

IV PRÊMIO SEAE 2009



CATEGORIA: PROFISSIONAIS

2º LUGAR - REGULAÇÃO ECONÔMICA
AUTOR: BRUNO GOULART DE FREITAS MACHADO
BRASÍLIA - DF

**PROPOSTA METODOLÓGICA PARA ALOCAÇÃO DE
RECURSOS HÍDRICOS EM BASES ECONÔMICAS: O CASO DA
IRRIGAÇÃO E DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NA
BACIA DO RIO PRETO (DF/GO/MG)**

IV PRÊMIO SEAE - 2009

TEMA: REGULAÇÃO ECONÔMICA

**PROPOSTA METODOLÓGICA PARA ALOCAÇÃO DE
RECURSOS HÍDRICOS EM BASES ECONÔMICAS: O CASO
DA IRRIGAÇÃO E DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
NA BACIA DO RIO PRETO (DF/GO/MG)**

RESUMO

Esta monografia tem o intuito de propor procedimento que permita analisar a questão da alocação de água entre dois usos distintos - irrigação e produção de energia elétrica -, com base em métodos da análise econômica, buscando contribuir em processos de tomada de decisão na área de planejamento e gestão de recursos hídricos. Com efeito, curvas de demanda pela água foram construídas para os dois usos em questão e a bacia do rio Preto foi a região hidrográfica escolhida para servir como caso de estudo para a presente análise.

A técnica empregada para a valoração da água na irrigação foi o método da *função de produção*. As informações requeridas por essa metodologia foram levantadas a partir de dados secundários, consultando-se parâmetros médios recomendados em trabalhos científicos e estatísticas oficiais de instituições públicas governamentais. Com respeito à geração hidroelétrica, a estratégia de valoração da água baseou-se em resultados de simulações do modelo de otimização utilizado no planejamento do setor elétrico brasileiro, o NEWAVE.

Simulações finais realizadas no modelo de alocação Aquanet corroboraram o fato de que uma análise dessa natureza deve levar em conta quatro aspectos principais: o tipo de cultura irrigada, as respectivas eficiências dos processos de irrigação e produção de energia, o local de plantio e de instalação do parque de geração hidroelétrica a serem analisados, além da conjuntura macroeconômica interveniente a essas duas atividades produtivas.

Não obstante, considera-se que a metodologia proposta pode ser de grande valia para instituições responsáveis pela prática da regulação e gestão de recursos hídricos, uma vez que essas organizações comumente defrontam-se com diferentes usuários instalados em uma bacia hidrográfica, para os quais há distintas finalidades na utilização da água, assimetria de poderes de barganha, além de diferentes benefícios percebidos em sua utilização. O procedimento ora proposto auxilia o estabelecimento de prioridades na alocação do recurso hídrico, sob a ótica de maximização do benefício econômico, de modo que seja levada em conta a supremacia do interesse público em detrimento de anseios particulares.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
2. MARCO TEÓRICO E CONCEITUAL	9
2.1 Eficiência Econômica Aplicada à Valoração da Água.....	9
2.2 Valoração Econômica na Ausência de um Mercado de Preços	14
2.3 Métodos de Valoração da Água.....	17
2.3.1 Valoração Direta por Meio de Mudanças de Produtividade	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3.1 Modelos e Técnicas para Representação de Sistemas de Recursos Hídricos23	
3.2 O Modelo MODSIM.....	23
3.3 O Modelo NEWAVE	26
4. CASO DE ESTUDO: BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PRETO	31
4.1 Metodologia	35
4.2. Demanda Econômica para a Irrigação.....	38
4.2.1 Identificação e Delimitação dos Pivôs-Centrais	38
4.2.2 Informações Econômicas	41
4.2.3 Produtividade Agrícola	42
4.2.4 Preços de Mercado dos Produtos Agrícolas	46
4.2.5 Custos de Produção.....	47
4.2.6 Estimativa do Consumo de Água na Irrigação	48
4.3 Curva de Demanda para a Irrigação no rio Preto	49
4.4 Demanda Econômica para a Energia Elétrica	53
4.5 Análise de Alocação da Água no rio Preto	60
4.5.1 Avaliação das Curvas de Demanda para o Rio Preto	60
4.5.2 Análise Econômica do Rio Preto no Aquanet.....	65
4.5.3 Simulação de Dois Cenários	66
4.5.4 Análise dos Resultados.....	68
5. CONCLUSÕES	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

1. INTRODUÇÃO

A Política de Recursos Hídricos no Brasil foi instituída pela Lei nº. 9.433, de 8 de Janeiro de 1997. Conhecida, também, como Lei das Águas, essa norma regulamenta o que prevê o texto constitucional sobre a competência privativa do Estado em instituir o sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos e definir critérios para outorga de direitos de uso da água.

Esse marco regulatório estabelece os principais fundamentos para a gestão de recursos hídricos no país, dentre os quais, destacam-se as seguintes assertivas: “... (i) *a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico* e (ii) *a gestão de recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas...*”.

Essas diretrizes vêm ao encontro das modernas práticas de gerenciamento de recursos naturais – incluindo-se, nessas, o manejo de recursos hídricos - que requerem a articulação de quatro mecanismos de gestão principais (Porto e Lobato, 2004): (i) os tradicionais instrumentos de comando-e-controle, específicos do aparato institucional do Estado, que visam a assegurar as garantias estabelecidas na legislação; (ii) a descentralização da gestão por meio de mecanismos de responsabilização compartilhada entre o Estado e a sociedade civil organizada; (iii) a incorporação de instrumentos econômicos com vistas a compatibilizar o comportamento econômico das atividades produtivas aos requisitos de preservação ambiental e (iv) incentivos à adoção voluntária dos agentes econômicos às diretrizes ambientais, por meio da emissão de certificados de qualidade ambiental.

Uma das principais razões para a adoção de instrumentos econômicos como ferramentas de suporte à gestão, mais especificamente na área de recursos hídricos, é a possibilidade desses instrumentos induzirem o mercado a internalizar os custos incorridos pela utilização da água nos processos produtivos da economia. Ademais, procura-se incluir, nesses custos, as características particulares da água no que tange à sua variabilidade no espaço e no tempo, bem como suas variantes qualitativas em ambas as circunstâncias.

Nesse contexto, o papel desempenhado pela análise econômica pode ser de grande utilidade ao processo decisório, pelo fato de agregar uma série de alternativas analíticas, dentre as quais se incluem a estimativa de demandas futuras, estudos de viabilidade financeira, emprego de técnicas de valoração econômica e medidas de eficiência na alocação de recursos. Esse conjunto de instrumentos, somado ao cabedal de conhecimento adquirido sobre os processos hidrológicos e ao ferramental analítico próprio do campo da engenharia, proporciona um significativo ganho em alternativas para a gestão e implementação de políticas públicas na área de recursos hídricos (Heinz *et al.*, 2007).

Não obstante, os requisitos estabelecidos pela legislação brasileira, os quais pressupõem o uso compartilhado da água entre diversos usuários, levam, inevitavelmente, à prescrição de critérios de prioridades e regulamentação da sua utilização. A Lei 9.433/97, expressamente, reserva a prioridade de uso ao abastecimento humano e à dessedentação de animais. Para os demais – irrigação, navegação, recreação, hidroeletricidade, controle de cheias -, não há preferências previamente estabelecidas, sendo que compete ao decisor público defini-las,

levando-se em conta aspectos de eficiência econômica, e, também, os não menos importantes requisitos sociais - como equidade e redistribuição da riqueza - e de sustentabilidade ambiental, como manutenção da qualidade da água e preservação de ecossistemas.

Com efeito, a complexidade envolvida em todo esse processo decisório leva, invariavelmente, à recorrência das metodologias calcadas em alguma racionalidade para que as resoluções atendam, da melhor forma possível, às expectativas dos vários segmentos da sociedade. Nesse sentido, o trato econômico da água compatibiliza a utilização desse recurso com as atividades que agregam valor a esse insumo, de forma que sejam priorizadas as alternativas que maximizem o produto interno líquido gerado na bacia hidrográfica.

É com esse enfoque que se propõe, neste trabalho, desenvolver abordagem que permita avaliar um caso de estudo para o qual se prevê um cenário de conflito pela utilização da água entre dois importantes setores da economia – irrigação agrícola e geração de energia elétrica - e, dessa maneira, avaliar a aplicação de uma metodologia baseada em critérios econômicos para auxiliar o processo de tomada de decisão em casos similares de gerenciamento e regulação do uso da água em bacias hidrográficas.

Este documento é composto pelo total de cinco partes. Além desta introdução, alguns conceitos teóricos associados ao tratamento econômico da água, bem como detalhes do método de valoração econômica utilizado para a confecção da curva de demanda para o uso irrigação estão dispostos no segundo item que se segue. O

capítulo três abriga breve revisão bibliográfica sobre o modelo de planejamento do setor elétrico brasileiro - utilizado na construção da curva de demanda econômica para a energia elétrica – e o modelo matemático de suporte à decisão utilizado, nesta pesquisa, para representação do sistema de recursos hídricos estudado – a bacia hidrográfica do rio Preto. A descrição mais detalhada das etapas envolvidas na consecução da metodologia de alocação da água proposta é consubstanciada na quarta seção. Por fim, o capítulo cinco contém as principais conclusões em relação ao procedimento metodológico desenvolvido e aos resultados obtidos no caso de estudo avaliado.

2. MARCO TEÓRICO E CONCEITUAL

2.1 EFICIÊNCIA ECONÔMICA APLICADA À VALORAÇÃO DA ÁGUA

Investimentos públicos na área de recursos hídricos constituem uma importante parcela do montante total gasto em infra-estrutura de um país. A estimativa dos benefícios econômicos é um instrumento de grande importância para o auxílio à tomada de decisão no contexto do setor de recursos hídricos onde, não raro, há múltiplos usos, setores e usuários envolvidos. Esses recursos, antes de serem aplicados, requerem um estudo de viabilidade econômica com intuito de aferir não só a rentabilidade financeira do projeto, mas, também, o benefício líquido gerado pelo mesmo à sociedade.

Todavia, o que se observa, em muitos casos práticos da área de recursos hídricos, é uma superestimativa do cálculo, ainda em sua fase de viabilidade, do benefício líquido gerado para a sociedade oriundo da implantação de um empreendimento. Essa constatação reforça a idéia de se dispor procedimentos mais rigorosos - que levem em conta critérios de eficiência econômica - para a contabilização da renda líquida gerada pelo gasto público nesse setor (Young, 1996).

Considerações sobre eficiência econômica não são relevantes somente nos casos de análises de viabilidade de projetos de infra-estrutura. Outra classe importante de medidas, nas quais se faz necessária a estimativa do valor econômico da água, diz respeito à definição de marcos regulatórios para alocação da água. Nesses casos, o objetivo da análise é estimar o volume de água que deve ser outorgado para um determinado usuário, levando-se em consideração que essa decisão pode implicar

na restrição de consumo ou de disponibilidade para outros usuários situados em uma mesma bacia hidrográfica.

Em economia, análises que visam à eficiência na alocação de recursos são exemplos típicos em que se pode empregar o conceito de *eficiência de Pareto*¹. Apesar de todo o rigor matemático que está por trás do enunciado desse princípio, o mesmo estabelece que o equilíbrio na alocação de um recurso é tido como eficiente quando não é mais possível aumentar o ganho de utilidade de um usuário sem que haja a diminuição da utilidade percebida por outrem. Essa assertiva equivale a afirmar que o conceito de alocação ótima ocorre quando os benefícios marginais de utilização de um serviço ou bem são iguais aos custos marginais de provisão do mesmo (Pindyck e Rubinfeld, 2002).

O princípio de Pareto é uma construção teórica idealizada sobre a realidade baseando-se nos seguintes axiomas (Maler, 1985 *apud* Young, 1996): (i) supõe-se que todos os indivíduos ajam de maneira racional e que as suas preferências individuais sejam válidas, ou seja, o bem-estar da sociedade como um todo pode ser entendido como sendo o resultado agregado das preferências individuais de seus indivíduos; (ii) pressupõe-se que o indivíduo é o melhor avaliador do seu próprio bem-estar; e (iii) uma mudança que leve a uma melhora na satisfação de todos os indivíduos, sem que haja diminuição do bem-estar de qualquer outro, consiste em uma mudança positiva do bem-estar geral de todos.

¹ Termo em homenagem ao economista italiano Vilfredo Pareto (1848-1923), que desenvolveu o conceito de eficiência nas trocas.

A noção de eficiência pode ser ilustrada com o modelo de sociedade em que haja dois indivíduos, dois bens e duas empresas produzindo cada um desses bens. A teoria microeconômica mostra que é possível obter uma *fronteira de possibilidade de utilidade*, como apresentada na Figura 2.1. Essa fronteira estabelece todas as combinações de utilidade de cada indivíduo, compatíveis com a disponibilidade de recursos produtivos, com as tecnologias e com as funções-utilidade de ambos os indivíduos (Mueller, 2007).

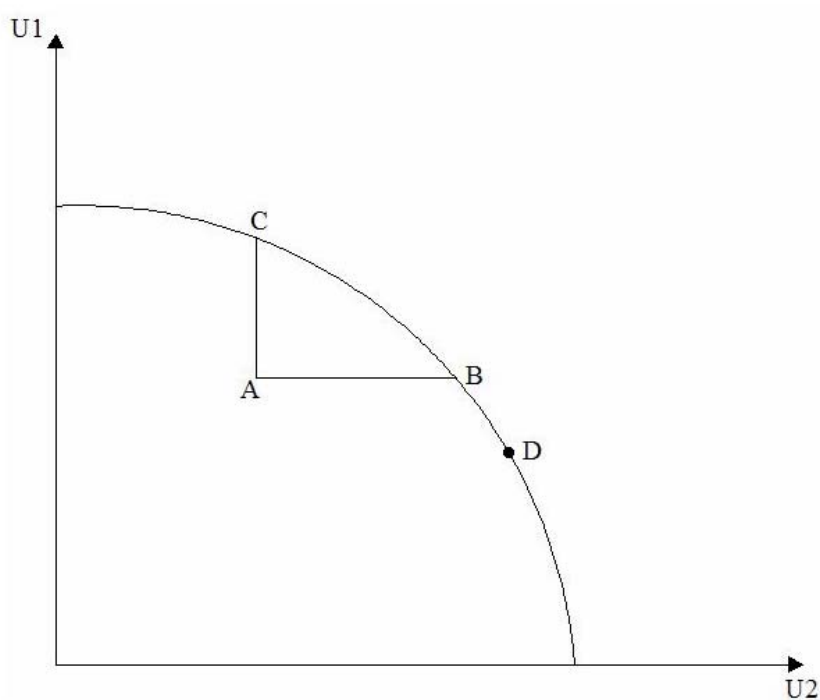


Figura 2.1 – Fronteira de Possibilidades de Utilidade

Para uma dada disponibilidade de recursos – mantendo-se constantes a tecnologia e as preferências individuais -, a fronteira de possibilidade de utilidade divide o espaço da combinação de utilidades dos dois indivíduos em uma área factível (a que está abaixo da fronteira) e outra não factível (situada acima da mesma). Uma alocação de recursos eficiente é aquela localizada sobre a linha de fronteira (Mueller, 2007).

Com efeito, os dois eixos coordenados (U_1 e U_2) na Figura 2.1 representam as respectivas utilidades de cada indivíduo, e os pontos B, C e D representam combinações de recursos eficientes para ambos. Em relação ao ponto A, o rearranjo na alocação de recursos que leve à maximização da utilidade global, só poderá ser considerada eficiente, no sentido de Pareto, se for concebida dentro da fronteira delimitada pelos pontos B e C. Fora dessa região, um movimento que vise ao incremento de satisfação de um indivíduo necessariamente leva à redução da satisfação percebida pelo outro.

