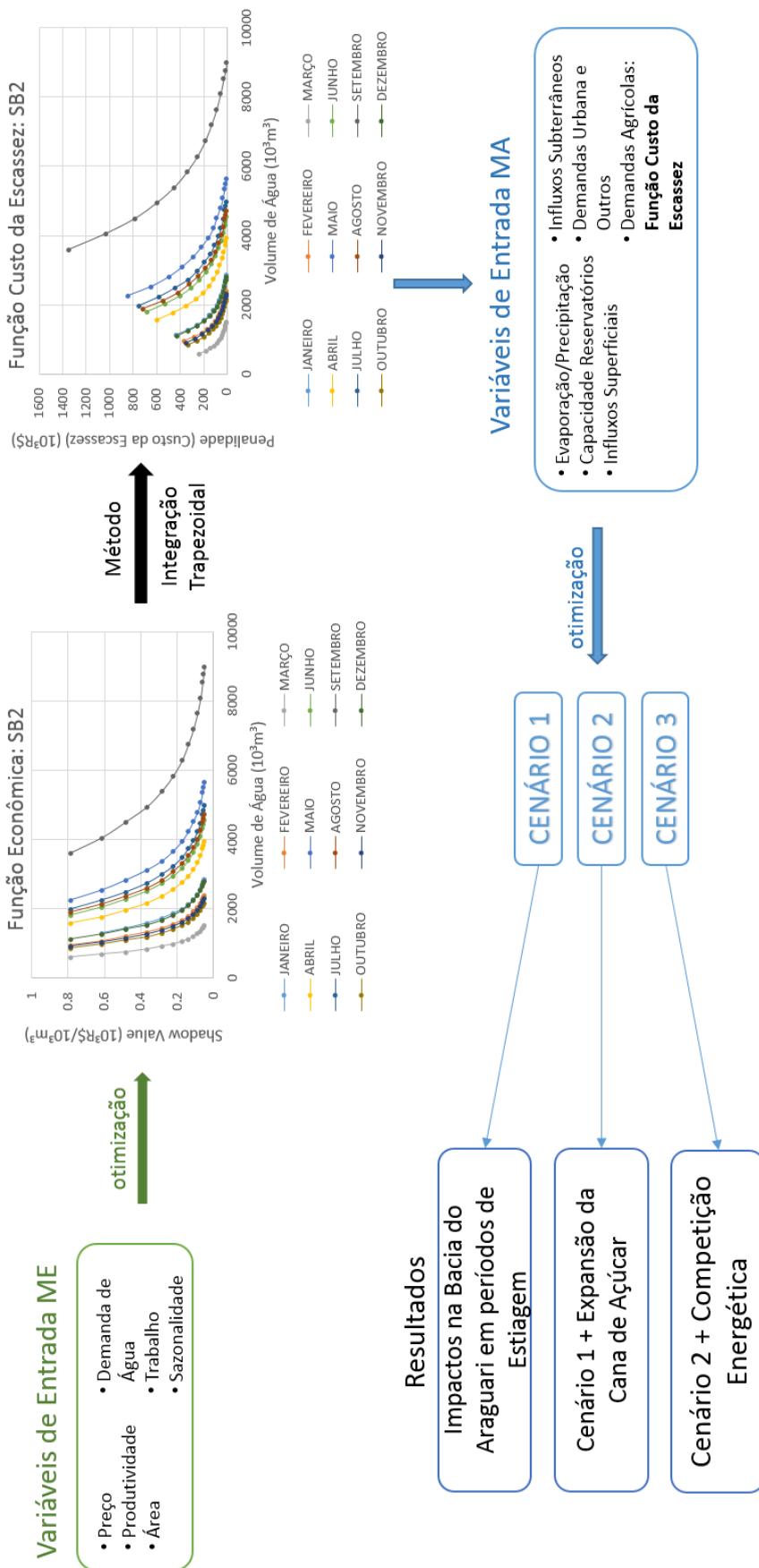
O cenário 3 visa explorar a competição entre produção energética e abastecimento agrícola em situações de escassez. Para tanto, utilizou-se as configurações padrão do cenário 2, e foi acrescentada uma restrição no Reservatório de NP, o mais expressivo do sistema, onde determinou-se que a vazão mínima a passar pelas turbinas fosse de 50hm³/mês. A equação de restrição adicionada é:

$$Link_t, NP, DA2 \geq 50$$

Neste novo cenário, visa-se avaliar se houve prejuízo ou benefício entre os usuários a montante e jusante da usina, avaliar se o custo total da bacia do Araguari se altera com tal restrição, caso positivo, quantificar tal mudança.

O fluxograma da Figura 11 resume a metodologia utilizada, indicando as variáveis de entrada de cada modelo, as manipulações algébricas e os resultados esperados para cada cenário.

Figura 11 - Fluxograma Resumo da Metodologia



4. Resultados

Os resultados das simulações do ME para os cenários 1, 2 e 3 foram integrados pelo método trapezoidal no âmbito de resultarem na demanda agrícola mensal dos usuários das sub bacias. Os gráficos com os segmentos de retas utilizados podem ser encontrados nos anexos I e II.

Os resultados gerais dos três cenários propostos estão resumidos na Tabela 5, onde conferimos crescente escassez total e do seu custo na evolução dos cenários 1 a 3, ao longo de 60 meses de simulação feitos para cada cenário. Com intuito de analisarmos a interferência da demanda energética produzida no Cenário 3, onde existe uma restrição de passagem de água pelas turbinas de NP, os resultados foram separados entre montante e jusante de NP.

Tabela 5 - Resultado Geral dos Cenários Simulados

	Escassez Total (hm³)	Custo da Escassez (10⁶R\$)	Escassez Montante NP (hm³)	Escassez Jusante NP (hm³)	Custo da Escassez Montante (10⁶R\$)	Custo da Escassez Jusante (10⁶R\$)
Cenário 1	4.3	3.96	0.72	3.58	0.05	3.91
Cenário 2	231.74	106.5	109.99	121.75	36.67	77.04
Cenário 3	386.26	200.44	264.51	121.75	123.4	77.04

Ao incluirmos a demanda agrícola pela expansão da cana do cenário 1 para o 2, houve um incremento significativo na escassez e seu custo total. Apesar do aumento de 181.2hm³/ano, os reservatórios de NP e Miranda conseguiram suprir parte da nova demanda, resultando em uma escassez total de 231.74hm³ ao longo de 5 anos. Nos Cenários 1 e 2, as sub bacias a jusante de NP eram mais afetadas pela escassez e seu custo, onde apenas 1.3% do prejuízo total da bacia estava concentrado a montante no cenário 1 e 32.2% no cenário 2, ao passo que este valor foi 61.6% no cenário 3. Esta resposta está associada à restrição de vazão mínima turbinada em NP, que transfere a água para jusante do sistema mesmo que as demandas agrícolas já tenham sido satisfeitas. Outro fator a ser destacado é a escassez a jusante de NP nos

cenários 2 e 3, que possuem o mesmo valor. A razão disto será esclarecida conforme detalharmos os dados.

4.1. Reservatórios

As Figura 12, Figura 13 e Figura 14 ilustram o comportamento dos reservatórios NP e Miranda durante o período otimizado.