Segundo a doutrina da análise econômica neoclássica, o funcionamento de mercados livres conduz a alocações eficientes de recursos na economia, sob certas condições e hipóteses. Essas hipóteses podem ser consideradas pouco realistas, mas constituem uma abstração teórica necessária que permite a análise de aspectos do funcionamento das economias. A seguir, mostram-se quais são essas condições para que o funcionamento de um mercado seja considerado ideal (Mueller, 2007): (i) existência de mercados para todos os recursos produtivos; (ii) funcionamento em regime de concorrência perfeita; (iii) os agentes econômicos dispõem de informação perfeita sobre o funcionamento do mercado; (iv) as funções-utilidade e de produção apresentam condições de convexidade²; (v) os direitos de propriedade são claramente definidos e respeitados; e (vi) ausência de externalidades.

² Condição advinda da teoria do consumidor na qual se supõe que à medida que maiores quantidades de uma mercadoria são consumidas, espera-se que o consumidor prefira abrir mão de cada vez menos unidades de uma segunda mercadoria para obter unidades adicionais da primeira (Pindyck e Rubinfeld, 2002).

Seroa da Motta (1998) expõe que as condições exigidas para garantir eficiência nas alocações de mercado são geralmente violadas e exigem ações governamentais. Esses desvios são chamados de falhas de mercado. Constituem exemplos dessas imperfeições: (i) a existência de monopólios ou oligopólios que não asseguram um mercado de concorrência perfeita; (ii) existência de altos custos de transação nas atividades de troca; (iii) ocorrência de externalidades; e (iv) as próprias distorções de ações governamentais que, a princípio, tenderiam a corrigir uma imperfeição num setor e acabam por gerar imperfeições em setores distintos.

Um órgão responsável pela regulação e gestão de recursos hídricos comumente se defronta com diferentes usuários instalados em uma bacia hidrográfica, para os quais há distintas finalidades de uso da água e diferentes benefícios percebidos pela sua utilização³. O instrumental analítico da teoria microeconômica pode ser de grande valia para avaliar casos concretos de gestão de recursos hídricos quando, por exemplo, há conflitos de interesse pelo uso da água entre setores distintos da atividade econômica. Nesses casos, a análise visa a estabelecer prioridades de uso e, também, os volumes que devem ser alocados, dentre os diferentes usuários, de modo que haja maximização do benefício econômico, sob a ótica da supremacia do interesse público.

³ Ademais, a utilização da água implica em externalidades diferenciadas e em condicionantes financeiras distintas, conforme o tipo e a característica de cada usuário.

2.2 VALORAÇÃO ECONÔMICA NA AUSÊNCIA DE UM MERCADO DE PREÇOS

Políticas públicas na área de recursos hídricos produzem efeitos que, em geral, recaem sobre uma dimensão econômica, que, por sua vez, pode ser tanto positiva, quanto negativa. A resolução de conflitos pelo uso da água requer a identificação e a comparação dos benefícios e dos custos envolvidos, dentre um conjunto de possibilidades de análises, em confronto com múltiplas alternativas e interesses por parte dos usuários. Benefícios são os efeitos desejáveis de uma proposta, enquanto os custos podem ser avaliados como os impactos indesejáveis. O balanço entre os custos e benefícios na implantação de uma medida ou projeto é conhecido como análise de custo-benefício.

A análise de custo-benefício é firmemente apoiada na economia do bem-estar neoclássica, principalmente no que diz respeito à observância do critério de Pareto. Inicialmente, essa análise só considerava os custos e benefícios econômicos diretos associados a uma política ou projeto. Com o tempo, passou-se a agregar também custos indiretos, incluindo-se nesses, os sociais. Mais recentemente, também passaram a fazer parte do escopo dessa análise alguns impactos e benefícios de origem ambiental (Mueller, 2007).

A experiência prática mostra que, dificilmente, intervenções em políticas podem produzir uma melhora do bem-estar social sem que haja alguma perda de utilidade percebida por alguns indivíduos. A saída dos economistas para esse impasse foi a de que, se os beneficiários de uma medida puderem compensar aqueles que

perderam com esta e, ainda assim, permanecerem em uma condição melhor do que a anterior, a mudança será avaliada como positiva (Young, 1996).

Todavia, a afirmação de que um projeto, após ter sido avaliado como viável pelo emprego da análise custo-benefício, sempre levaria a um aumento do bem-estar social, apresenta algumas ressalvas quanto à sua validade. Mueller (2007) expõe que são extremos os pressupostos básicos requeridos para que essa conclusão seja aceita indiscriminadamente. Uma dessas prerrogativas é a de que a utilidade marginal do consumo seja igual para todos os indivíduos. Ademais, a teoria do equilíbrio geral mostra que, em casos de distribuição de renda muito desigual, podem ocorrer, por exemplo, ganhos maiores para os indivíduos mais abastados na distribuição de renda da economia.

Essa mesma ressalva é discutida por Griffin (1998). Esse autor comenta que, inevitavelmente, haverá experiências de perda por alguns indivíduos quando da implantação de um projeto qualquer. Sob o ponto de vista geral da sociedade, o saldo da análise de custo-benefício pode ser positivo, mas, entretanto, deve-se ter o cuidado para que as inevitáveis perdas inerentes a cada projeto não recaiam majoritariamente sobre aquelas pessoas que já se encontram em circunstâncias desfavoráveis como, por exemplo, a população de baixa renda.

Nesse sentido, enquanto a estimativa dos custos para um projeto - por meio da tomada de preços dos insumos existentes no mercado privado -, pode servir como bom indicador do real valor incorrido pela sociedade com a implantação desse novo projeto, deve-se ter sempre em mente que a estimativa desses valores deve ser

pautada pelos custos de oportunidade sociais, os quais, nem sempre, coincidem com os preços vigentes de mercado (Griffin, 1998).

Como exemplo, o referido autor cita o caso de uma região que enfrenta elevada taxa de desemprego. Nessas circunstâncias, o custo de oportunidade social de se contratarem trabalhadores dessa localidade é provavelmente baixo, uma vez que os mesmos permaneceriam desempregados, caso não houvesse ali, a perspectiva de um novo projeto sendo implantado. Com efeito, os salários recebidos por esses trabalhadores superariam os seus respectivos custos de oportunidade, resultando em um saldo positivo para o balanço de custos e benefícios envolvidos nesse caso em particular.

Outro viés da tomada de preços de bens e serviços em mercados reais diz respeito ao conceito de preços-sombra (do inglês, *shadow prices*). De acordo com Mueller (2007), a estimativa de preços sombra é recomendada sempre que os preços de mercado dos fatores, insumos ou produtos, apresentem-se distorcidos, seja pelo funcionamento de mercados imperfeitos, seja por intervenções governamentais ou por presença de externalidades.

Segundo Young (1996), independentemente da fonte, os preços utilizados na análise custo-benefício são interpretados como sendo a disposição a pagar por um bem ou serviço por consumidores individuais, produtores ou unidades do governo. Ademais, para bens ou serviços para os quais não há um mercado de preços bem definidos, a medida da disposição a pagar consiste na base teórica na qual os preços-sombra são calculados.

Recentemente, a necessidade de incluir a dimensão ambiental de forma mais abrangente na avaliação de projetos levou a análise de custo-benefício a considerar o valor econômico total, o qual engloba, a despeito dos impactos diretos e indiretos, a estimativa do benefício líquido da preservação. Esse benefício inclui três categorias de valores: (i) V_u (valor de uso) que corresponde ao benefício que os usuários estimam usufruir do uso direto do recurso ambiental; (ii) V_o (valor de opção) que trata da utilidade líquida auferida pelos indivíduos que, em um dado momento, não estão usufruindo desse, mas que podem fazê-lo no futuro; e (iii) V_e (valor de existência) que é o montante atribuído pela sociedade à mera existência do meio ambiente preservado, ou seja, está associado à manutenção do recurso ambiental intocado.

Supondo que seja viável estimar essas três categorias de valores de preservação, o benefício da preservação (B_p) compreenderia a soma desses três valores mencionados. Ou seja:

$$B_p = V_u + V_o + V_e \quad (2.1)$$

2.3 MÉTODOS DE VALORAÇÃO DA ÁGUA

A avaliação do valor dos custos e benefícios, em termos monetários, aplicada à análise de custo-benefício, pode ser contextualizada em três diferentes tipos. O primeiro deles refere-se à hipótese de haver um mercado bem estabelecido para a tomada de preços (Young, 1996). Essa assertiva requer os pressupostos teóricos do

funcionamento de mercados perfeitos, hipóteses essas já exploradas em seção anterior (item 2.1).

O segundo tipo previsto de realidade econômica é aquela em que há existência de um mercado, mas que, no entanto, este é tido como imperfeito, ou seja, não há condições plenas de competição e, por conseguinte, os preços não refletem a real disposição a pagar dos seus constituintes. No outro extremo, podem-se ter casos em que não haja qualquer mercado para valoração de insumos ou rendas, como ocorre em exemplos práticos de estimativas dos benefícios da preservação ambiental, de recreação, ou danos decorrentes da degradação da qualidade da água. Esses dois últimos tipos – mercados imperfeitos e ausência completa de mercado - são os mais presentes em projetos de valoração no contexto do planejamento em recursos hídricos. Como já discutido anteriormente, àqueles preços cujo mercado não reflète a internalização completa de seus custos dá-se o nome de preços-sombra (Young, 1996).

Segundo a classificação adotada por Mueller (2007), as técnicas de valoração econômica de benefícios e custos ambientais podem ser agrupadas nas seguintes categorias: (i) técnicas que se valem diretamente de preços e valores de mercado, ou que se apóiam nas mudanças de produtividade causadas pela alteração ambiental; (ii) métodos de mercados substitutos (métodos indiretos de valoração); e (iii) valoração direta por métodos de mercados construídos.

Pelo fato de um método em especial – metodologia da função de produção - ser o que terá maior importância neste trabalho, optou-se por fazer sua descrição de forma mais ampla no próximo item que se segue.

2.3.1 Valoração Direta por Meio de Mudanças de Produtividade

Esse conjunto de técnicas tem como prerrogativa principal o fato de a água constituir-se em insumo intermediário do processo de produção o que, por sua vez, relaciona-se com a premissa de que o seu uso se faz necessário em etapas anteriores à consecução do produto final. Segundo Young (1996), enquadram-se nesses casos os usos mais expressivos dos recursos hídricos, entre eles, a irrigação de culturas agrícolas, o uso em processos industriais e a geração de energia elétrica.

Essa temática de valoração da água, considerando-a como um bem intermediário da etapa produtiva, é baseada na teoria do produtor. A sua construção analítica pressupõe o uso de uma função Z , tal que o nível de produção seja dado pela seguinte função:

$$Z = f(X_i, X_w) \quad (2.2)$$

em que X_i corresponde ao vetor de insumos necessários à produção de um bem qualquer e X_w é a quantidade de água requerida nesse processo.

Sendo p_z o preço do produto $Z = f(X_i, X_w)$, p_{x_i} e p_{x_w} os preços dos i insumos e o da água, respectivamente, a função lucro π pode ser expressa pela seguinte relação:

$$\pi = p_z \times Z - \sum_{i \neq w} p_{x_i} \times X_i - p_{x_w} \times X_w \quad (2.3)$$

A teoria da produção mostra que o produtor ajusta o seu grau de utilização de cada insumo ao objetivo de maximizar o seu lucro, de forma que o valor da produtividade marginal de cada recurso se iguale ao seu preço⁴. Assumindo-se também a hipótese de que os preços se mantêm constantes (a variação marginal de Z é suficientemente pequena em relação ao mercado do produto Z), então a maximização do lucro em relação a uma variação dos insumos pode ser expressa como:

$$\frac{\partial \pi}{\partial X_i} = p_z \times \frac{\partial Z}{\partial X_i} - p_{x_i} = 0 \quad (2.4)$$

Manipulação algébrica simples da Equação 2.4 leva à constatação de que o valor do produto marginal de cada insumo (VPM_i) é dado pelo seu respectivo produto marginal (Pmg_i) valorado pelo preço do bem produzido (Equação 2.5). Chama-se atenção ao fato de que o mesmo resultado seria obtido, caso a derivação tivesse sido feita para o insumo água.

$$VPM_i = p_z \times Pmg_i \quad (2.5)$$

⁴ Hipótese teórica válida para o equilíbrio geral em mercados perfeitos (Young, 1996).

Um segundo postulado econômico – válido para as condições de perfeita concorrência - enuncia que o valor total de um produto pode ser dividido segundo parcelas em que cada insumo é pago de acordo com a sua respectiva produtividade marginal. Assumindo as hipóteses estabelecidas nessa afirmativa como factíveis, estabelece-se, então, a seguinte equação:

$$VTP_z = \sum_{i \neq w} VPM_i \times X_i + VPM_w \times X_w \quad (2.6)$$

O valor da produtividade marginal da água (preço por unidade de volume) pode ser isolada na Equação 2.6 de modo a se obter uma expressão para o valor da água, como um insumo do processo produtivo:

$$P_w = \frac{\left[(Z \times P_z) - \left(\sum_{i \neq w} P_{x_i} \times X_i \right) \right]}{X_w} \quad (2.7)$$

A formulação apresentada na Equação 2.7 recebe a denominação de *método do valor residual* ou *método da função de produção*. A utilização mais geral desse método, envolvendo a produção de múltiplos produtos e vários insumos, é conhecida como *método da variação da renda líquida*.

Young (1996) apresenta duas ressalvas quanto à utilização da formulação ora descrita. A primeira delas remete à dificuldade de se identificar e contabilizar a produtividade de todos os insumos que têm participação relevante no processo produtivo. Se houver omissão de um ou mais fatores, a produtividade do fator

omitido será conseqüentemente atribuída ao valor do insumo objeto da análise, ou seja, haverá uma superestimativa para o valor da água. A segunda questão trata da dificuldade em se estabelecerem as características da função de produção, uma vez que a mesma requer estimativas precisas sobre os níveis de produção associados a cada um dos fatores nela envolvidos. Também, nesse caso, está-se sujeito a ter super ou subestimativas do valor residual dependendo da acurácia com que se mede o nível de produção para cada combinação inicial de insumos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MODELOS E TÉCNICAS PARA REPRESENTAÇÃO DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

O uso de técnicas e modelos para a representação de sistemas de recursos hídricos passou por um grande avanço conceitual e tecnológico, impulsionado pela significativa melhora da capacidade de processamento computacional ao longo das últimas décadas. Ademais, tal desenvolvimento também se fez necessário em face da crescente complexidade dos problemas envolvendo o planejamento e a gestão de recursos hídricos.

A escolha da melhor técnica ou modelo é feita conforme as características do sistema hídrico em questão e, nesse sentido, fatores como a disponibilidade de dados, os objetivos e o número de restrições específicas, desempenham um papel fundamental em todo esse processo. Yeh (1985) apresenta uma classificação para as principais técnicas usadas na área de recursos hídricos: (i) métodos de simulação; (ii) programação linear; (iii) programação dinâmica; e (iv) programação não-linear. A tipologia mais recente adotada por Labadie (2004) ainda inclui a essa lista a (v) análise multiobjetivo e (vi) os modelos de programação heurística. Não obstante, encontram-se, ainda, várias referências na literatura de metodologias que utilizam diversas combinações dentre os grupos de técnicas citadas (Yeh, 1985; Labadie, 2004).

3.2 O MODELO MODSIM

O MODSIM é um modelo de rede de fluxo de caráter geral e com amplo espectro de aplicações em recursos hídricos. O modelo é capaz de gerar planos operacionais a fim de satisfazer metas, prioridades e limitações específicas. Uma de suas características, que interessa diretamente à finalidade deste trabalho, refere-se à avaliação de compensações (*trade-offs*) entre usos conflitantes da água. Esse programa realiza uma otimização em rede para atender metas operacionais realizadas de modo seqüencial a cada intervalo de tempo.

O modelo pode ser visto como uma abordagem pertencente à classe de metodologias de simulação, que também contém uma rotina de otimização para escolha da melhor solução. Trata-se, essencialmente, de um algoritmo de programação linear, denominado *out-of-kilter*, desenvolvido especificamente para a solução eficiente de problemas de minimização de custo em redes de fluxo (Azevedo *et al.*, 2002).