Figura 12 -Gráfico da Evolução do Armazenamento dos Reservatórios Cenário 1

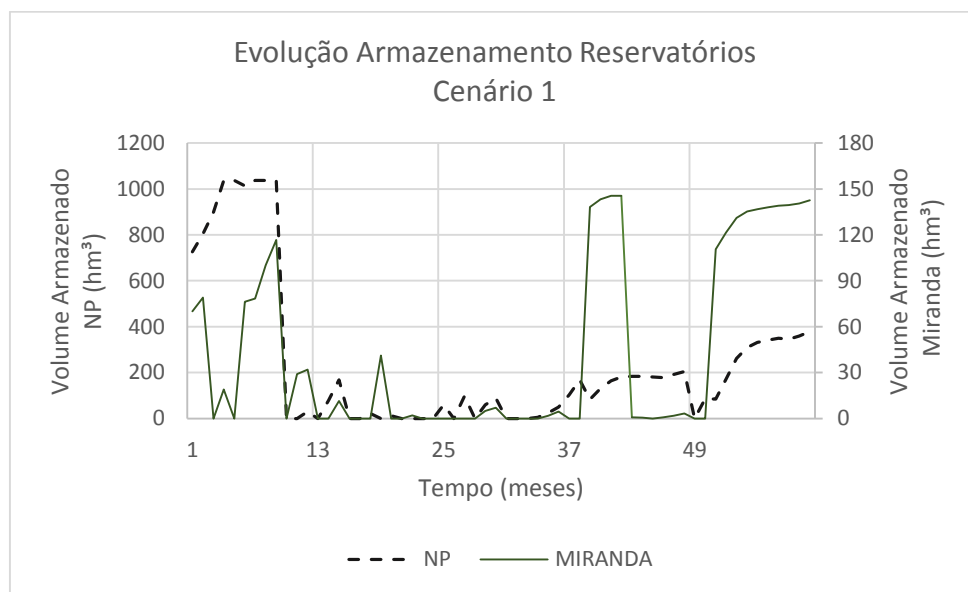


Figura 13 - Gráfico da Evolução do Armazenamento dos Reservatórios Cenário 2

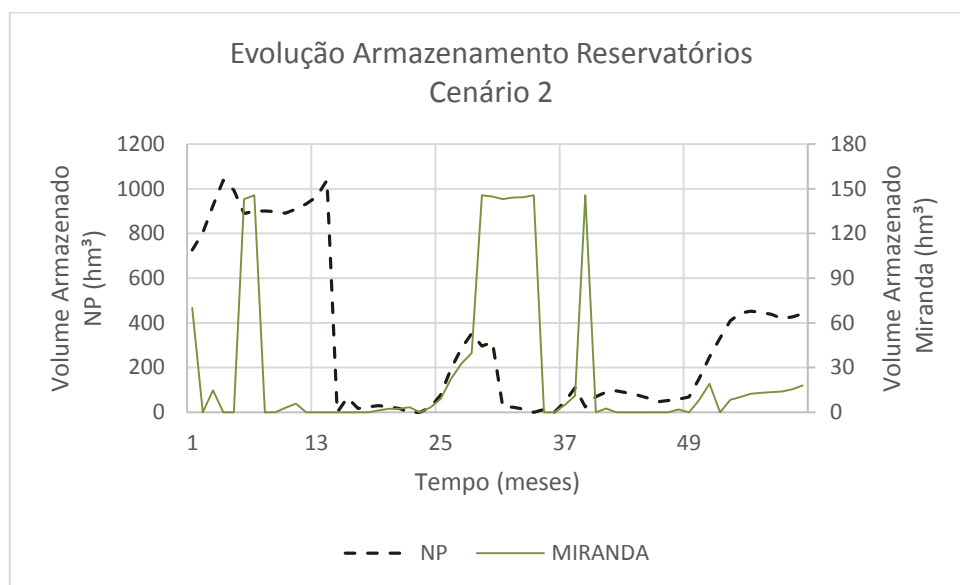
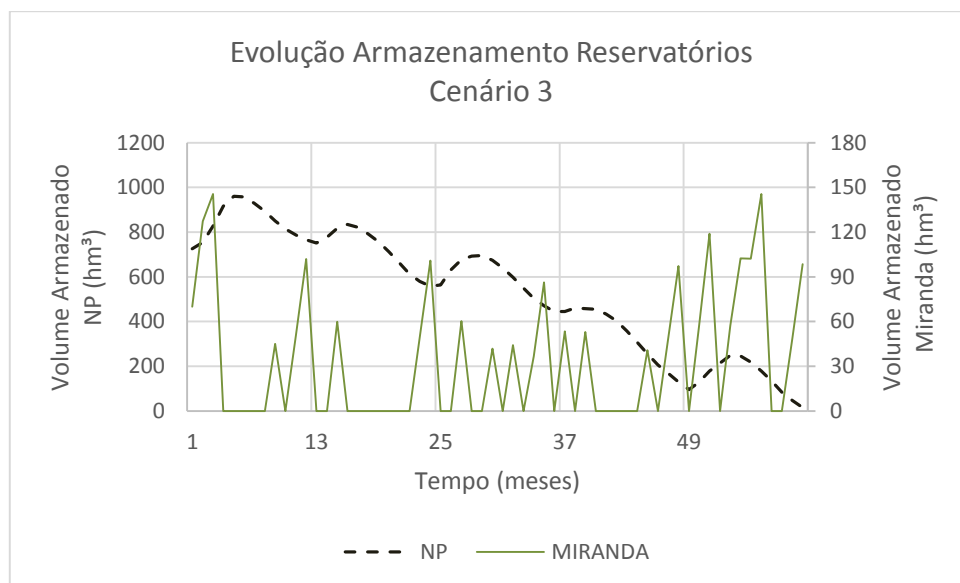


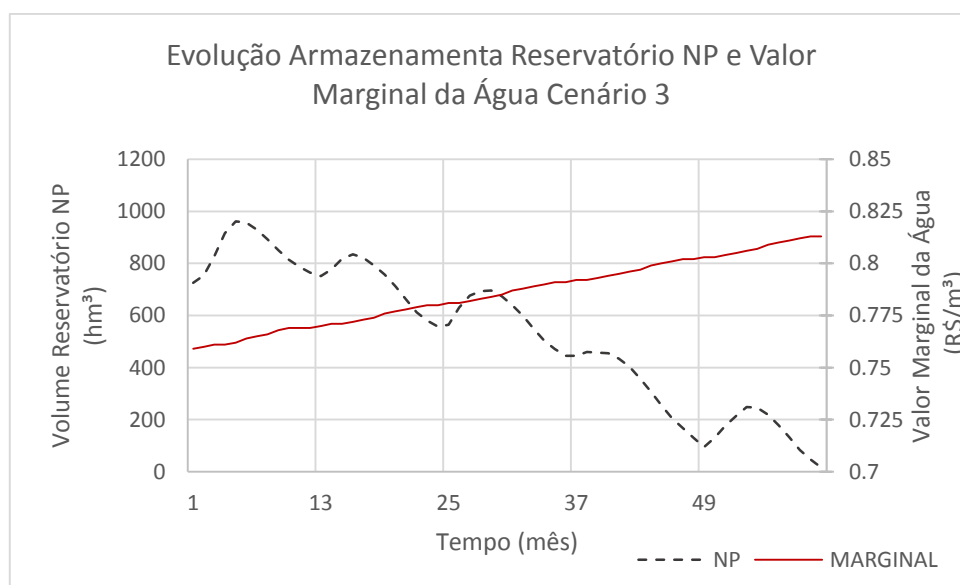
Figura 14 - Gráfico da Evolução do Armazenamento dos Reservatórios Cenário 3



No Modelo de Alocação, não existem restrições de esvaziamento dos reservatórios, e por isso nota-se que frequentemente NP e Miranda chegaram a armazenamentos de valor nulo, caracterizando uma situação de regime não permanente. Ao final do quinto ano, podemos notar que a Figura 13 possui uma tendência de armazenamento total (Miranda e NP) menor do que no Figura 12.

Já na Figura 14, o reservatório de Miranda tem comportamento com picos de armazenamento seguidos de total esvaziamento, ao passo que NP apresenta uma tendência ao esvaziamento, mas de forma mais gradativa do que nos cenários 1 e 2. Por causa da restrição de passagem maior ou igual a $50\text{hm}^3/\text{mês}$ nas turbinas, o reservatório NP não pode esvaziar a ponto que no mês subsequente a vazão seja menor do que mínima determinada. De fato, observou-se que durante os 60 meses do cenário 3, a vazão turbinada em NP foi, em todos os momentos, igual a 50hm^3 , significando que tal restrição ia de encontro com a alocação ótima do sistema.