O algoritmo *out-of-kilter* resolve um problema de otimização em uma rede de fluxo, para cada intervalo de tempo $t = 1, \dots, T$, da seguinte maneira (Azevedo *et al.*, 2002):

$$\text{Min} \sum_{K \in A} c_k q_k \quad (3.1)$$

Sujeito a

$$\sum_{k \in O_i} q_k - \sum_{j \in I_i} q_j = b_u(q) \quad \forall i \in N \quad (3.2)$$

$$l_{kt}(q) \leq q_k \leq u_{kt}(q) \quad \forall k \in A \quad (3.3)$$

onde A representa o conjunto de todos os arcos do problema; N é o conjunto de todos os nós; O_i o conjunto de todos os arcos com origem no nó i (arcos de defluências); I_i o conjunto de todos os arcos com término no nó i (arcos de afluências); b_{it} representa o ganho (positivo) ou a perda (negativo) do nó i no tempo t ; q_k é vazão no arco k ; c_k representa o custo, fator de ponderação ou prioridades de uso por unidade de vazão no arco k ; l_{kt} e u_{kt} são, respectivamente, as capacidades mínima e máxima de vazão no arco k , no instante de tempo t .

Na Figura 3.1, dispõe-se um exemplo de arquitetura de rede de fluxo feita no MODSIM.

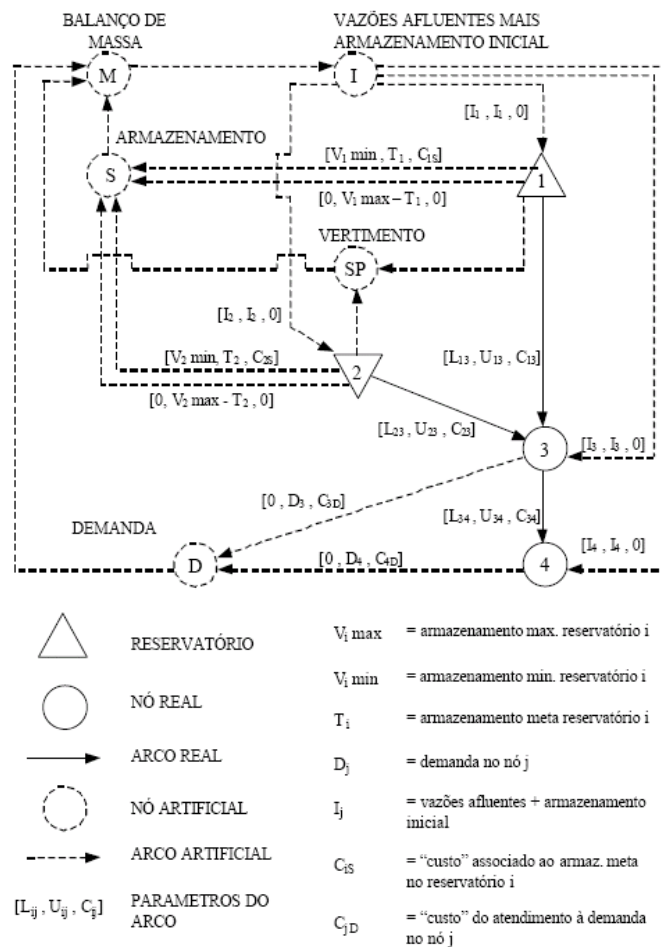


Figura 3.1 - Rede de Fluxo no MODISM (adaptado de Graham *et al.*, 1986)

3.3 O MODELO NEWAVE

O atual modelo de regulação do setor elétrico brasileiro determina que um agente – o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) – administre a geração de energia de cada usina que compõe o chamado Sistema Interligado Nacional (SIN). O SIN representa o sistema de produção e transmissão de energia elétrica no Brasil, com forte predominância de usinas hidrelétricas, composto por múltiplos agentes e empresas do setor público e privado, presentes nas cinco grandes regiões do país⁵.

A busca por eficiência na operação de um sistema do porte do SIN, com um grande número de usinas localizadas em diversas bacias hidrográficas do país, faz com que haja uma interdependência operativa entre todas as fontes de produção de energia. Com efeito, a operação de uma usina hidrelétrica, localizada em cascata, em uma bacia hidrográfica onde haja mais usinas presentes, depende da regra operativa atribuída à usina de montante, ao mesmo tempo em que sua operação afeta, de maneira análoga, as usinas localizadas a jusante.

O ONS centraliza o despacho ótimo de geração⁶ de cada usina utilizando, como ferramenta de auxílio à tomada de decisão, um modelo de otimização chamado NEWAVE (Modelo Estratégico de Geração Hidrotérmica a Subsistemas

⁵ Apenas 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do país encontra-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados, localizados, principalmente, na região amazônica (ONS, 2008a).

⁶ Resultado da aplicação de um conceito centralizado de despacho que visa a maximizar a utilização intertemporal da energia acumulada nos reservatórios das usinas hidrelétricas, minimizando o vertimento de água ou, de modo equivalente, minimiza o custo de operação das usinas, internalizando o risco hidrológico.

Interligados). Tal otimização é função do custo unitário do déficit de energia, do custo operativo das termelétricas disponíveis, das informações sobre a disponibilidade hídrica atual (volume acumulado nos reservatórios) e das afluições e demandas previstas futuramente (Moreira *et al.*, 2003).

Os principais desafios impostos à operação de sistemas hidrotérmicos são a aleatoriedade natural do fenômeno hidrológico e o limite físico da capacidade de armazenamento dos reservatórios. Por exemplo, se toda energia de origem hidráulica estocada em um reservatório é utilizada no presente, e, no futuro, ocorrer um período de estiagem, então será necessário dispor de energia térmica – que é mais cara -, ou, ainda, dependendo da intensidade desse evento, limitar o fornecimento de energia. Por outro lado, se o nível dos reservatórios é mantido constante no estágio atual, e, por conseguinte, há uso mais expressivo de usinas térmicas, na hipótese de ocorrer um evento futuro de cheia, provavelmente ocorrerá vertimento de água nos reservatórios, o que acarretará em desperdício de recurso energético (Pereira *et al.*, 1998).

Essa relação evidencia a importância que uma decisão tomada no presente tem sobre as condições operativas futuras e está diretamente relacionada com o custo da energia gerada ao longo do tempo. A questão de usar a água hoje, ou estocá-la para o futuro, implica em um *trade-off* entre os custos imediato e futuro de operação do sistema. Tal relação é ilustrada na Figura 3.1.

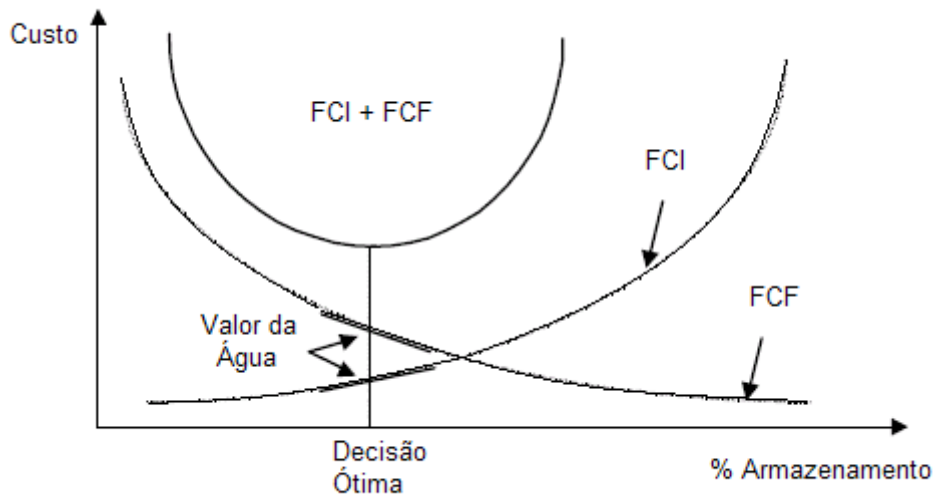


Figura 3.1 - Decisão Ótima de Operação de Sistemas Hidrotérmicos

O ponto ótimo de utilização da água estocada nos reservatórios corresponde àquele que minimiza o somatório das funções de custo imediato (*FCI*) e futuro da operação (*FCF*). Matematicamente, esse ponto representa a igualdade entre as derivadas dessas duas funções com respeito à quantidade de água armazenada. A essas derivadas dá-se o nome de *valor da água* (veja Figura 3.1).

O objetivo da operação é, portanto, minimizar o somatório dos custos imediatos e futuros. Essa soma compõe a função-objetivo desse problema, o qual também está sujeito a cinco restrições principais (Pereira e Pinto, 1985; Pereira, 1989)⁷:

$$F_t(s_t, q_{t-1}) = E_{q_t | q_{t-1}} \left\{ \underset{r_t}{\text{Min}} [f_t(s_t, q_t, r_t) + F_{t+1}(s_{t+1}, q_t)] \right\} \quad (3.4)$$

⁷ A resolução das equações de 3.4 a 3.9 é feita por meio do emprego da metodologia da *programação dinâmica dual estocástica*. Maiores detalhes podem ser consultados em Pereira e Pinto (1985) e Pereira (1989).

Sujeito a

$$s_{t+1} = s_t + q_t + C(r_t + l_t) - e_t(s_t) - d_t \quad (3.5)$$

$$s_{t+1, \min} \leq s_{t+1} \leq s_{t+1, \max} \quad (3.6)$$

$$r_{t, \min} \leq r_t \leq r_{t, \max} \quad (3.7)$$

$$g_{t, \min} \leq g_t \leq g_{t, \max} \quad (3.8)$$

$$\sum_k^{I+J} g_t(k) + y_t = d_t \quad \forall k \in (1, \dots, I+J) \quad (3.9)$$

onde $f_t(s_t, q_t, r_t)$ é a função de custo imediato e $F_{t+1}(s_{t+1}, q_t)$ a de custo futuro; s_t representa o volume armazenado no início da análise; E é o valor esperado para a afluência q_t , dado que se dispõe do valor observado no passo de tempo anterior q_{t-1} ; l_t compõe o vetor de vertimentos de cada usina hidrelétrica; C é a matriz de conectividade (em que $C_{j,k} = 1(-1)$ quando o reservatório j recebe (libera) água de (para) o reservatório k); e_t é o vetor de perdas por evaporação; d_t representa as demandas requeridas ao sistema; $s_{t+1, \min}$ e $s_{t+1, \max}$ são os vetores de armazenamento mínimo e máximo respectivamente; $r_{t, \min}$ e $r_{t, \max}$ correspondem aos vetores de capacidade mínima e máxima de engolimento das turbinas respectivamente; r_t é o vetor de vazão turbinada em cada usina; $g_t(k)$ indica a energia gerada na k -ésima unidade de produção (térmica ou hidráulica); I e J são, respectivamente, o número total de térmicas e hidrelétricas existentes; e y_t representa o vetor que contabiliza o déficit de energia.

A operação hidrotérmica do sistema brasileiro, da forma como foi exposta, maximiza a utilização intertemporal da energia acumulada nos reservatórios das usinas

hidrelétricas, ou, de maneira equivalente, minimiza o custo de operação das usinas, internalizando o risco hidrológico. Moreira *et al.* (2003) comentam que, além do despacho-ótimo de cada usina, o modelo vigente calcula o *Custo Marginal de Operação* (CMO), que é o preço da energia no mercado à vista (também chamado preço *spot*). Esse preço reflete as condições de escassez de curto prazo de energia nos reservatórios. Dessa forma, pretende-se utilizá-lo, neste trabalho, como a estimativa do valor econômico da água para o uso na geração de energia elétrica⁸.

⁸ Ressalta-se que há externalidades de ordem econômica e ambiental não embutidas nesse preço. Para se avaliar o real valor econômico da água seria necessário incluir o custo gerado para outras atividades econômicas e para a sociedade em decorrência da alocação do recurso hídrico para a produção de energia. Sobre externalidades de cunho ambiental, vide o disposto no Item 2.2 do presente documento.

4. CASO DE ESTUDO: BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PRETO (DF/GO/MG)

Neste item, pretende-se discorrer sobre algumas características da região escolhida para avaliação da metodologia proposta neste trabalho, a bacia hidrográfica do rio Preto. As informações aqui apresentadas, em sua maior parte, foram extraídas do trabalho de consultoria técnica prestado à Secretaria de Infra-Estrutura e Obras do Distrito Federal - SEINFRA, pelo consórcio firmado entre as empresas GOLDER/FAHMA, o qual resultou na elaboração do Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal – PGIRH/DF.

O rio Preto nasce próximo à cidade de Formosa, no Estado de Goiás, e constitui a divisa leste entre o Distrito Federal e o Estado de Goiás. Esse rio é afluente do rio Paracatu e compõe uma das sub-bacias da região hidrográfica do rio São Francisco. Desde a nascente até a foz, são cerca de 400 km de extensão. (SEINFRA, 2006).

Na Figura 4.1, mostra-se a divisão política da bacia do rio Preto, notadamente, as parcelas territoriais referentes às três unidades da Federação que compõem a totalidade de sua área de drenagem. O Estado que detém a maior área é o de Minas Gerais. De acordo com Cordeiro Netto *et al.* (2000), a maior parte do uso de água com fins de exploração econômica ocorre na porção da bacia pertencente ao Distrito Federal. A área correspondente ao território goiano é praticamente toda destinada a treinamentos ministrados pelo Exército brasileiro.

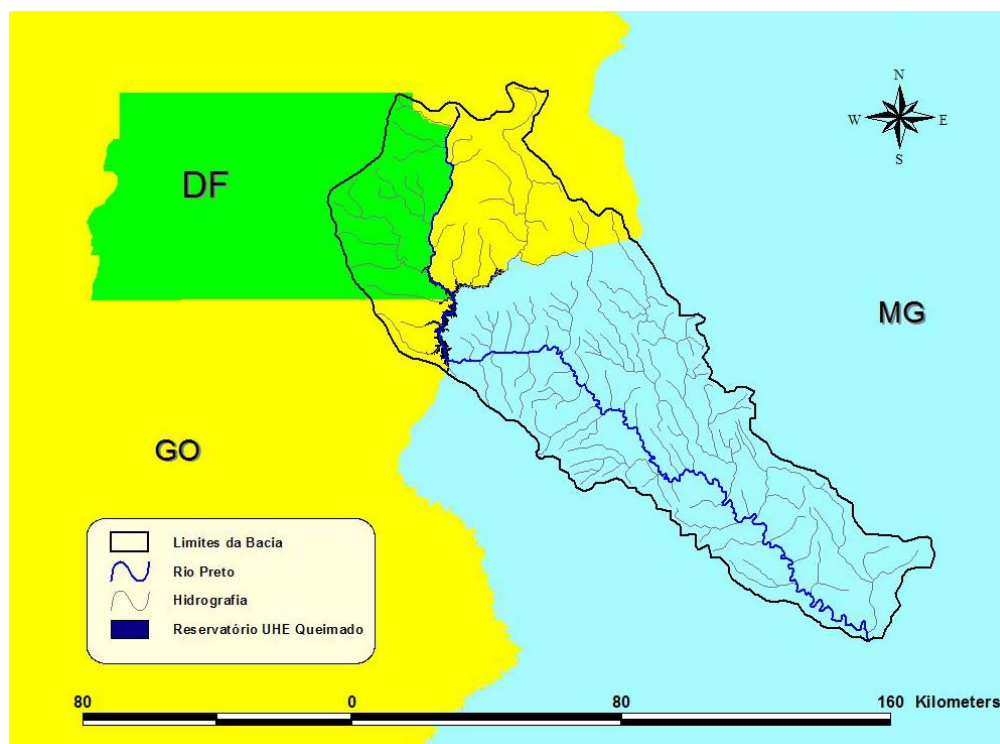


Figura 4.1 – Mapa Hidrográfico-Político da Bacia do Rio Preto

A atividade antrópica na região é basicamente de natureza agrícola, sendo que essa se constitui na principal demanda hídrica da região. Conflitos pontuais entre agricultores irrigantes são registrados, especialmente no período de estiagem e na região mais a montante da bacia, onde há uso expressivo de pivôs-centrais, os quais reduzem consideravelmente a disponibilidade de água.

Diagnóstico feito no âmbito do plano de bacia do rio São Francisco (PBHSF, 2004) avalia a região de cabeceira do rio Preto – denominada de “Alto Preto” – como uma das que têm maior potencial de conflito pelo uso da água em toda a região hidrográfica do São Francisco, notadamente entre os agricultores irrigantes. Conforme ilustrado na Figura 4.2, a região do alto Preto - cuja extensão contempla toda a sua porção pertencente ao Distrito Federal -, apresenta conflito destacado, de grande relevância sob o ponto de vista da gestão de recursos hídricos.

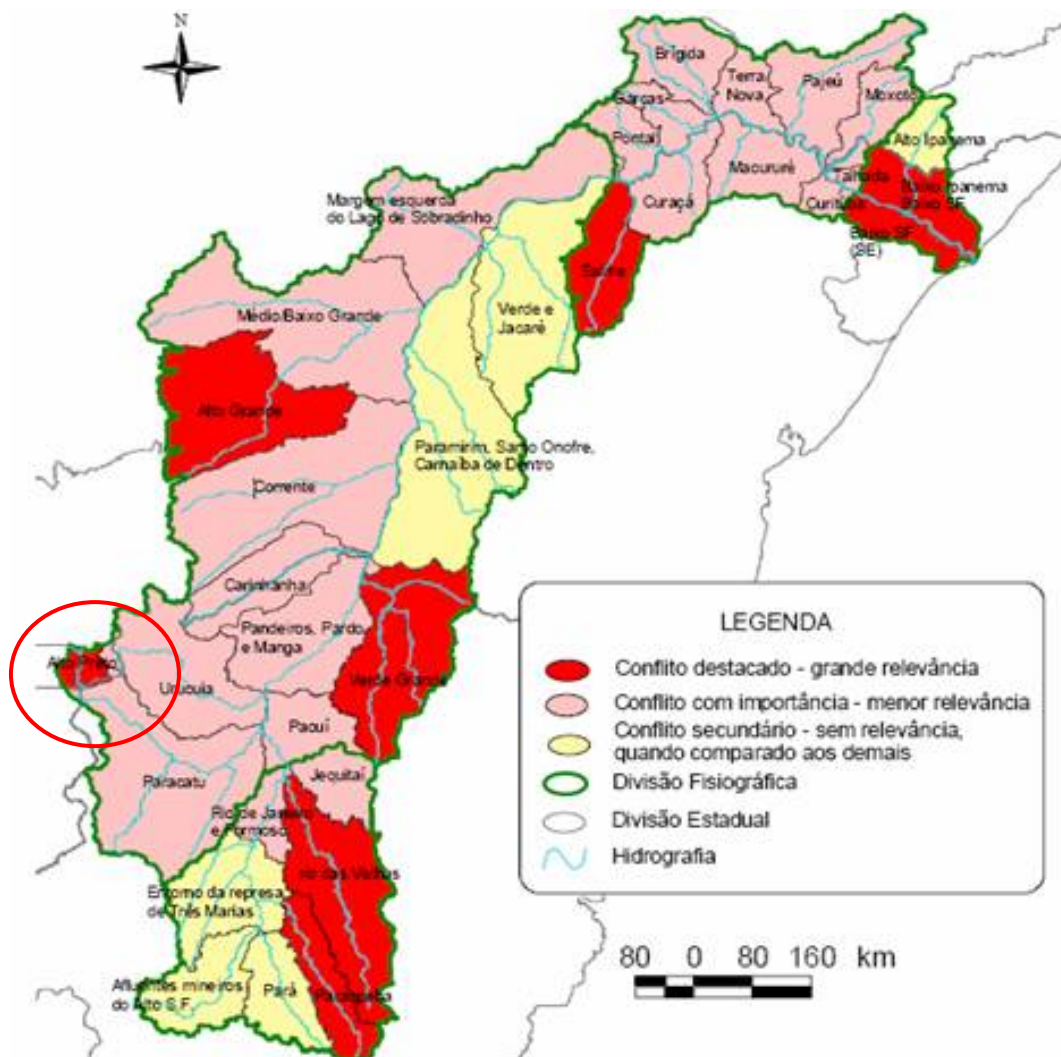


Figura 4.2 – Conflito pelo uso de recursos hídricos na bacia do São Francisco (PBHSF, 2004)

A demanda hídrica da bacia do rio Preto apresenta ainda um importante uso da água, a geração de energia elétrica pela usina hidrelétrica (UHE) de Queimado – operada em conjunto pelo consórcio constituído pelas Companhias Elétrica de Brasília (CEB) e Energética de Minas Gerais (CEMIG) - e cujo reservatório pode ter a operação comprometida pela intensiva captação de recursos hídricos a montante. A potência instalada da UHE Queimado é de 105 MW. O seu barramento possui uma área de drenagem total de 3773 km², compreendendo parcelas territoriais nos Estados de Minas Gerais, Goiás e no Distrito Federal. A vazão média de longo período – série histórica de 1931 a 1996 – é de 52,4 m³/s, o que resulta numa vazão

específica de 13,9 l/s/km². A área inundada pelo reservatório é de cerca de 40 km² (SEINFRA, 2006).

Segundo dados da mesma SEINFRA (2006), há um total de 964 captações de água em mananciais superficiais cadastradas em toda a bacia, sendo que, desse total, 923 atendem ao uso da irrigação. As retiradas de água subterrânea também apresentam relevantes pontos de captações (266), embora, sejam elas, em sua maioria, destinadas ao abastecimento doméstico (195). Na Tabela 4.1, apresentam-se as vazões demandadas segundo os respectivos usos.

Tabela 4.1 – Vazões Captadas na Bacia do Rio Preto (SEINFRA, 2006)

Uso	Vazões Captadas	
	Superficial (l/s)	Subterrânea(m ³ /h)
Abastecimento doméstico	8	1250
Irrigação	21.698	68
Dessedentação Animal	-	15
Abastecimento Múltiplo	-	636
Aqüicultura	5	-
Industrial	-	22
Outros (lazer, clubes, hotéis)	-	19
Não informado	232	-
Total	21.943	2.010

Os números apresentados na Tabela 4.1 ratificam a assertiva de que há uma forte predominância do uso da água para a irrigação agrícola. Dentre as diversas práticas cultivadas, destacam-se as do feijão, milho e trigo. Na Figura 4.3, apresenta-se um gráfico contendo os principais cultivos da região por unidade de área cultivada.

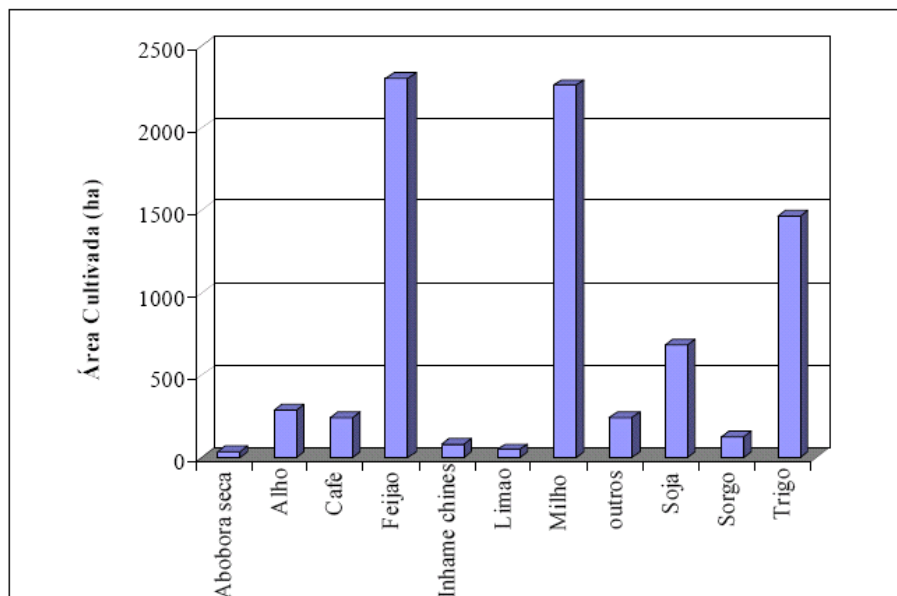


Figura 4.3 – Principais Culturas Praticadas na Bacia do Rio Preto (SEINFRA, 2006)

4.1 - METODOLOGIA

A metodologia que se propõe nesta pesquisa refere-se ao desenvolvimento de procedimento que vise a subsidiar a tomada de decisões quanto à alocação de água entre dois usos distintos - irrigação e produção de energia elétrica -, bem como servir de apoio em práticas de regulação de recursos hídricos que visem a conter uma sinalização econômica da água enquanto um insumo cujo “valor” possa ser efetivamente internalizado nas mesmas. Com efeito, em face das características expostas no item anterior, escolheu-se a bacia do rio Preto para servir como caso de estudo para a presente análise.

Em linhas gerais, o arcabouço metodológico ora proposto envolve a consecução de quatro eixos principais: (i) construção de curva de demanda econômica para a água utilizada na irrigação; (ii) construção de curva de demanda econômica para a água utilizada na produção de energia elétrica; (iii) representação, simulação e otimização

da operação do sistema hídrico objeto do estudo de alocação econômica; e (iv) conclusões sobre a metodologia proposta e avaliação dos resultados.

Para consecução do primeiro módulo, adotou-se, como metodologia para valoração econômica da água, o *método da função de produção*, descrito em maior detalhe no Item 2.3.1 desta monografia. Para tanto, fez-se necessário levantar informações sobre as principais culturas praticadas na bacia do rio Preto, em conjunto com valores médios de preços e insumos, além da realização da estimativa do consumo de água envolvido nesse processo produtivo. Não obstante, alguns procedimentos mais específicos para delimitação de áreas irrigadas e modelagem estatística da produção agrícola também foram utilizados e serão expostos em maior detalhe no decorrer do item 4.2 desta monografia.

Cabe ainda ressaltar que, em face da proposição eminentemente conceitual deste trabalho, a referida pesquisa de informações mencionada no parágrafo anterior se ateve mais à busca de informações de caráter secundário, notadamente as disponíveis em banco de dados oficiais de instituições de governo ou em trabalhos acadêmicos aplicados.

No caso da estimativa do valor da água para a produção de energia elétrica, optou-se por utilizar resultados de simulações do modelo NEWAVE. Nesse sentido, foi necessário estabelecer contato junto ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) para que resultados associados a execuções desse modelo fossem disponibilizadas. Ademais, em razão do NEWAVE ter sido concebido para a operação integrada de todo o sistema elétrico brasileiro, algumas considerações

foram feitas quando da análise de seus resultados, com intuito de que os mesmos pudessem ser compatibilizados ao caso mais específico de uma única usina hidrelétrica – a UHE Queimado.

A terceira etapa foi dedicada à análise do estudo de caso propriamente dito, por meio da representação do sistema hídrico da bacia, a qual contou com as respectivas informações sobre as demandas econômicas referentes à irrigação e à produção de energia elétrica. Essa representação foi feita em modelo matemático de rede de fluxo baseado no MODSIM, o AquaNet. Esse último modelo apresenta alguns módulos complementares de análise não contemplados na versão inicialmente descrita sobre o MODSIM (Item 3.2). Em contrapartida, ressalta-se que tais avanços não alteram a validade da breve descrição teórica feita, uma vez que a arquitetura da rede de fluxo e o algoritmo de solução dos dois modelos são exatamente os mesmos.

A quarta e última etapa foi composta pela avaliação dos resultados do procedimento sugerido para a avaliação econômica de alocação. Nesse sentido, uma avaliação global sobre a pertinência do procedimento adotado foi realizada, assim como uma análise específica envolvendo as especificidades econômicas das duas demandas de água estudadas na região do rio Preto.

Não obstante, tendo em vista as características econômicas das duas demandas envolvidas neste trabalho, houve ainda possibilidade de realizar uma análise de sensibilidade em torno de uma variação nas características das respectivas funções de demanda - irrigação e produção de energia -, tendo-se, como resultado, as

implicações que essas alterações podem ter sobre os benefícios econômicos associados às preferências de alocação da água na bacia. Ao final, relatam-se alguns desafios impostos à generalização do problema, bem como alternativas para o aprimoramento do procedimento analítico proposto. A metodologia descrita é apresentada, de forma esquemática, no fluxograma da Figura 4.4.

4.2. DEMANDA ECONÔMICA PARA A IRRIGAÇÃO

Nesta seção, buscar-se-á apresentar as etapas referentes à construção da curva de demanda de água para a irrigação na bacia do rio Preto. A finalidade de tal procedimento é avaliar o comportamento do agricultor dessa bacia, sob a ótica da teoria econômica. Em suma, pretende-se obter a renda incremental que um metro cúbico de água proporciona àqueles produtores que optam por investir na aquisição de um sistema de irrigação e incorporá-lo às suas respectivas cadeias produtivas de grãos.

4.2.1 Identificação e Delimitação dos Pivôs-Centrais

Em face da alta predominância de pivôs-centrais existentes na região do rio Preto (SEINFRA, 2006; Sano *et al.*, 2002), optou-se por identificar essas porções via imagem de satélite. O formato circular dessa tecnologia de irrigação facilita muito a contabilização das áreas destinadas à agricultura por meio do emprego de técnicas de sensoriamento remoto.

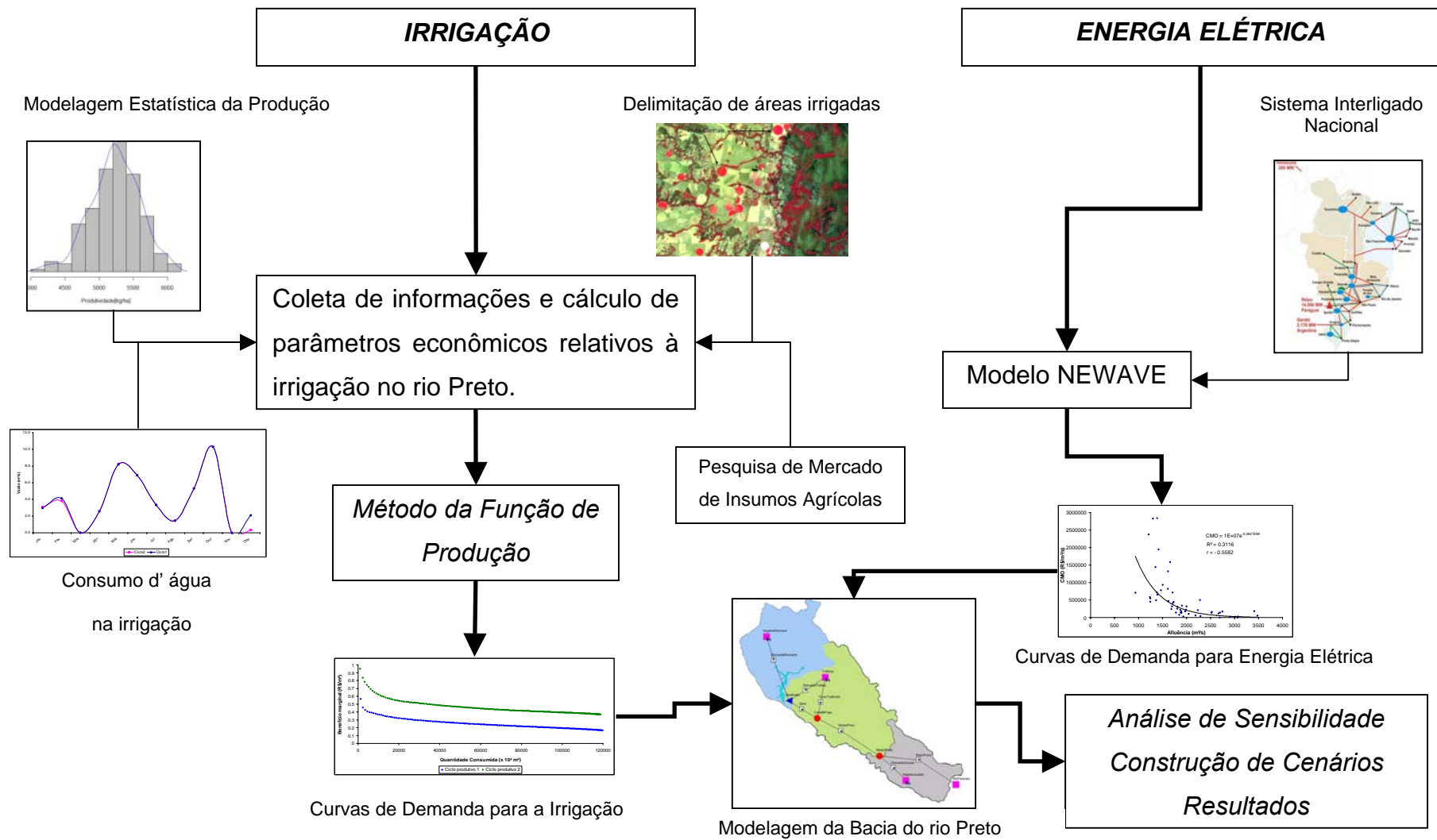


Figura 4.4 – Fluxograma da Metodologia Proposta

Devido à alta representatividade que os sistemas de pivôs têm sobre as demais práticas de irrigação nessa região, julgou-se que a identificação dessas áreas de plantio pudesse resultar numa boa representatividade do perfil do agricultor localizado na mesma e, dessa maneira, servir como informação de entrada à análise econômica do uso da água para finalidades de irrigação nessa bacia.