Figura 15 - Gráfico de Evolução Armazenamento NP e Valor Marginal da Água nas Turbinas de NP



A Figura 15 mostra o valor marginal da água nas turbinas de NP no decorrer da otimização do cenário 3. Existe uma clara relação inversa entre armazenamento e valor marginal, onde conforme o reservatório esvazia, o valor marginal da água cresce. Este resultado está de acordo com a realidade, pois a medida que um recurso se torna escasso, seu valor marginal aumenta. Tomando o mês 37 (início do quarto ano) de exemplo, a Figura 15 representa que, caso a restrição admitisse que a água turbinada a jusante de NP fosse de 51hm^3 (uma unidade a mais do que a permitida), a escassez total diminuiria em aproximadamente 0.78 milhões de Reais.

4.2. Distribuição de Água e Custo da Escassez

A Tabela 6 que segue representa a distribuição de água por sub bacia por ano simulado (esquerda). Os valores abaixo das demandas anuais de cada sub bacia representam a quantidade de água recebida, a última coluna o somatório de toda a escassez ocorrida por ano e a última linha o somatório de escassez por sub bacia ao longo de 5 anos. As sub bacias sublinhadas estão a montante do reservatório de NP.

Tabela 6 - Distribuição de Água por ano e Sub Bacia Cenário 1

Sub Bacia	<u>DA3</u>	<u>DA4</u>	<u>DA5</u>	<u>DA6</u>	<u>DA7</u>	<u>DA8</u>	<u>DC2</u>	DA0	DA1	DA2	DA9	Escassez Anual (hm³)
Demanda Anual (hm³)	1.21	9.35	0.53	16.32	0.12	0.13	0.26	4.54	18.62	47.14	10.33	
1	1.21	9.35	0.53	16.32	0.12	0.13	0.26	4.54	18.62	47.14	10.33	0
2	1.21	9.35	0.53	16.32	0.12	0.13	0.26	4.54	17.78	47.14	10.33	0.84
3	1.21	9.35	0.53	16.32	0.12	0.13	0.26	4.54	18.57	47.14	10.33	0.05
4	1.21	8.63	0.53	16.32	0.12	0.13	0.26	4.54	16.75	47.14	10.33	2.59
5	1.21	9.35	0.53	16.32	0.12	0.13	0.26	4.54	17.8	47.14	10.33	0.82
Escassez por SB (hm³)	0	0.72	0	0	0	0	0	0	3.58	0	0	4.3

Avaliando com maior detalhamento a distribuição da água no Cenário 1, notamos que a escassez ocorre em apenas duas sub bacias: DA1 e DA4. Notamos também que a sub bacia com a maior penalidade é a DA1, cuja escassez representa 83% da escassez total do sistema em 5 anos. Vale ressaltar que ambas sub bacias se encontram em trechos secundários do rio, como a Figura 9 demonstra, e, portanto, possuem apenas a suas fontes superficial e subterrânea, não podendo contar com água sobressalente das sub bacias a montante.

Na Tabela 7 podemos verificar os resultados de custo da escassez para o cenário 1. Mais uma vez, observamos o custo mais representativo na DA1,

assim como percebemos que o ano de maior estiagem foi o ano 4, onde ocorreu o único custo para DA4 e o maior valor em DA1.

Tabela 7 - Custo da Escassez por ano e Sub Bacia do Cenário 1

Sub Bacia	DA3	DA4	DA5	DA6	DA7	DA8	DC2	DA0	DA1	DA2	DA9	Escassez Anual (10 ⁶ R\$)
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0.88	0	0	0.88
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0	0.05
4	0	0.05	0	0	0	0	0	0	2.05	0	0	2.10
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0.93	0	0	0.93
Escassez por SB (10⁶R\$)	0	0.05	0	0	0	0	0	0	3.91	0	0	3.96

Para o Cenário 2, temos na Tabela 8 a distribuição de água conforme os anos simulados, e nela podemos observar um crescimento expressivo na escassez quando comparada ao Cenário 1.

Tabela 8 -Distribuição de Água por ano e Sub Bacia Cenário 2

Sub Bacia	DA3	DA4	DA5	DA6	DA7	DA8	DC2	DA0	DA1	DA2	DA9	Escassez Anual (hm ³)
Demanda (hm³)	36.79	37.55	11.98	41.29	11.92	12.13	4.5	9.77	49.45	83.62	20.53	
1	36.79	29.11	11.98	41.29	11.92	12.12	4.5	9.77	31.26	83.62	20.53	26.64
2	36.17	23.99	10.66	38.51	11.35	10.07	4.26	9.77	23.5	83.62	20.53	47.1
3	36.65	25.33	11.34	39.78	11.92	10.92	4.43	9.77	25.39	83.62	20.53	39.85
4	30.61	18.15	8.67	33.2	9.76	8.67	3.67	9.77	18.74	83.62	20.53	74.14
5	35.97	24.29	10.51	38.4	11.34	10.26	4.22	9.77	26.61	83.62	20.53	44.01
Escassez por SB (hm³)	7.76	66.88	6.74	15.27	3.31	8.61	1.42	0	121.75	0	0	231.74

Novamente, observamos a maior escassez na SB DA1, e o segundo maior valor em DA4. No entanto, para este cenário, observamos escassez na maior

parte das sub bacias do sistema, excluindo-se apenas DA0, DA2 e DA9. O Cenário 2 apresentou escassez desde o primeiro ano de otimização, e teve também a maior estiagem no quarto ano, onde ocorreu maior carência de água e maior custo de escassez, como a Tabela 9 demonstra.

Tabela 9 - Custo da Escassez por ano e Sub Bacia do Cenário 2

Sub Bacia	DA3	DA4	DA5	DA6	DA7	DA8	DC2	DA0	DA1	DA2	DA9	Escassez por Ano (10⁶ R\$)
1	0	1.12	0	0	0	0	0	0	11.03	0	0	12.15
2	0.55	2.73	0.1	1.34	0.33	0.29	0.44	0	16.54	0	0	21.77
3	0.12	2.3	0.05	0.71	0	0.15	0.11	0	15.18	0	0	18.5
4	5.81	5.44	0.48	4.39	1.36	0.52	2.12	0	19.98	0	0	34.29
5	0.73	2.57	0.13	1.42	0.39	0.31	0.66	0	14.31	0	0	19.79
Escassez por SB (10⁶R\$)	7.21	14.16	0.76	7.86	2.08	1.27	3.33	0	77.04	0	0	106.5

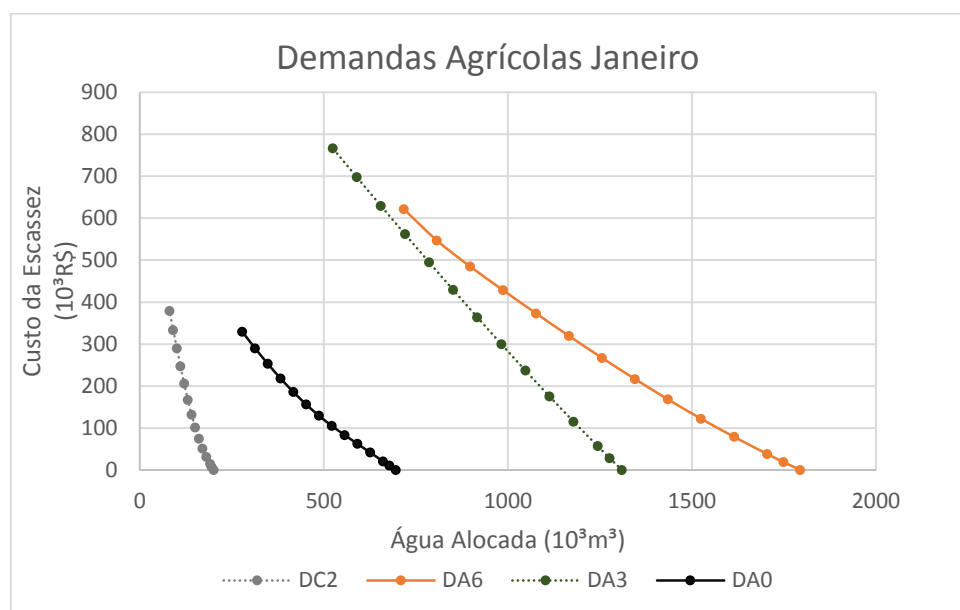
Comparando os valores das Tabela 8 e Tabela 9, podemos observar uma insuficiência semelhante entre DA3, DA5 e DA8, cuja falta d'água foi de respectivamente 7.21, 6.74 e 8.61 hm³ durante os 60 meses. Paralelamente, o custo da escassez para as mesmas sub bacias foram 7.21, 0.76 e 1.27 milhões de Reais. A discrepância entre escassez e custo da escassez se dá por conta das particularidades das funções econômicas de cada sub bacia, reforçando a importância da alocação equimarginal quando se objetiva a diminuição do custo total para o sistema. Para o Cenário 3, temos os resultados na Tabela 10.