Imagens do satélite CBERS (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres) foram adquiridas da página na *internet* do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Na Figura 4.5 mostra-se um recorte do mosaico construído da bacia do rio Preto, no qual se podem identificar várias áreas irrigadas com pivô-central.

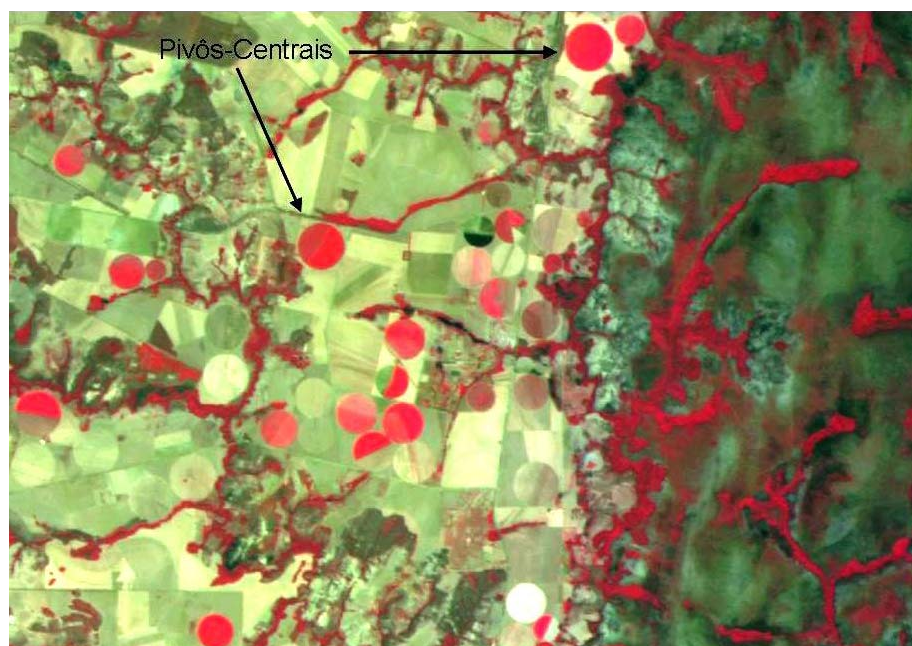


Figura 4.5 – Detalhe dos Pivôs-Centrais

Ao total, foram identificados 207 pivôs-centrais ao longo de toda a extensão da bacia, o que resultou em um montante de 17.620 hectares de terras irrigadas. Na Figura 4.6, mostra-se a disposição de todos os pivôs-centrais delimitados na bacia.

Nota-se que a maior concentração desses sistemas localiza-se na parte noroeste da bacia, em sua maior parte, dentro do território do Distrito Federal.

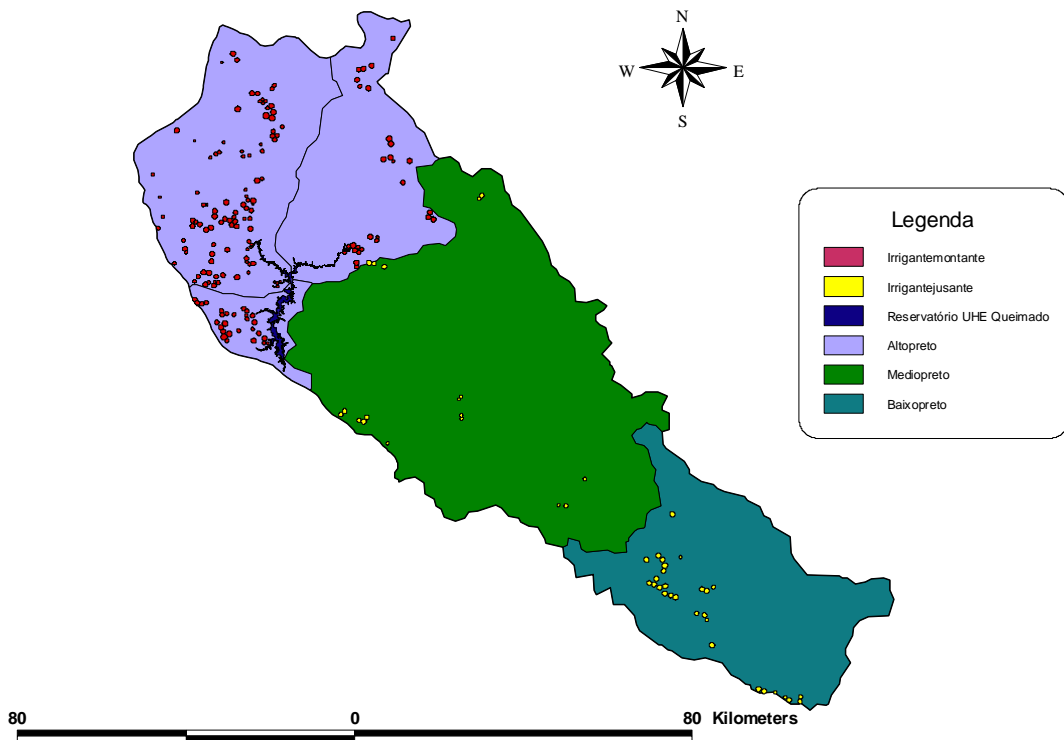


Figura 4.6 – Divisão dos Pivôs-Centrais na bacia do rio Preto

4.2.2 Informações Econômicas

Para que o benefício líquido do agricultor irrigante fosse auferido, além das informações da técnica de cultivo e da área de plantio, requereu-se que dados sobre a dinâmica produtiva da região fossem pesquisados. Nesse sentido, fez-se necessário conhecer o ciclo produtivo das principais culturas praticadas na bacia, além de informações de produtividade, preço médio de venda, custos fixos e variáveis do processo produtivo.

Em vista da complexidade de se alcançarem todas as possibilidades produtivas existentes na região de estudo, algumas simplificações foram tomadas com o objetivo de tentar explicar um comportamento médio do agricultor da bacia do rio Preto. Dessa forma, a primeira medida foi a de procurar conhecer os principais ciclos de cultivo que eram praticados na região. Contato com a Empresa de Assistência Técnica e Rural do Distrito Federal (EMATER/DF) foi estabelecido para que informações dessa natureza pudessem ser adquiridas sobre a realidade agrícola da área de estudo⁹.

Com efeito, na Figura 4.7, os principais ciclos produtivos realizados na bacia do rio Preto estão dispostos de forma esquemática.

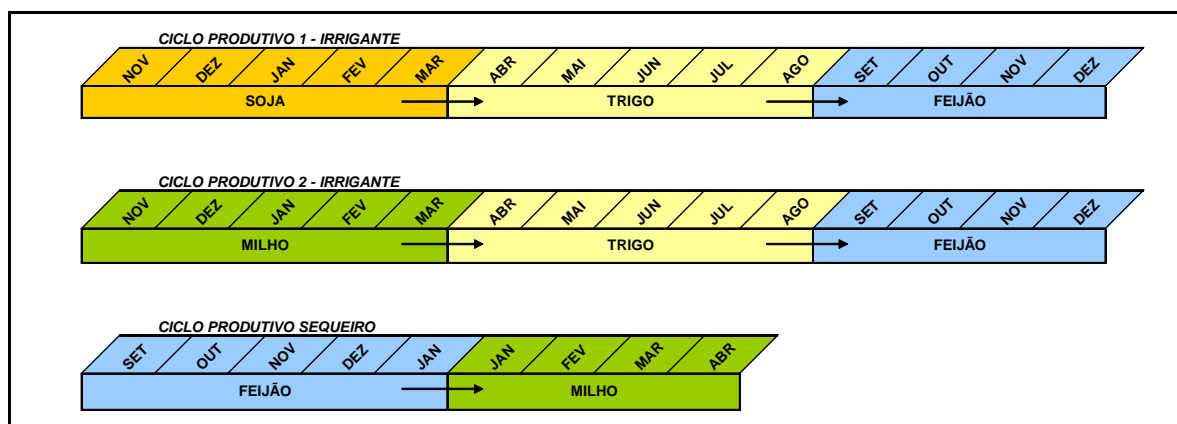


Figura 4.7 – Calendário Produtivo de Grãos

4.2.3 Produtividade Agrícola

⁹ Acredita-se que a busca por um perfil médio, que seja representativo da dinâmica produtiva da região, esteja condizente com os objetivos propostos no início deste trabalho, e esteja respaldado na grande relevância que os sistemas de agricultura irrigada por pivô-central detêm sobre a produção agrícola dessa região.

Um parâmetro importante da análise econômica, quando se pretende estudar a renda percebida pelo agricultor, diz respeito à produtividade agrícola de suas respectivas colheitas. No caso deste trabalho, julgou-se importante coletar valores médios de produtividade para cada tipo de cultivo e, depois, assumir uma distribuição de probabilidade como representativa dos valores obtidos pelos agricultores em toda a bacia do rio Preto.

Na pesquisa de valores médios de produtividade dos grãos, procurou-se consultar fontes cujos dados fossem os mais próximos da realidade observada nessa região e que, não obstante, estivessem condizentes com o atual estágio de desenvolvimento tecnológico existente na mesma. Dessa forma, as principais fontes de consulta foram a EMATER/DF e a EMBRAPA CERRADOS.

Na Tabela 4.2 a seguir, dispõe-se um resumo dos valores médios de produtividade empregados para os quatro tipos de culturas avaliadas nesta monografia, conforme o modo de produção, sequeiro ou irrigado.

Tabela 4.2 – Produtividade Média das Principais Culturas (Kg/ha)¹⁰

Soja¹		Trigo²		Feijão³		Milho⁴	
Sequeiro	Irrigado	Sequeiro	Irrigado	Sequeiro	Irrigado	Sequeiro	Irrigado
-	3.300	-	5.216	2.700	3.000	6.000	10.250

¹⁰ Não se incluíram valores de produtividade média para culturas em sequeiro de soja e trigo pela razão de tais práticas não serem contempladas no calendário produtivo proposto (vide Figura 4.7). As fontes consultadas para a obtenção de tais informações foram: Guerra *et al.* (2005), Guerra e Jacomazzi (2001b), Azevedo *et al.* (2001) e EMATER (2008).

Além da produtividade média, requereu-se ainda que fossem auferidos valores para o desvio-padrão da produtividade média de cada cultura. Como, até então, dispunha-se apenas de um valor médio de produtividade para cada cultura (Tabela 4.2), a solução adotada para a estimativa do desvio-padrão, referente à produtividade de cada cultura, foi a de levantar, junto ao banco de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE –, dados recentes de produtividade agrícola dos municípios integrantes da bacia e, a partir dessas informações, efetuar o cálculo do desvio¹¹. Mostram-se, na Tabela 4.3, os dados de produtividade agrícola dos municípios que compõem a bacia do rio Preto, relativos ao ano de 2007 (IBGE, 2007).

Tabela 4.3 – Produtividade Agrícola dos Municípios (Kg/ha) (IBGE, 2007)

Cultura	DF	Goiás					Minas Gerais					Desvio Padrão
	Brasília	Formosa	Cabeceiras	Cristalina	Cabeceira Grande	Unai	Natalândia	Bonfinópolis	Dom Bosco	Brasilândia		
soja	2712	3000	3000	2400	2700	2400	-	2400	1900	-	366,9	
trigo	5242	-	-	4800	-	4500	-	-	-	-	373,9	
feijão	2446	1676	2192	2118	2569	2429	1389	2400	-	-	415,8	
milho	6393	6000	6714	6457	5932	5373	3000	4000	3200	4800	1.371,9	

¹¹ Frisa-se que a abordagem ora proposta comete uma simplificação conceitual importante quando utiliza dados da média amostral (EMBRAPA) e desvio-padrão (IBGE) de bases amostrais distintas. O ideal teria sido levantar, junto à bacia do rio Preto, dados de produtividade agrícola entre os agricultores, para que então fossem inferidos valores mais fidedignos para a média e desvio-padrão amostrais, associados à produtividade agrícola daquela região. Como referência de trabalhos sobre modelagem estatística da produtividade agrícola, recomenda-se consulta aos trabalhos de Just e Weninger (1999) e Ker e Coble (2003).

A divisão territorial dos municípios da bacia pode ser conferida na Figura 4.8. Ressalta-se que, em razão de não se dispor de amostras distintas para as duas modalidades produtivas - sequeiro e irrigado -, adotou-se o mesmo valor de desvio-padrão para ambas as práticas, quando as mesmas tratavam do mesmo grão¹².

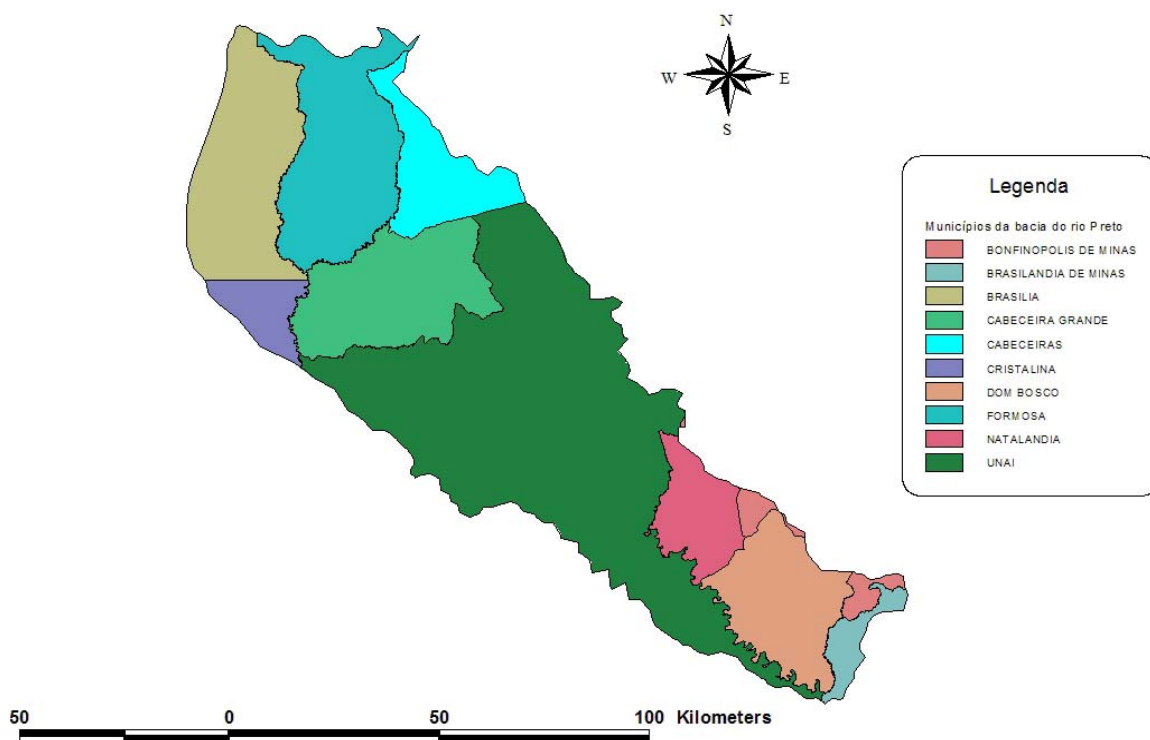


Figura 4.8 - Municípios Componentes da Bacia do Rio Preto

Além dos valores médios de produtividade e desvio-padrão para cada cultivo, foi necessário caracterizar a produção agrícola de toda bacia do rio Preto, considerando-se fatores intervenientes ao processo produtivo de cada agricultor, tais como a maior ou menor propensão ao risco, a variabilidade econômica de cada

¹² Os dados do IBGE agregam toda a produção de uma determinada cultura e dividem esse valor pela respectiva área cultivada. Não há, portanto, diferenciação entre diferentes modos de produção quando se contabiliza a produtividade agrícola de um município.

unidade produtora, bem como aspectos relacionados aos processos físicos e biológicos inerentes a qualquer atividade de produção agrícola.

Nesse sentido, optou-se pela adoção do modelo gaussiano (Just e Weninger, 1999; Ker e Coble, 2003) como uma representação adequada da diversidade da produtividade agrícola na bacia do rio Preto. Na Figura 4.9, dispõem-se os resultados obtidos para a modalidade de sequeiro.

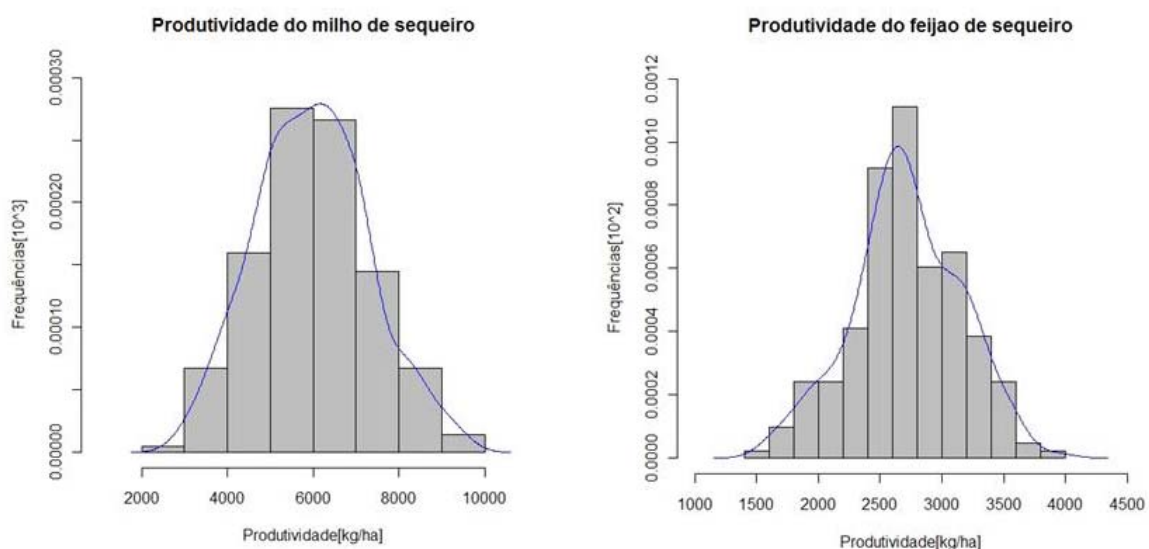


Figura 4.9 – Variabilidade da Produtividade das Culturas de Sequeiro

4.2.4 Preços de Mercado dos Produtos Agrícolas

Como requisito para a contabilização da renda bruta recebida pelo agricultor, além do parâmetro produtividade, necessita-se de que os preços de mercado dos grãos produzidos também sejam avaliados. Nos casos do trigo e do feijão, por serem cultivos cuja produção é notadamente maior em outras regiões do país e, por conseguinte, não haver indicadores em Estados mais próximos à região de interesse, teve-se de recorrer a preços em unidades da Federação mais distantes,

quais sejam, Paraná e Bahia, respectivamente. Mostram-se, na Tabela 4.4, os dados utilizados e a média de preços de mercado dos grãos na bacia do rio Preto.

Tabela 4.4 – Preço Médio para as Culturas (R\$/Kg) (CONAB, 2008)

Cultura	Referência	2007		2008				Média
	UF	MAI	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	
Soja	Goiás	0,44	0,70	0,71	0,71	0,65	0,66	0,64
Trigo	Paraná	0,43	0,56	0,58	0,64	0,69	0,69	0,60
Feijão	Bahia	0,70	1,93	1,98	2,08	1,77	1,17	1,60
Milho	Goiás	0,24	0,43	0,35	0,35	0,34	0,34	0,34

4.2.5 Custos de Produção

Os custos de produção devem ser diferenciados em termos da cultura e da modalidade de produção. Nesse sentido, adotaram-se planilhas de custos disponibilizadas no sítio da EMATER/DF (vide EMATER, 2008), as quais foram avaliadas como boas referências para a região. Em relação ao trigo, entretanto, utilizaram-se dados da CONAB (2008) para o Estado do Paraná, por não haver informações similares no sítio supracitado.

Aos custos da modalidade irrigada, restou ainda incluir a depreciação do pivô-central. Para tanto, pesquisaram-se, junto a revendedores desses equipamentos no Distrito Federal, preços praticados na venda do pivô, oportunidade na qual se obteve um valor de referência em torno de R\$ 4.000 por hectare irrigado. Adotando-se uma taxa de juros de 12% ao ano, uma vida útil de 15 anos e um valor residual de 20% em relação ao custo inicial de aquisição, chega-se a uma taxa anual de depreciação para o pivô de R\$ 565,84 por hectare irrigado.

Em consonância com o calendário produtivo da Figura 4.7, a taxa de depreciação do pivô deve ser diluída ao longo de um ciclo de produção e, portanto, dividida entre as três culturas que compõem o calendário produtivo da modalidade irrigação. Feita essas considerações, chega-se ao resumo exposto na Tabela 4.5, o qual revela os custos de produção adotados neste trabalho, incluindo-se nesses, as duas modalidades produtivas.

Tabela 4.5 – Resumo dos Custos de Produção (R\$/ha)

Modalidade	Soja	Trigo	Feijão	Milho
Sequeiro	1.625,06	1.342,77	2.003,28	1.568,79
Irigada	1.961,93	1.866,42	2.402,95	1.877,99

4.2.6 Estimativa do Consumo de Água na Irrigação

Também a partir do arranjo produtivo concebido para a bacia do rio Preto, procurou-se inferir qual seria o volume médio captado nos mananciais da bacia para a produção irrigada, especialmente aquele feito por meio de pivôs-centrais. Os cálculos e técnicas envolvidos neste tópico, por serem muito específicos, foram suprimidos desta monografia. Resumidamente, relata-se que foram observados os procedimentos comumente preconizados da área de irrigação, cuja principal referência é o manual do autor Bernardo (1995). Outras fontes de informação consultadas e necessárias à consecução desta etapa do trabalho - notadamente quanto à consulta de parâmetros de cálculo - foram: SEAPA (1996), Guerra e Jacomazzi (2001a), Guerra e Jacomazzi (2001b), Guerra *et al.* (2002), Guerra *et al.* (2005) e (ANA, 2008).

A partir do exposto, chegou-se a uma estimativa média do consumo mensal de água na bacia do rio Preto, para cada um dos dois ciclos de produção. O resultado dessa análise está disposto na Figura 4.10.

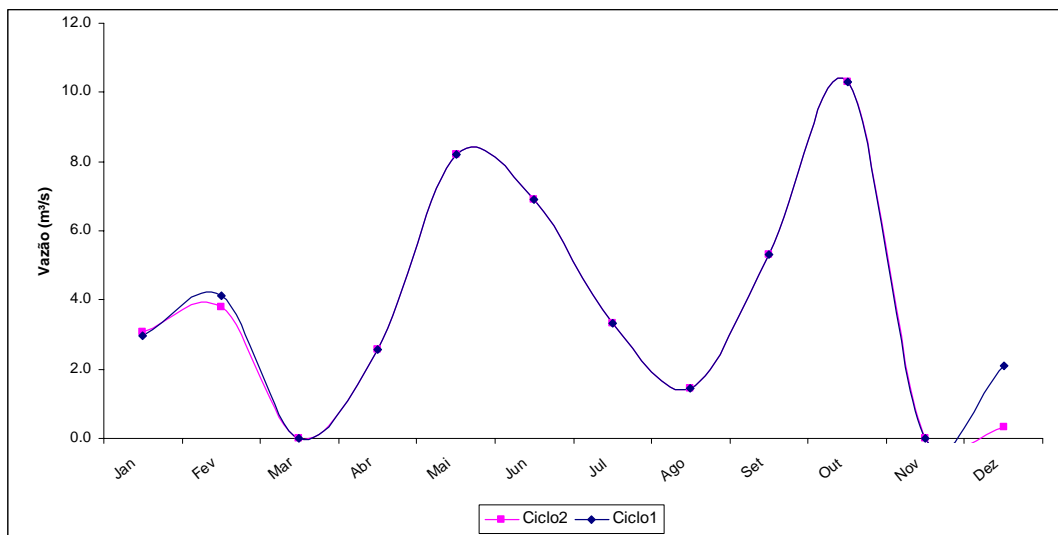


Figura 4.10 – Irrigação por Pivô-Central no Rio Preto

4.3 CURVA DE DEMANDA PARA A IRRIGAÇÃO NO RIO PRETO

Finalizada a etapa de estimativa dos preços praticados no mercado de grãos agrícolas, do custo médio de produção e do volume de água consumido, pôde-se então iniciar procedimento para construção de uma curva de demanda econômica associada ao uso da água na irrigação agrícola. Não obstante, o primeiro passo consistiu em se efetuar o cálculo da renda bruta e do custo total de cada célula produtiva, a qual é entendida aqui como sendo a área delimitada por um pivô-central. Uma vez contabilizados esses dois fatores, a renda líquida da irrigação é obtida efetuando-se a diferença entre os mesmos. De maneira análoga, pode-se, também, contabilizar quais seriam os custos e a renda percebida nessa mesma área

de plantio, só que para o caso em que esta fosse destinada ao modo de produção em sequeiro.

O valor da água, por sua vez, é derivado utilizando-se a Equação 2.7. Essa expressão, vista sob a ótica deste trabalho, nada mais é do que a razão entre a diferença das rendas líquidas das duas modalidades produtivas – irrigada e sequeiro – e o volume total de água consumido na irrigação. Procedendo-se dessa maneira, foi realizado o cálculo do valor da água para cada pivô-central delimitado na bacia do rio Preto, sendo que, os parâmetros econômicos e as etapas de cálculo para uma célula produtiva podem ser conferidos na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Cálculo do Valor da Água para uma Célula Produtiva

Irrigação								
	Área (ha)	Preço (R\$/Kg)	Custo Médio (R\$/ha)	Produtividade (Kg/ha)	Renda Bruta (R\$)	Custo de Produção (R\$)	Renda Líquida (R\$)	Consumo d'água (m³)
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)=a*b*d	(f)=a*c	(g)=e-f	(h)
Soja		0,64	1.943	3.620	131.459	109.726	21.733	75.533
Trigo	56,47	0,60	1.867	5.742	193.639	105.442	88.197	189.938
Feijão		1,60	2.403	3.314	300.155	135.705	164.449	132.326
Sequeiro								
	Área (ha)	Preço (R\$/Kg)	Custo Médio (R\$/ha)	Produtividade (Kg/ha)	Renda Bruta (R\$)	Custo de Produção (R\$)	Renda Líquida (R\$)	Consumo d'água (m³)
	(a)	(b)	(i)	(j)	(l)=a*b*j	(m)=a*i	(n)=m-l	
Feijão	56,47	1,60	2.003	2.755	249.510	113.134	136.376	-
Milho		0,34	1.569	6.447	125.372	88.596	36.776	-
Valor da Água								
Diferença entre as Rendas Líquidas (R\$)							100.192	
Consumo Total de Água na Irrigação (m³)							397.797	
Valor da Água (R\$/m³)							0,25	

O exemplo da Tabela 4.6 corresponde a um pivô cultivado segundo a seqüência proposta para o ciclo 1 de irrigação. O cálculo para o ciclo 2 é feito de forma idêntica, diferenciando-se apenas as variáveis econômicas de entrada da primeira cultura (soja, no caso do ciclo 1), que passam a ser os valores relacionados ao cultivo do milho (primeira cultura do calendário de irrigação do ciclo 2).

Tendo em vista o fato de a produtividade agrícola ter sido considerada como uma variável aleatória, aderente à distribuição Normal, os resultados obtidos para o valor da água também apresentaram uma variabilidade estatística. Como exemplo, na Figura 4.11, mostra-se a variação do valor da água calculado, em toda bacia, para o ciclo1 de produção, bem como algumas estatísticas relevantes.

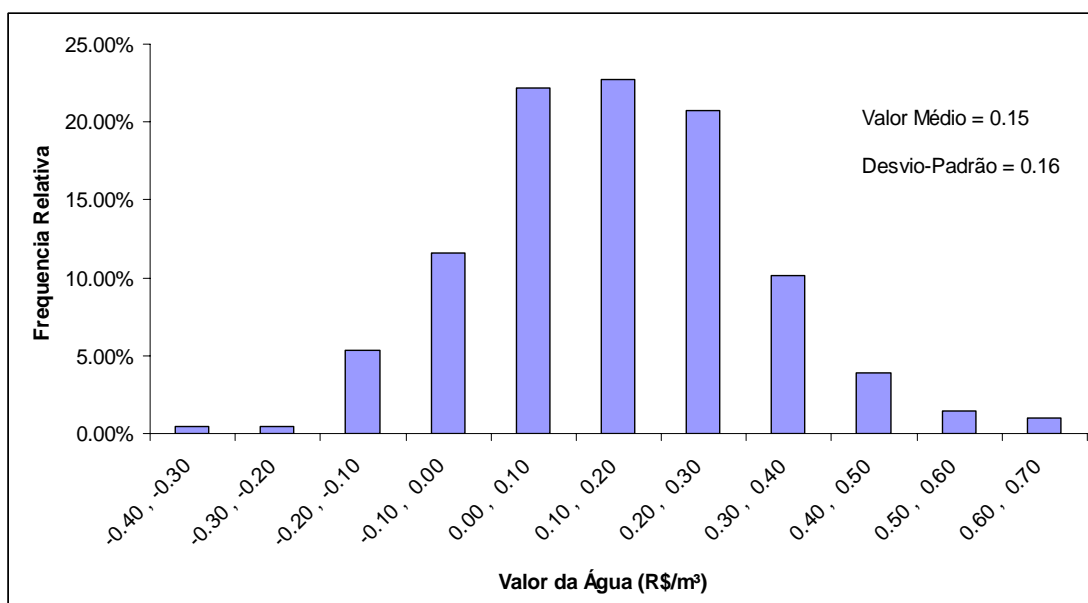


Figura 4.11 – Valor da Água para Irrigação Conforme Calendário do Ciclo 1

A partir desses últimos resultados, pôde-se construir uma curva de demanda para água a partir da contabilização do benefício incremental que a água proporciona ao próximo agricultor que deseja irrigar. Esse benefício apresenta uma tendência

decrecente, na medida em que o retorno marginal líquido decai enquanto mais unidades do insumo água são consumidas.

Com efeito, os dados de renda líquida, calculados para todas as células produtivas, foram ordenados de forma decrescente e, a partir dessa ordenação, procedeu-se ao cálculo da renda acumulada em toda bacia, que nada mais é do que o somatório desses valores de renda decrescente, armazenados em um novo vetor de dados. De forma análoga, ordenou-se o consumo d'água de cada célula produtiva em formato decrescente e, após isso, procedeu-se à soma desses valores, gerando um vetor adicional contendo volumes de água acumulados.