Tabela 10- Distribuição de Água por ano e Sub Bacia Cenário 3

Sub Bacia	DA3	DA4	DA5	DA6	DA7	DA8	DC2	DA0	DA1	DA2	DA9	Escassez Anual (hm ³)
Demanda (hm³)	36.79	37.55	11.98	41.29	11.92	12.13	4.5	9.77	49.45	83.62	20.53	
1	36.79	16.91	5.38	24.74	10.73	5.47	4.5	9.77	31.26	83.62	20.53	69.83
2	36.17	15.92	5.38	23.04	10.55	5.47	4.26	9.77	23.5	83.62	20.53	81.32
3	36.65	25.39	5.38	22.48	10.13	5.47	4.43	9.77	25.39	83.62	20.53	70.29
4	30.61	18.74	5.38	20.24	9.26	5.1	3.67	9.77	18.74	83.62	20.53	93.87
5	35.97	26.61	5.38	20.61	9.79	5.47	4.22	9.77	26.61	83.62	20.53	70.95
Escassez por SB (hm³)	7.76	84.18	33	95.34	9.14	33.67	1.42	0	121.75	0	0	386.26

Ao adicionarmos a restrição de vazão turbinada no Cenário 3, todas as sub bacias a montante de NP tiveram aumento em sua escassez, ao passo que as sub bacias a jusante de NP mantiveram o mesmo resultado do Cenário 2. Como mencionado anteriormente, DA1 e DA4 encontra-se em trechos secundários do sistema, e não contam com a vazão excedente a sua montante. Isso acontece também com DA3, DA5, DA7, DA8 e DC2 (vide Figura 9 - Diagrama Unifilar Modelada da Bacia do Araguari). No entanto, as sub bacias a montante de NP no Cenário 3, só podem utilizar a água de forma que a sua vazão de retorno confira às turbinas a vazão mínima demandada, o que faz que necessariamente elas consumam menos água. Já para as sub bacias a jusante, a única restrição de uso seria compensatória para os usuários a jusante que estão conectados no trecho principal do rio (DA0, DA2 e DA9). No Cenário 2, estes usuários apresentavam escassez zero, e com o excedente de água turbinado, existe ainda mais água disponível a jusante que não virá a ser utilizada no Cenário 3. As demandas agrícolas nos Cenários 2 e 3 não se alteram, e por isso a escassez e seu custo em DA1 também não se alterou. Em DA3 e DC2, os resultados também se mantiveram os mesmos nos cenários 2 e 3, apesar de ambas bacias estarem localizadas a montante de NP. Isto ocorre porque os segmentos de retas destas SB têm declividade mais acentuada do que as SB adjacentes. Na prática, isto significa que o custo da escassez decai nestas sub bacias mais rapidamente do que nas outras, como observamos na Figura 16.

Figura 16 - Demandas das DA 0, 3, 6 e DC2 no mês de janeiro



Na Figura 16, escolheu-se comparar as demandas de DC2 e DA3 com respectivamente DA0 e DA6, uma vez que suas demandas totais são de ordens aproximadas. A curva de DC2 se mostra extremamente acentuada quando comparada a DA0, o que indica que, com a mesma quantidade de água, a variação do custo da escassez é maior em DC2 do que em DA0, e a mesma relação é apresentada entre DA3 e DA0. Por isso, o Modelo de Alocação elegeu o abastecimento de DA3 e DC2 com a mesma prioridade do cenário 2. Os custos da escassez no Cenário 3 estão descritos na Tabela 11 - *Custo da Escassez por ano e Sub Bacia do Cenário 3*.

Tabela 11 - Custo da Escassez por ano e Sub Bacia do Cenário 3

Sub Bacia	<u>DA3</u>	<u>DA4</u>	<u>DA5</u>	<u>DA6</u>	<u>DA7</u>	<u>DA8</u>	<u>DC2</u>	DA0	DA1	DA2	DA9	Escassez por Ano (10 ⁶ R\$)
1	0	4.04	1.38	8.6	0.67	1.41	0	0	11.03	0	0	27.13
2	0.55	4.67	1.38	9.68	0.79	1.41	0.44	0	16.54	0	0	35.46
3	0.12	4.5	1.38	10.01	1.04	1.41	0.11	0	15.18	0	0	33.75
4	5.81	14.48	1.38	11.44	1.65	1.67	2.12	0	19.98	0	0	58.53
5	0.73	14.61	1.38	11.18	1.29	1.41	0.66	0	14.31	0	0	45.57
Escassez por SB (10⁶ R\$)	7.21	42.3	6.9	50.91	5.44	7.31	3.33	0	77.04	0	0	200.44

Assim como nos outros cenários simulados, DA1 apresentou o custo mais expressivo de escassez dentre as bacias. DA6, por sua vez, apresentou o segundo maior custo, seguido por DA4. O custo da escassez a montante de NP foi representativamente maior, sem que isso resultasse na diminuição dos custos a jusante – o que acarretou em um custo total maior no Cenário 3.

4.3. Água Subterrânea

A utilização de fontes subterrâneas foi analisada, e pode ser conferida para os Cenários 1, 2 e 3 nas Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14 que seguem. As outorgas anuais por sub bacia estão descritas na primeira linha, seguido pelo valor total captado por sub bacia nos anos de simulação. As bacias que não estão representadas nas tabelas não possuem fonte subterrânea.

Tabela 12 - Captação de água de fontes subterrâneas e Outorga Autorizada Cenário 1

Sub Bacia	DA4	DA5	DA6	DA0	DA1	DA2	DA9	Captação Anual (hm ³)
Outorga Subterrânea Anual (hm³)	0.24	0.36	0.24	9.36	0.24	9.84	9.36	
1	0	0	0	0	0.02	0	0	0.02
2	0	0	0	0	0.08	0	0	0.08
3	0	0	0	0	0	0.06	0	0.06
4	0.04	0	0	0	0	0.08	0	0.12
5	0	0	0	0	0.04	0	0	0.04
Captação Por Sub Bacia (hm³)	0.04	0	0	0	0.14	0.14	0	0.32

A captação de água subterrânea no Cenário 1, representada pela Tabela 12 teve baixa representatividade perante as sub bacias que possuíam outorga subterrânea. Apenas as sub bacias DA4, DA1 e DA2 utilizaram água subterrânea, totalizando 0.32 hm³ em 5 anos. Em DA4, a captação ocorreu somente no quarto ano (mais seco), enquanto em DA1 ocorreu nos anos 1, 2 e 5 e em DA2 nos anos 3 e 4. Nenhuma das sub bacias utilizou a outorga completa que possuem, mesmo que DA1 e DA4 apresentem custo da escassez. Este fato ocorre porque a distribuição de água e a outorga autorizada são simuladas

mensalmente, existindo meses em que a fonte superficial é suficiente e, como as demandas agrícolas não possuem capacidade de armazenamento, a fonte subterrânea não é utilizada. No entanto, nos meses em que a fonte superficial não é suficiente, a captação subterrânea é utilizada na totalidade da outorga mensal.