A divisão do vetor de renda acumulada pelo vetor de volume acumulado resulta no benefício marginal da água para a irrigação na bacia do rio Preto. Todos esses valores, dispostos em um gráfico, correspondem ao esboço de uma curva de demanda pela água utilizada para a irrigação nessa bacia. Na Figura 4.12, mostram-se os resultados para os dois ciclos produtivos estudados.

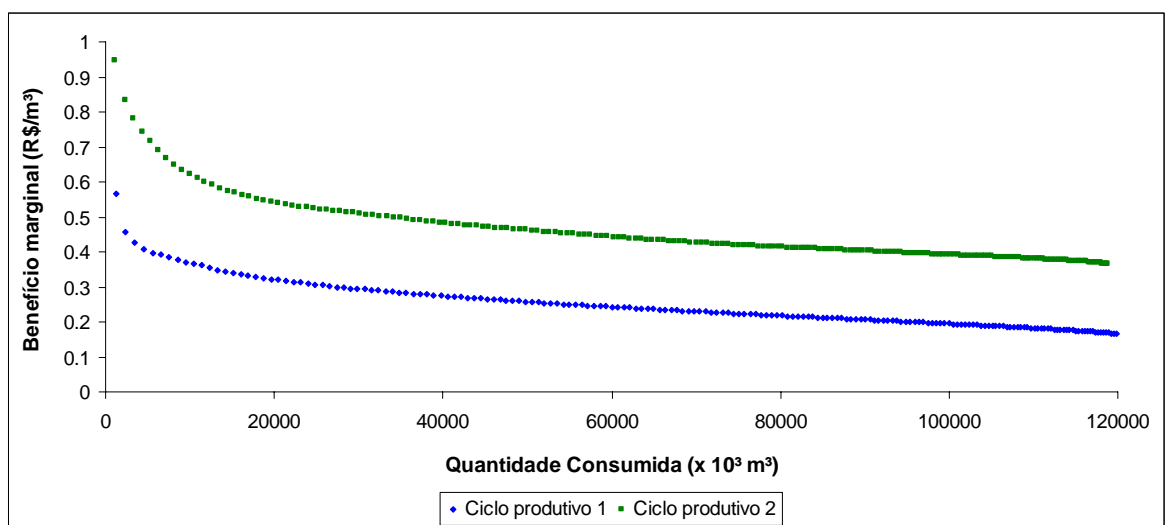


Figura 4.12 – Curvas de Demanda de Água para a Irrigação no Rio Preto

Ao analisar as duas curvas, nota-se que ambas apresentam benefícios marginais decrescentes, sendo que a do ciclo 2 tem um patamar mais elevado, em razão de o milho ter tido uma renda bruta média superior a da soja¹³. Outra maneira de interpretar essas curvas seria como sendo a representação da disposição a pagar de um irrigante da bacia por um m³ de água adicional captado do rio Preto. Essa disposição a pagar decai na medida em que o irrigante utiliza a água para a produção de grãos, e sua utilização aproxima-se da quantidade requerida para seu respectivo cultivo.

4.4 DEMANDA ECONÔMICA PARA A ENERGIA ELÉTRICA

A produção de energia elétrica na usina hidrelétrica de Queimado consiste em um segundo uso importante para a água na bacia do rio Preto. Essa usina está inserida no Sistema Interligado Nacional e, portanto, integra um dos sub-mercados de energia elétrica do país. A formação de preços nesses sub-mercados se dá por meio de simulações do modelo NEWAVE. De acordo com a metodologia desse modelo, os custos marginais de operação consistem numa boa referência para o valor da água, uma vez que os mesmos refletem o custo de oportunidade de se utilizar a água estocada nos reservatórios das usinas hidrelétricas em detrimento do acionamento de unidades térmicas, essa análise sendo feita dentro do horizonte de planejamento do modelo, que é de cinco anos.

¹³ Renda bruta resulta do produto preço do grão por sua respectiva produtividade. Em relação ao afirmado para o milho e para a soja, consulte os parâmetros preço e produtividade, dispostos, respectivamente, nas Tabelas 4.4 e 4.2.

No ensejo, contato junto ao ONS foi feito com intuito de adquirir os resultados de uma simulação corriqueira do modelo NEWAVE. Nesse sentido, obtiveram-se arquivos de saída referentes ao programa de operação do mês de agosto de 2008, ou seja, o mês inicial do período de estudo foi agosto de 2008, e, o último, dezembro de 2012.

Nesses arquivos, os resultados continham, mês a mês, os custos marginais de operação (CMO) e a Energia Natural Afluenta (ENA) a cada subsistema. ENA consiste na vazão natural que chega a cada reservatório, valorada pela produtividade média de cada usina¹⁴. A ENA de um subsistema é o somatório do produto entre a vazão afluenta e a produtividade acumulada de uma cascata de usinas, esta última entendida como sendo o somatório das produtividades de todos os aproveitamentos hidrelétricos pertencentes ao conjunto de bacias hidrográficas que compõem esse subsistema. O parâmetro CMO exprime o custo incremental da operação do sistema associado a uma variação marginal de carga (demanda de energia) do mesmo.

Uma ressalva quanto ao uso direto dos resultados do NEWAVE diz respeito ao fato de seu algoritmo de otimização não contemplar uma solução para cada usina

¹⁴ Produtividade média indica a taxa média de conversão da vazão turbinada em energia, considerando os rendimentos do grupo turbina-gerador, para uma dada altura equivalente do reservatório, a qual é considerada como sendo constante e igual a 65% do enchimento do volume útil. Altura equivalente é a diferença entre as cotas do reservatório e a do canal de fuga da usina, descontadas as perdas hidráulicas; volume útil é quantidade estocada e efetivamente utilizada para a produção de energia (ONS, 2008b).

individualmente¹⁵. A convergência do modelo se dá em termos de cada um dos quatro grandes sub-sistemas (reservatórios equivalentes de energia), o que dificulta a validade de transposição direta dos mesmos para casos mais específicos como o ora proposto. O ideal seria ter a possibilidade de se obter resultados para as usinas de forma isolada.

Todavia, o fato de a UHE Queimado estar conectada ao SIN faz com que a programação da operação dessa usina seja coordenada pelo Operador Central - ONS. Isso significa que o montante de energia produzida em Queimado, a cada instante, é determinado por esse despacho central, o qual avalia a operação e a confiabilidade do sistema como um todo. Assim, considera-se que, embora o regime hidrológico e a magnitude das vazões em Queimado possam diferenciar de outras localidades e regiões do Brasil, a sinergia causada pela interligação e centralização da operação de todo sistema elétrico brasileiro faz com que a energia produzida nessa usina possa ser valorada pelo custo marginal do sub-sistema Nordeste, sem que, para isso, incorra-se em grandes prejuízos em termos de consistência metodológica.

Em realidade, sob o ponto de vista do sistema de transmissão, a UHE Queimado está conectada ao sub-sistema Sudeste/Centro-Oeste (ONS, 2008a), o que faz com que essa usina integre esse sub-mercado especificamente. Todavia, a validade no uso dos resultados da região Nordeste é respaldada pelas seguintes análises realizadas: (i) a correlação das vazões afluentes à UHE Queimado com o parâmetro

¹⁵ Vide Pereira e Pinto (1985).

ENA da região Nordeste é quase o dobro da mesma verificada para o sub-sistema Sudeste/Centro-Oeste, 0.82 no primeiro caso e 0.47 na segundo¹⁶; (ii) os custos marginais de operação médios entre os sub-sistemas Sudeste e Nordeste, ao longo do histórico simulado (Figura 4.13), não apresentam diferenças significativas¹⁷.

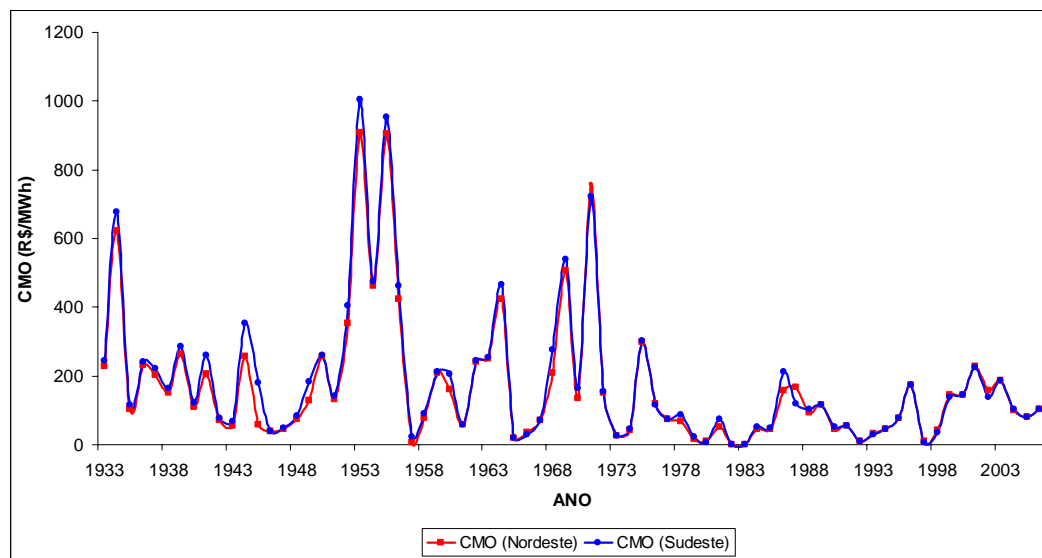


Figura 4.13 – Comparação entre CMOs ao Longo do Histórico Simulado

Partindo-se da premissa de que os axiomas expostos no parágrafo anterior são válidos, utilizaram-se integralmente os resultados da simulação do NEWAVE para a

¹⁶ A série de vazões naturais afluentes a Queimado foi obtida de ONS (2008a) e contempla o histórico de afluências entre os anos de 1931 a 2006.

¹⁷ Tal constatação provém do fato de haver intercâmbio de energia entre essas regiões. O intercâmbio de energia no SIN é promovido por meio de extensas linhas de transmissão construídas entre as quatro macro-regiões do país e tem a função de compensar energeticamente um ou mais sub-sistemas em relação aos demais, quando os primeiros estejam enfrentando período(s) de baixa(s) afluência(s) a seus reservatórios. Essa compensação energética faz com o que o custo marginal de operação em qualquer sub-sistema seja igual ao valor do incremento de energia produzido na próxima usina (hidráulica ou térmica) mais barata, pertencente a qualquer um deles. A diferenciação observada na Figura 4.13, em alguns períodos, se deve à limitação física de transporte dessas linhas de transmissão responsáveis pelo provimento desse fluxo energético compensatório entre os sub-sistemas Sudeste/Centro-Oeste e Nordeste.

região Nordeste, como sendo bons balizadores para o valor da água turbinada na UHE Queimado. Os resultados dispostos no gráfico da Figura 4.14, porém, contêm ainda um filtro sobre os dados de ENA e CMO, que visou a melhorar a correlação entre eles por meio da retirada de algumas interferências que o intercâmbio de energia detém sobre a sinalização econômica do custo marginal de operação de um sub-sistema.

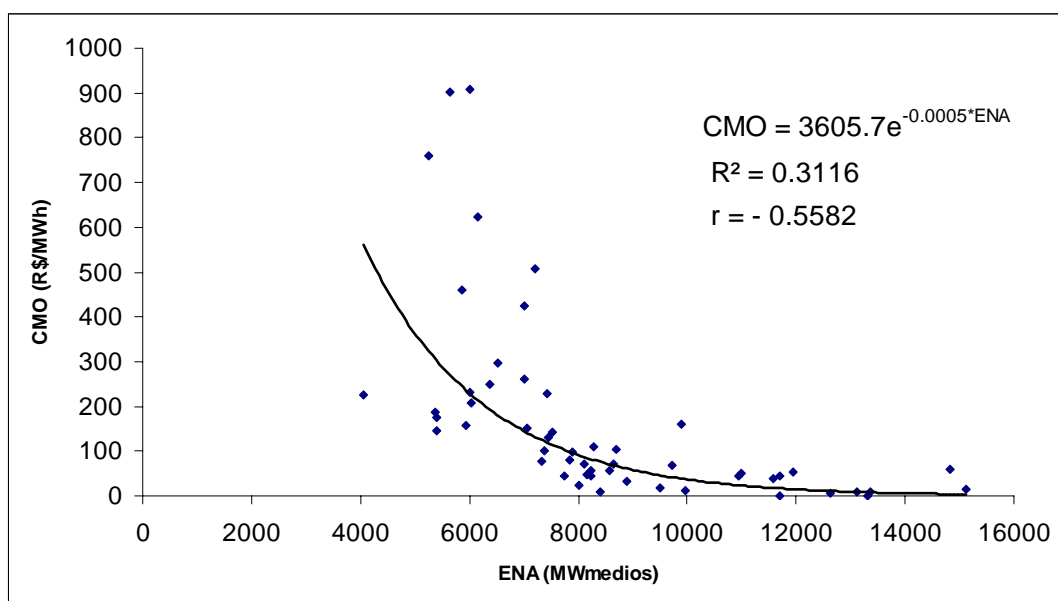


Figura 4.14 - Custo Marginal da Operação para o sub-sistema Nordeste

Neste ponto da análise, optou-se por estabelecer duas vertentes para o prosseguimento do cálculo do valor da água na geração hidrelétrica, tendo em vista posterior simulação de sensibilidade efetuada. A primeira delas envolve a consideração de toda a cascata do rio São Francisco - da qual a UHE Queimado faz parte - na análise do uso da água para a produção de energia no âmbito do rio Preto. Nota-se, da Figura 4.15, que um metro cúbico turbinado em Queimado também produz energia em Sobradinho, Itaparica, Moxotó, Paulo Afonso e, por último, em Xingó.

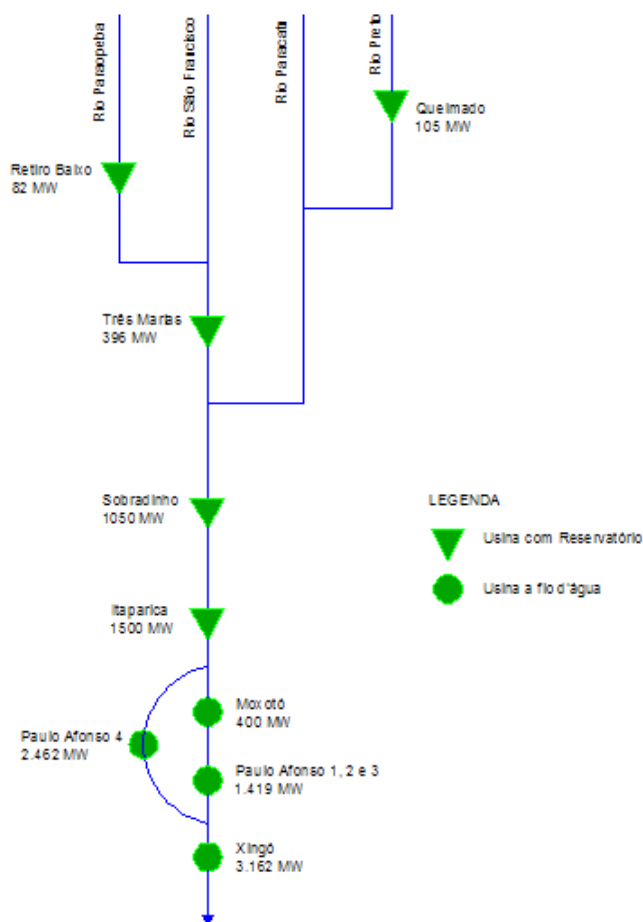


Figura 4.15 – Topologia das Usinas Hidrelétricas na Bacia do Rio São Francisco

Nesse caso, a devida conversão de unidades foi efetuada para todos os valores médios do histórico simulado, segundo informações sobre produtividade média das usinas envolvidas, dispostas em ONS (2008b). A distribuição empírica de freqüências para o valor da água pode ser conferida na Figura 4.16. Outrossim, a disposição do mesmo gráfico da Figura 4.14, em termos de unidade monetária pelo fluxo de água turbinado (R\$/m³/s)¹⁸, pode ser conferida na Figura 4.17. Por questões de praticidade dessa análise, que ficarão mais claras com o decorrer da exposição, denomina-se esse primeiro caso como sendo o “caso 1”.