Tabela 13-Captação de água de fontes subterrâneas e Outorga Autorizada Cenário 2

Sub Bacia	<u>DA4</u>	<u>DA5</u>	<u>DA6</u>	DA0	DA1	DA2	DA9	Captação Anual (hm ³)
Outorga Subterrânea Anual (hm³)	0.24	0.36	0.24	9.36	0.24	9.84	9.36	
1	0.06	0.03	0	0	0.1	0	0	0.19
2	0.08	0.09	0.04	0	0.1	0	0	0.31
3	0.08	0.06	0.04	0	0	0.1	0	0.28
4	0.08	0.09	0.06	0	0	0.1	0	0.33
5	0.08	0.09	0.04	0.22	0.1	0	0	0.53
Captação Por Sub Bacia (hm³)	0.38	0.36	0.18	0.22	0.3	0.2	0	1.64

No Cenário 2, representado pela Tabela 13, observamos aumento da captação subterrânea perante as sub bacias, uma vez que durante os 60 meses, apenas DA9 não faz uso da fonte subterrânea em nenhum instante. Houve utilização subterrânea anual em todas as sub bacias a montante de NP, sendo o valor total da fonte subterrânea utilizada de 1.64hm³ e nenhuma sub bacia utilizou a outorga total autorizada. Também se percebe que o ano de maior utilização da água subterrânea foi o quarto.

Tabela 14 - Captação de água de fontes subterrâneas e Outorga Autorizada Cenário 3

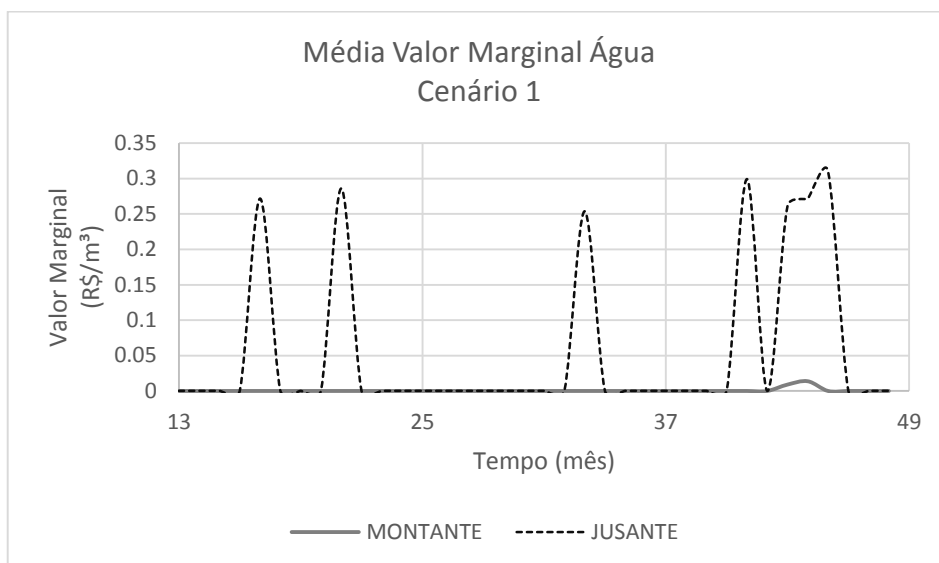
Sub Bacia	<u>DA4</u>	<u>DA5</u>	<u>DA6</u>	DA0	DA1	DA2	DA9	Captação Anual (hm ³)
Outorga Subterrânea Anual (hm³)	0.24	0.36	0.24	9.36	0.24	9.84	9.36	
1	0.24	0.36	0.24	0	0.1	0	0	0.94
2	0.24	0.36	0.24	0	0.1	0	0	0.94
3	0.24	0.36	0.24	0	0	0.1	0	0.94
4	0.24	0.36	0.24	0	0	0.1	0	0.94
5	0.24	0.36	0.24	0	0.1	0	0	0.94
Captação por SB (hm³)	1.2	1.8	1.2	0	0.3	0.2	0	4.7

No Cenário 3 apresentado na Tabela 14, podemos observar que a captação subterrânea foi 100% utilizada nas bacias a montante de NP. Isso pode ser explicado pela menor disponibilidade efetiva das fontes superficiais, e, portanto, a água subterrânea supre um importante papel no abastecimento. A jusante de NP, o abastecimento subterrâneo total diminui, pois DA0 deixa de captar água subterrânea, enquanto as outras sub bacias mantêm a mesma cota de captação. O suprimento da demanda de DA0 pode ser explicado pelo incremento da água superficial disponível no trecho principal do rio, no qual DA0 está conectado. DA2, apesar de também se abastecer do trecho principal, é a demanda mais expressiva do sistema, que sozinha representa 40.8% da demanda jusante total. Além disso, DA2 é quem possui a maior outorga de água subterrânea, e a quantidade que efetivamente usa é 1% do que o outorgado nos anos 3 e 4. Não obstante, DA2 conta com água subterrânea para suprir seus custos de escassez. Para DA1, o resultado igual de abastecimento subterrâneo se explica por esta bacia encontrar-se em um trecho secundário a jusante de NP.

4.4. Valor Marginal da Água

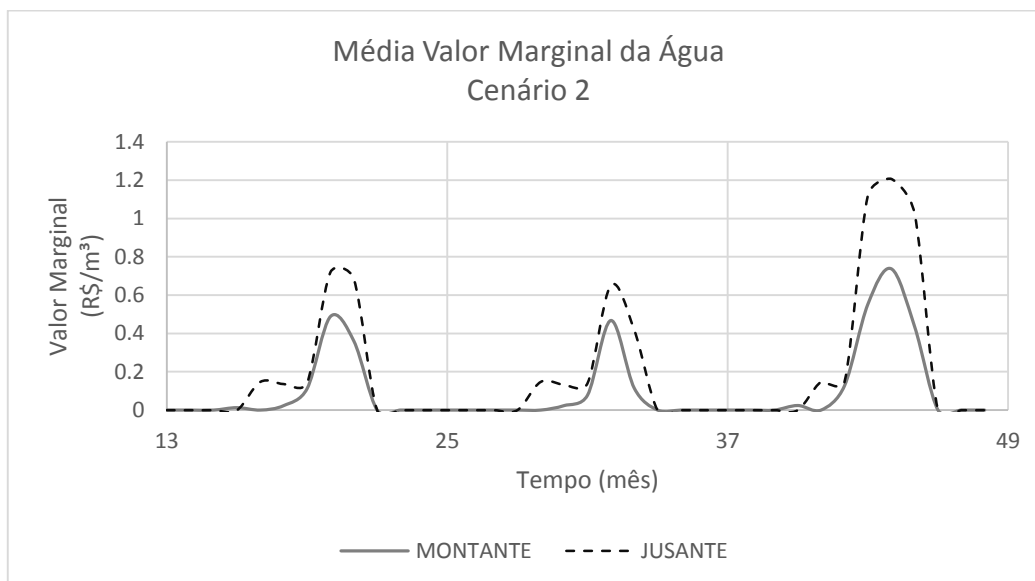
Para avaliar a evolução do valor marginal da água, foi feita uma análise simplificada dos dados. Primeiramente, exclui-se da análise os anos 1 e 5 (meses 1 a 12 e 49 a 60), a fim de diminuir a influência das condições iniciais e finais do sistema. A seguir, foram feitas as médias do valor marginal das demandas agrícolas a jusante e a montante de NP. Os resultados estão representados nos gráficos que seguem.

Figura 17 - Valor Marginal da Água nas Sub Bacias Cenário 1



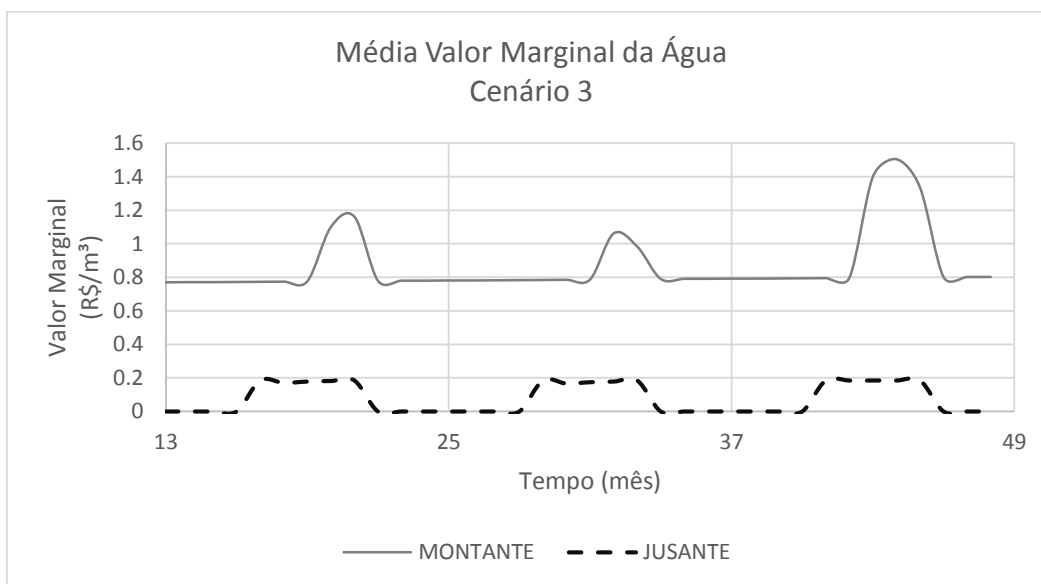
No Cenário 1, tivemos uma pequena escassez a montante na bacia DA4 no quarto ano, e por isso a média do valor marginal a montante mantém-se no valor nulo até aproximadamente o mês 41, onde apresenta um leve pico com valor menor do que 0,05. Este valor, no entanto, é menor do que o valor real da bacia DA4 neste instante, pois é uma média de todas as bacias a montante, que neste cenário, possuem valor zero. A jusante, no entanto, as médias apresentam vários picos nos anos 2, 3 e 4. Na Figura 18, fica claro de identificar os meses em que a escassez ocorre em cada ano, apontando um período de aumento de demanda no mês de agosto em cada ano (meses 21, 33 e 45), onde ambos os valores de montante e jusante apresentam seus maiores valores.

Figura 18 - Valor Marginal da Água nas Sub Bacias Cenário 2



No Cenário 2 da Figura 18, notamos aumento na quantidade de valores não nulos e no valor das médias dos valores marginais da água. Enquanto que no cenário 1, a média não alcançou 0.05 a montante e teve seu ponto máximo de 0.32 a jusante, no cenário 2 estes valores foram para 0.7 a montante e 1.2 a jusante. Este incremento é afetado por dois fatores principais – o primeiro é que no Cenário 2, existe escassez em quase todas as sub bacias, o que faz que existam menos valores nulos de benefício marginal, aumentando, desta forma a média, e o segundo é que os valores existentes são maiores, uma vez que a escassez também é maior. No Cenário 2 também observamos os valores máximos no mês 8 de cada ano, o que representa a influência da sazonalidade das demandas agrícolas.

Figura 19 - Valor Marginal da Água nas Sub Bacias Cenário 3



No Cenário 3, os valores máximos observados a montante aumentaram de 0.8 para 1.4, enquanto o valor máximo de jusante diminuiu para 0.2 quando comparados ao cenário 2. Apesar disso, não houve média nula no intervalo analisado a montante, diferentemente dos cenários 1 e 2. O valor marginal a jusante de NP teve seu valor marginal reduzido devido ao aumento da disponibilidade da água causado pela restrição de turbina. Já a montante, apenas DA3 e DC2 tiveram alguns meses de zero escassez entre os anos de 2 a 4, mas aos quais o modelo atribuiu valor marginal da água igual ao do reservatório de NP – o que gerou ausência de valores nulos durante este período e, desta forma, o valor marginal da água a montante foi sempre superior a zero.

A presença de valores diferentes de zero em meses que não ocorrem escassez é explicada pela vazão de retorno, onde parte da água utilizada pela SB é lançada no sistema principal e pode ser utilizada, e no caso de DC2 e DA3, a vazão de retorno será alocada para o reservatório de NP, uma vez que ambos estão conectados neste. Por este motivo, em DC2 e DA3 o valor marginal da se iguala ao valor marginal da água em NP quando não há escassez, pois caso houvesse a disponibilidade de mais água oferecida pela vazão de retorno destes usuários, o reservatório de NP seria beneficiado.

5. Conclusão

Os critérios utilizados no planejamento e gestão da distribuição de água ainda não levam em consideração seu valor econômico, como preconiza um dos fundamentos da Lei 9.433/97. Em parte, isso se deve à complexidade na determinação desse valor. Devido ao mau uso, gerenciamento e poluição dos corpos hídricos, abundância de água não é mais parte do contexto brasileiro, e, portanto, tal recurso deve ser utilizado sabiamente. Uma estratégia para contornarmos a situação atual é melhorar a eficiência dos usos da água e distribuição das demandas, especialmente a agrícola. A utilização do modelo hidro econômico orienta o gestor sobre os possíveis resultados em situações de escassez de água, e desta forma auxilia na tomada de decisão.

Com o uso dos modelos hidro econômicos Agrícola (ME) e Alocação (MA), foi possível alcançar tais resultados, com a estimativa das funções de demandas dos usuários agrícolas e distribuição da água de maneira que a bacia hidrográfica do Araguari tivesse o menor custo da escassez. O Modelo Agro Econômico forneceu importantes informações no conhecimento da região estudada, dentre estas a função econômica das sub bacias e a projeção do aumento da demanda total e função por usuário na hipótese da expansão da plantação da cana de açúcar irrigada. O Modelo de Alocação nos permitiu avaliar, dentre outros resultados, o impacto econômico gerado em cada cenário simulado. A valoração da água e seu benefício marginal fez jus à lei 9.433/97, e possibilitou a alocação equimarginal do recurso perante os usuários.

Na evolução do estresse hídrico, a disponibilidade de água não foi suficiente para suprir a demanda total da bacia em nenhum dos cenários estipulados. Desta forma, a alocação econômica da água foi utilizada e essencial na minimização do prejuízo total da bacia do Araguari em todos os casos. A importância da alocação equimarginal pôde ser verificada nas situações de usuários cuja escassez possuem dimensão parecidas, mas custos da escassez bem diferentes, podendo ocorrer que para o usuário de maior escassez seja atribuído o menor impacto econômico – como DA3 e DA8, no cenário 2. Este fato nos permite inferir que, caso outro critério de alocação fosse escolhido

(como um critério igualitário, por exemplo), os custos totais da bacia seriam expressivamente maiores.

No Cenário 1, houve escassez em apenas dois usuários, resultando em baixo impacto econômico para a bacia como um todo. No cenário 2, que contava com a expansão na cana de açúcar irrigada, houve escassez em 8 dos 11 usuários agrícolas, e teve um impacto econômico significativo, de aproximadamente 50 vezes maior do que no cenário 1. No cenário 3, onde havia a exigência de vazão mínima para a geração energética na hidrelétrica de NP do sistema, o custo da escassez total foi aproximadamente duas vezes maior do que no cenário 2, e atingiu os mesmos usuários do cenário 2. Apesar de a demanda agrícola nos cenários 2 e 3 serem iguais, a demanda energética acarretou na transferência da água disponível a jusante da Bacia, mesmo que as demandas ali localizadas já tenham sido atendidas. A consequência é que a água efetivamente disponível a montante diminua e exista maior oferta de água do que demanda a jusante. Este resultado também caracterizou o conflito dos usos múltiplos da água, uma vez que a demanda energética causou um aumento no custo da escassez total da bacia.

É importante salientar que o modelo teve capacidade de reagir quando inserida a política de geração elétrica futura do cenário 3. Uma vez implementada a necessidade de suprimento futuro de água para a hidrelétrica, o modelo não permitiu que o reservatório de NP esvaziasse em nenhum momento do período simulado, ao contrário do observado nos cenários 1 e 2. Também foi possível observar o crescente uso de água subterrânea, que a montante de NP, teve praticamente toda sua outorga utilizada. Este fato demonstra a importância da água subterrânea na região, cuja outorga, se for aumentada, geraria grandes benefícios para os usuários. Da mesma forma, ela alerta a possibilidade de captação ilegal deste recurso, e é um indicativo de que o mesmo deve ser fiscalizado e preservado por parte das autoridades legais.

Para futuros trabalhos, recomenda-se revisão e adaptação dos dados de entrada, uma vez que os utilizados neste trabalho fogem da realidade da Bacia do Araguari. Um estudo mais detalhado da disponibilidade atual de água, assim como a tendência das séries temporais futuras de vazão em cada sub bacia são

imprescindíveis para a obtenção de resultados que possam, de fato, representar a região.

No Modelo de Alocação de água, sugere-se a simulação com os reservatórios operando com regime permanente, para que se confira maior semelhança entre modelo e realidade. Na prática, o esvaziamento de reservatórios só acontece em períodos de estiagem severas, e o fato de existirem diversos picos de esvaziamento nos cenários simulados compromete a veracidade dos resultados. Também se indica a implementação do benefício econômico que a geração de energia oferece. No cenário 3, a restrição de vazão turbinada gera apenas prejuízos à bacia, mas na realidade, a geração elétrica também presta um serviço à bacia, e este deve ser mensurado e descontado do custo da escassez. Neste aspecto, poderíamos ter também uma nova atribuição dos múltiplos usos da água de irrigação e geração energética, fazendo que o modelo compute em sua no cálculo de otimização o benefício energético.

A aplicação de modelos hidro econômicos apresentam diversas vantagens para o planejamento e gestão dos recursos hídricos. Simulações de expansão da cana de açúcar e sua incremental demanda de irrigação no Modelo de Alocação permitem explorar a viabilidade de investimentos na bacia do Araguari. No caso do cenário 2, com os dados considerados, investimentos na expansão da cana de açúcar estria atrelado a riscos, uma vez que a simulação indica que a demanda prevista não seria respeitada, e de um modo geral, causaria prejuízos aos agricultores da região. Já para o caso em que se procura analisar a situação atual de uma sub bacia onde existe discordância sobre o uso da água, o Modelo Hidro Econômico de Alocação oferece subsidio para tomada de decisão de gestores na determinação da distribuição mais eficiente na bacia.

De modo geral, pode-se dizer que em gestão de recursos hídricos, não necessariamente temos um jogo de soma zero (onde um usuário deve perder para que outro ganhe). É possível encontrar soluções onde os ganhos totais são maiores que as perdas, com potenciais benefícios econômicos para todos os integrantes da bacia. Entretanto, caberia ainda aos gestores e planejadores evitar que os custos de transação e externalidades inviabilizem tal alocação eficiente. Esses custos podem ser minimizados por meio de sistemas de

informação dos recursos hídricos acessíveis e transparentes, regras claras de alocação e instituições com capacidade técnica para realizar a contabilidade hídrica e outras análises necessárias.

Estes fatores são de extrema relevância no cômputo do melhoramento da operação do sistema e, portanto, devem ser considerados. Desta forma, se busca potencializar os benefícios trazidos pelos múltiplos usos da água.

Referências

Apla - Arranjo Produtivo Local do Álcool. Produção de etanol no Brasil crescerá 13,7%, prevê OIA. Piracicaba - São Paulo. Acessado em: 13/11/2015.

ARAGUARI, P. de. Dados da Cidade de Araguari.

BALESTRO, F. Alocação de Água Através de Análise Econômica - Aplicação na Irrigação da Bacia do Rio dos Sinos. Dissertação (Monografia) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

CAI, X.; MCKINNEY, D. C.; LASDON, L. S. Integrated Hydrologic-Agronomic-Economic Model for River Basin Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, p. 4 – 17, Fevereiro 2003.

CARDWELL, H. E. et al. Integrated Water Resources Management: Definitions and Conceptual Musings. *Journal of Contemporary Water Research and Education*, p. 8 – 18, Dezembro 2006.

CASTRO, F. do Valle Ferreira de; ALVARENGA, L. J.; JÚNIOR, A. P. M. A Política Nacional de Recursos Hídricos e a gestão de conflitos em uma nova territorialidade. *Revista do Departamento de Geografia e do Programa de Pós-Graduação em Geografia IGC - UFMG, Belo Horizonte*, v. 1, n. 1, p. 37 – 50, Dezembro 2005. ISSN 2237549x.

CIA – Central Intelligence Agency (2014). *The World Fact Book, Brazil, Economy*. Disponível em <<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/br.html>> . Acesso em: 19 de maio de 2015.

Embrapa, Embrapa pesquisa cana de açúcar em área de expansão no Cerrado, Portal Embrapa, 2015. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/buscadenoticias/noticia/2454148/embrapapesquisacanaeacucaremareadeexpansaoocerrado>>. Acesso em: 13 de novembro de 2015.

FAPESP, A. Pesquisa analisa impacto ambiental da cana-de-açúcar. 2013. Acessado em 13/09/2015.

FISHER, F. M. Water Value, Water Management, and Water Conflict: A Systematic Approach. *GAIA*, v. 3, p. 187 – 190, 2002.

FREITAS, R. G. de; BAFFA, D. C. F.; BRASIL, R. P. C. do. AUMENTO NA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR ATRAVÉS DA IRRIGAÇÃO. Revista Científica da Fundação Educacional de Ituverava, julho 2009

GASPARATOS, A.; STROMBERG, P. Socioeconomic and Environmental Impacts of Biofuels: evidence from developing nations. 32 Avenue of the Americas, New York, NY 10013-2473, USA: Cambridge University Press, 2012. ISBN 978-1-107-00935-6.

HAROU, J. J. et al. Hydro-economic models: Concepts, design, applications and future prospects. Journal of Hydrology, p. 627 – 643, Junho 2009.

HEINZ, I. et al. Hydro-economic Modeling in River Basin Management: Implications and Applications for the European Water Framework Directive. Water Resource Management, p. 1103 – 1125, 2007. ISSN 1573-1650.

HOWITT, R. E. Positive Mathematical Programm. American Journal of Agricultural Economics, v. 77, n. 2, p. 329 – 342, Maio 1995. ISSN 1467-8276.

HOWITT, R.E.; Ward, K.B.; Msangi, S.M. (1999). Statewide Water and Agricultural Production Model. IN: Jenkins, M.W.; Draper, A.J.; Lund, J.R.; Howitt, R.E.; Tanaka, S.; Ritzema, R.; Marques, G.F.; Msangi S.M.; Newlin. B.D.; Van Lienden, B.J.; Davis, M.D.; Ward, K.B. (2001) Improving California Water Management: Optimizing Value and Flexibility – Appendix A

Howitt, R.E.; Tauber, M.; Pienaar, E. Impacts of Global Climate Change on California's Agricultural Water Demands. Department of Agricultural and Resource Economics, University of California, Davis., (2003)

JENKINS, M. W. et al. Optimization of California's Water Supply System: Results and Insights. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 130, n. 4, p. 271 – 280, Agosto 2003. ISSN 1943-5452.

JÚNIOR, A. A.; HERNANDEZ, F. B. T. ÁGUA NOVA REALIDADE. Site Unesp. Acessado em 18/11/2015.

LANNA, A. E. A Economia dos Recursos Hídricos: os desafios da Alocação eficiente de um recurso (cada vez mais) escasso. Estudos Avançados, v. 22, n. 63, 2008.

MARQUES, G. F. et al. Economically Driven Simulation of Regional Water Systems: Friant-Kern, California. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 132, n. 4, p. 468 – 479, Novembro 2006. ISSN 1943-5452.

MARQUES, G. F.; MACIEL, A. L. A.; ALMEIDA, R. R. Hydro Economic Modeling to Support Water Resources Management and Irrigated Bio Fuel Crops Production. *Water Management*, p. 192 – 203, 2011.

Monte Plan Consultoria. Plano de Recursos Hídricos Bacia do Rio Araguaari. Monte Carlo: [s.n.], 2011.

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, Junho 2006.

NETO, A. E. Gestão dos Recursos Hídricos na Agroindústria Canavieira. FNS - Gestão de Recursos Hídricos na Agroindústria Canavieira, 2009.

OLIVEIRA, E. G. D. A EXPANSÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO CENTROOESTE DE MINAS GERAIS: CENÁRIO ATUAL E TENDÊNCIAS FUTURAS. Goiânia. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS, Goiânia, 2014. CDU: 636.61(815.1).

PARAIZO, D. Uso da água na produção da cana-de-açúcar e etanol. 2013. Online. Acessado em 13/09/2015.

TORRES, M. de O.; RODRIGUES, M. L.; PAZ, J. M. Hydro-Economic Model for the Assessment of Water Resources Allocation and Availability Impacts on Agricultural Income. In: II Inovagri International Meetings. Fortaleza: [s.n.], 2014.

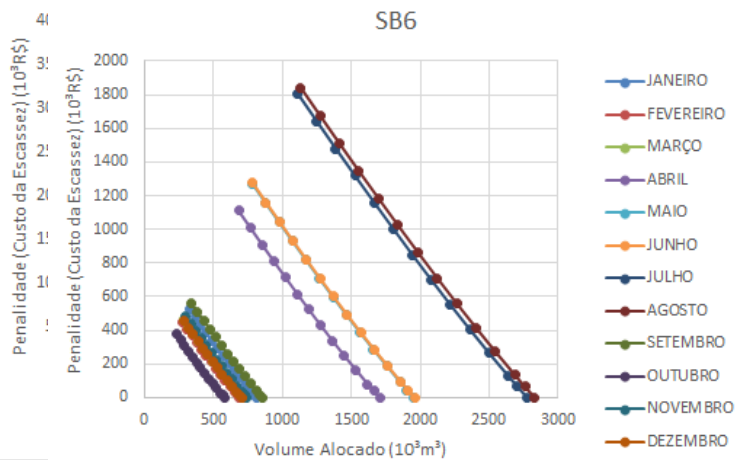
UNICA - União da Indústria da Cana de Açúcar. Frota brasileira de autoveículos leves.

ZANZARINI, R. M.; SANTOS, R. J. A Expansão da Cana de Açúcar no Cerrado Brasileiro. In: Observatório Geográfico da América Latina. [s.n.], 2008.

ANEXO I

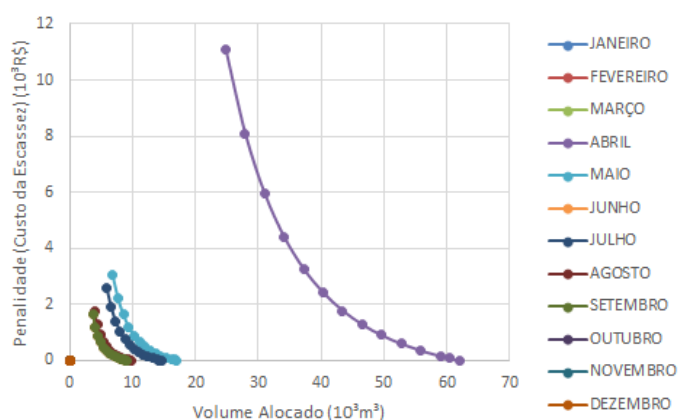
CR0

SB6

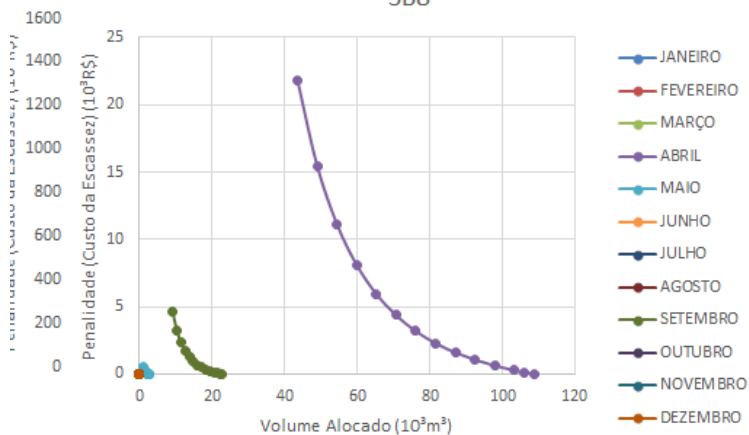


CR0

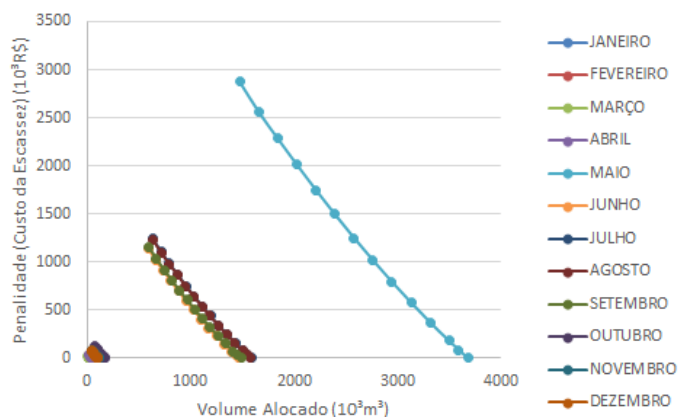
SB7



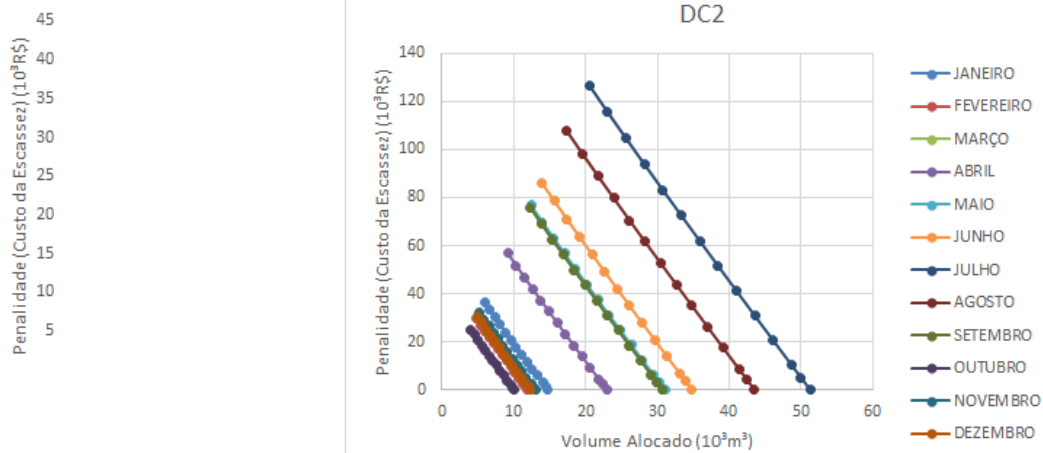
SB8



SB9



DC2



ANEXO II