¹⁸ Para se obter essa última relação, basta multiplicar a série de valores da água (em R\$/m³) pelo número de segundos contidos em um mês.

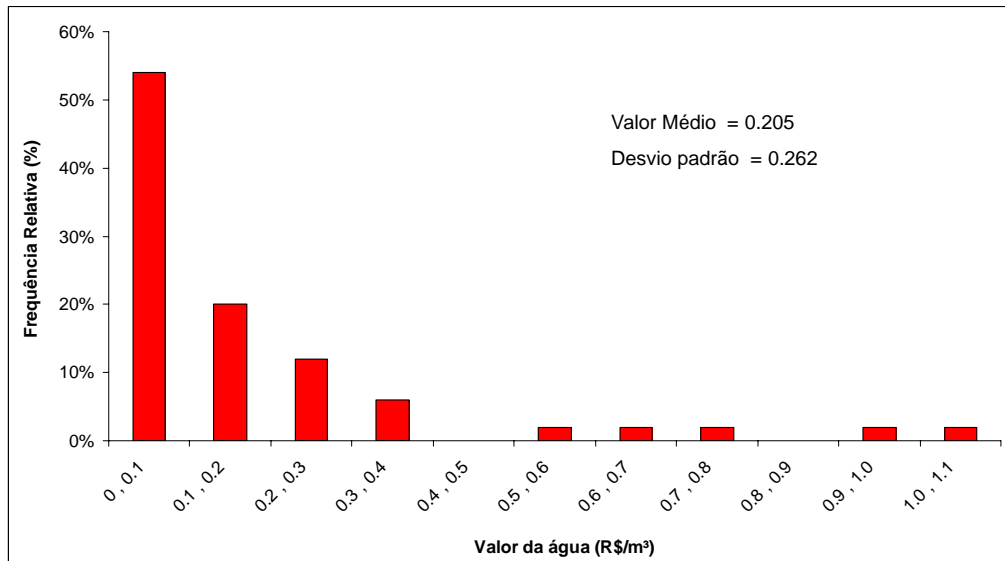


Figura 4.16 - Valor da Água para Geração de Energia Elétrica – Caso 1

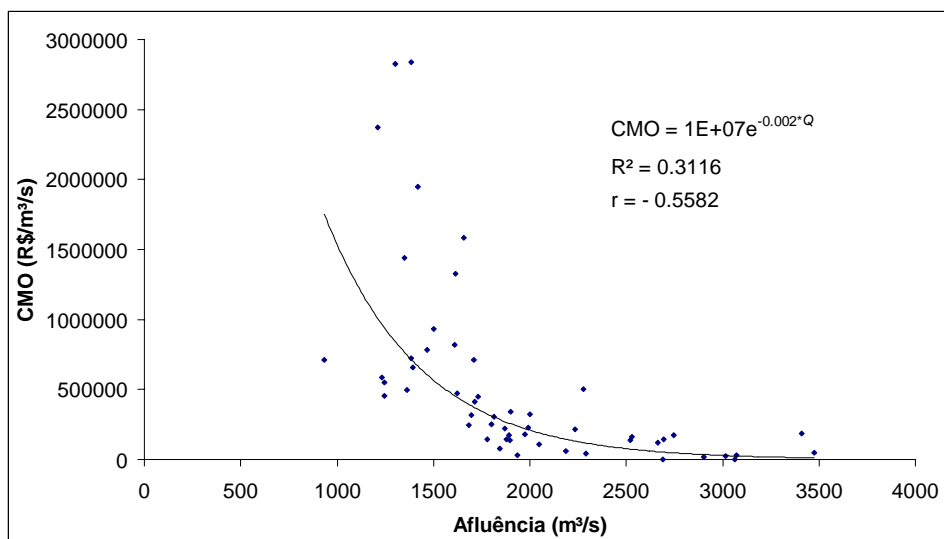


Figura 4.17 – Custo Marginal de Operação em Termos da Afluência – Caso 1

Considera-se que a relação disposta na Figura 4.17 é uma representação da demanda de água para a geração de energia elétrica na bacia do rio Preto, mais especificamente na usina de Queimado. Em realidade, uma central hidrelétrica que esteja inserida em um sistema hidrotérmico de produção de energia, tal como é o caso da UHE Queimado, não apresenta um custo direto associado à utilização da água, mas, tão-somente, o custo de oportunidade relativo ao uso do recurso hídrico, considerando o efeito dessa decisão no presente e no futuro. Com efeito, a curva

que relaciona o custo marginal de operação em função da afluência pode ser entendida como sendo uma representação da curva de demanda pelo uso da água na produção de eletricidade.

A outra vertente adotada para a análise econômica do valor da água para a geração de energia foi a de se considerar apenas a usina de Queimado, descartando-se as demais usinas de jusante. Nesse caso, ao qual se atribuiu o nome de “caso 2”, apenas a produtividade de Queimado foi considerada.

4.5 ANÁLISE DE ALOCAÇÃO DA ÁGUA NO RIO PRETO

Como última etapa analítica da presente monografia, propôs-se efetuar uma análise de alocação da água aplicada à bacia do rio Preto. Para tanto, utilizou-se o Sistema de Suporte à Decisão Aquanet[®], desenvolvido pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Porto *et al.*, 2003). Esse sistema é baseado no modelo de rede fluxo MODSIM - descrito na Seção 3.2 –, o qual contém o mesmo algoritmo de programação linear *out-of-kilter* para a solução do problema de alocação da água em bacias hidrográficas.

4.5.1 Avaliação das Curvas de Demanda para o Rio Preto

Antes de proceder à avaliação econômica de alocação na bacia do rio Preto, julgou-se importante apreciar as curvas econômicas, associadas aos dois usos em questão, em um mesmo gráfico, no qual elas pudessem ser confrontadas sob o mesmo patamar de vazões. Nesse sentido, à dispersão de pontos de cada uma

delas, foi ajustado um modelo de regressão estatística que mantivesse o caráter assintótico e decrescente esperado de uma curva clássica de demanda¹⁹.

Com efeito, o modelo escolhido, em ambos os casos, foi o de uma função exponencial de formato $y = Ce^{-kx}$, em que se C e k são parâmetros estimados na análise de regressão. Tal escolha levou em conta o fato desse tipo de função, além de ser o formato de curva requerido pelo módulo de economia do AquaNet (Porto *et al.*, 2003), ter caráter decrescente, em todo o seu domínio de validade, e assintótico ao eixo das abscissas (não apresenta valores negativos para a variável y).

As expressões de funções matemáticas ajustadas, empregando-se a análise de regressão às dispersões anteriormente estudadas são dispostas na sequencia:

$$Bmg = 10.000.000 \times e^{-0.1767 \times Q} \quad \text{Irrigação Ciclo – 1} \quad (4.1)$$

$$Bmg = 10.000.000 \times e^{-0.0935 \times Q} \quad \text{Irrigação Ciclo – 2} \quad (4.2)$$

$$Cmo = 10.000.000 \times e^{-0.002 \times Q} \quad \text{Energia Elétrica 1} \quad (4.3)$$

$$Cmo = 4.000.000 \times e^{-0.002 \times Q} \quad \text{Energia Elétrica 2} \quad (4.4)$$

¹⁹ Apesar do sabido desestímulo à extrapolação da equação de regressão para além dos limites amostrais, avaliou-se que, para o presente caso de estudo, esta far-se-ia necessária tendo em vista a faixa de vazões afluentes a Queimado ser, indubitavelmente, distinta da ordem de grandeza das vazões consuntivas de irrigação sob pivô-central no rio Preto e do somatório de aflúncias associadas a todas as usinas que compõem o sub-sistema Nordeste.

em que, Bmg denota o benefício marginal da água para a irrigação (R\$/m³/s), Cmo corresponde ao custo de oportunidade marginal de utilização da água para a geração de energia elétrica (R\$/m³/s) e Q à vazão afluyente (m³/s).

Na Figura 4.18, mostra-se o valor da água para a produção de energia e irrigação em formato gráfico, validado a partir da aplicação das expressões referenciadas acima.

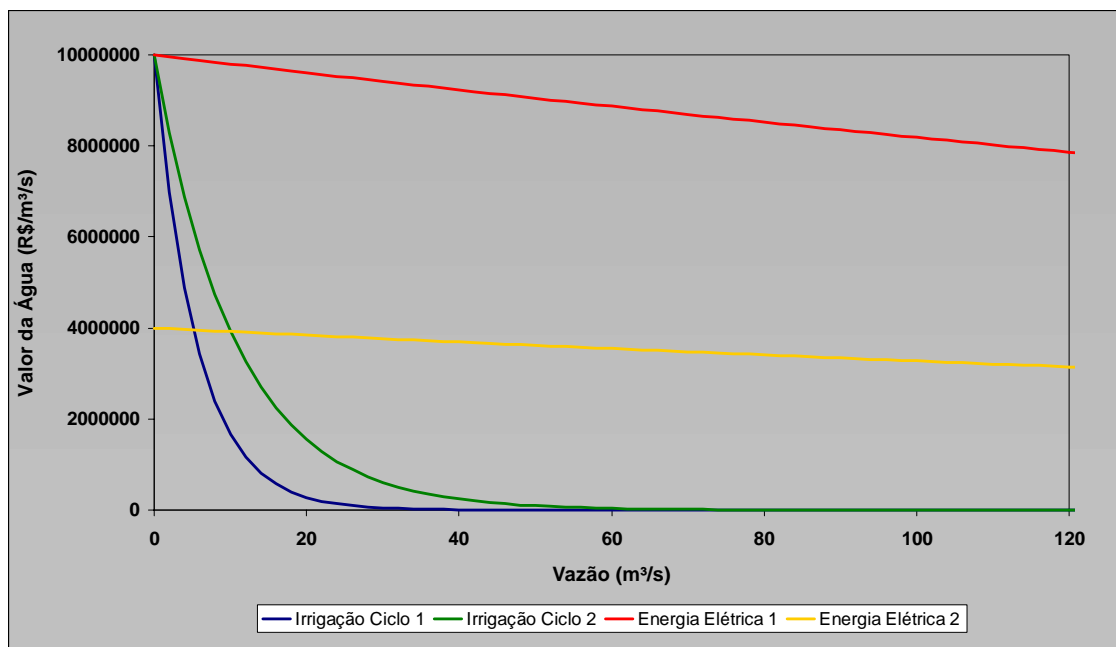


Figura 4.18 – Curvas de Demanda para Água na Bacia do Rio Preto

Em relação à irrigação, um ponto importante da avaliação conjunta de suas respectivas curvas dispostas no gráfico acima diz respeito à sensibilidade dos parâmetros produtividade, valores de mercado de insumos e preços das *commodities* agrícolas. Essa constatação advém do fato de terem sido esses os fatores preponderantes sobre a diferenciação entre os ciclos 1 e 2 de produção agrícola no rio Preto.

Como se pode notar na Figura 4.18, a alteração das variáveis mencionadas no parágrafo anterior implica em diferenças importantes para os benefícios marginais computados. Na faixa de 20 m³/s, por exemplo, a diferença entre o valor da água utilizada no ciclo 2 seria 500% superior à mesma captação em calendários consoantes com o ciclo 1 de produção.

De forma análoga, a diferença de patamar observada entre as duas curvas de energia elétrica mostra uma sensibilidade importante em relação à produtividade de cada usina. Basicamente, o que diferenciou os dois casos avaliados foi o maior rendimento do conjunto das usinas em cascata, em relação a Queimado isoladamente. Da mesma forma, esperar-se-iam diferenças significativas se a mesma comparação fosse feita para usinas isoladamente, devido a grandes diferenças que há nos valores de produtibilidades (eficiência na conversão de água em energia) de cada planta hidrelétrica²⁰.

Não obstante, essas sensibilidades também valem quando se contrapõem as curvas entre os dois diferentes usos em questão. Por exemplo, citam-se os respectivos pontos nos quais as duas curvas agrícolas igualam o valor da água em relação à segunda curva da energia elétrica (curva em amarelo). Apesar da diferença de cultivo aparentemente pequena entre os dois ciclos agrícolas, o mesmo não se pode

²⁰ Como exemplo, recomenda-se consulta aos valores de produtividade de usinas dispostos em ONS (2008b). Cabe destacar que essa sistemática também realça um outro problema, que é o de se considerar – ou não –, quando existente, a cascata de usinas pertencente a macro-região de influência (bacia do rio São Francisco, neste exemplo), ou, tão-somente, a central hidrelétrica pertencente à micro-região de estudo (bacia do rio Preto)

afirmar sobre o valor da água, porque o benefício marginal passa a ser menor para a irrigação do que para a energia elétrica a partir de 5 m³/s, se considerado o ciclo 1 de produção, enquanto que, essa mesma inflexão só ocorre a partir dos 11 m³/s para o ciclo 2.

Essa diferença de mais de 100% no ponto em que se igualam os valores da água para irrigação e produção de energia elétrica, ao se adotar uma ou outra curva econômica referente à irrigação, mudaria, por completo, os resultados de uma análise de alocação baseada no benefício econômico marginal para o uso de recursos hídricos na bacia do rio Preto. Pelo fato de a demanda máxima contabilizada para irrigação sob pivô-central, nesse rio, atingir cerca de 10 m³/s (vide Figura 4.18), conclui-se que, mantido constante esse cenário de consumo, a água teria preferência total para a irrigação se se adotasse, no limite, apenas o calendário 2 de produção para todos os agricultores dessa bacia. Em contrapartida, haveria forte competição pelo uso da água se fosse considerada a curva referente ao ciclo 1 para todos os mesmos agricultores e, da mesma forma, comparassem-na com a curva 2 de geração de energia elétrica.

Em face ao exposto e à maior complexidade do problema em casos práticos, fica latente a necessidade de se adotarem critérios de eficiência econômica para alocação do recurso hídrico, especialmente em regiões cuja disponibilidade se aproxima – ou não é suficiente - ao pleno atendimento da demanda. Dessa forma, acredita-se que a regulação da oferta de água calcada em critérios marginalistas - para o cômputo de seus benefícios - implicaria em maior eficiência econômica na

alocação desse recurso, maximizando o produto econômico advindo da utilização do mesmo.

4.5.2 Análise Econômica do Rio Preto no Aquanet

A última etapa deste trabalho consistiu em se construir cenários de alocação no rio Preto, com vistas à avaliação e contabilização das consequências econômicas oriundas da disposição das diferentes curvas às demandas caracterizadas nessa bacia hidrográfica. Nesse sentido, representou-se o sistema hídrico da bacia do rio Preto em uma rede de fluxo, composta por nós e arcos, em consonância com a arquitetura usual dos modelos MODSIM e AquaNet. Essa configuração seguiu uma prévia divisão da bacia do rio Preto em dois segmentos principais, os quais tiveram, como ponto de referência, o reservatório da UHE Queimado. Os irrigantes localizados a montante do lago foram agrupados em uma demanda única, de magnitude igual ao somatório dos seus respectivos consumos individuais. De forma análoga, foi também composta uma demanda para os irrigantes localizados a jusante. A configuração dessa bacia numa rede de fluxo é mostrada na Figura 4.20.

Como informações de entrada para alimentar o modelo de rede de fluxo, utilizaram-se informações disponíveis nas seguintes referências: Eletrobrás (2008) e ONS (2004). Na Tabela 4.7, dispõem-se as vazões médias turbinadas em Queimado, conforme consulta feita à concessionária CEMIG (CEMIG, 2008). A demanda hídrica para a irrigação foi parcelada em consonância com o esquema das Figuras 4.8 e

4.20, de forma proporcional ao número de pivôs localizados em cada metade da bacia²¹.

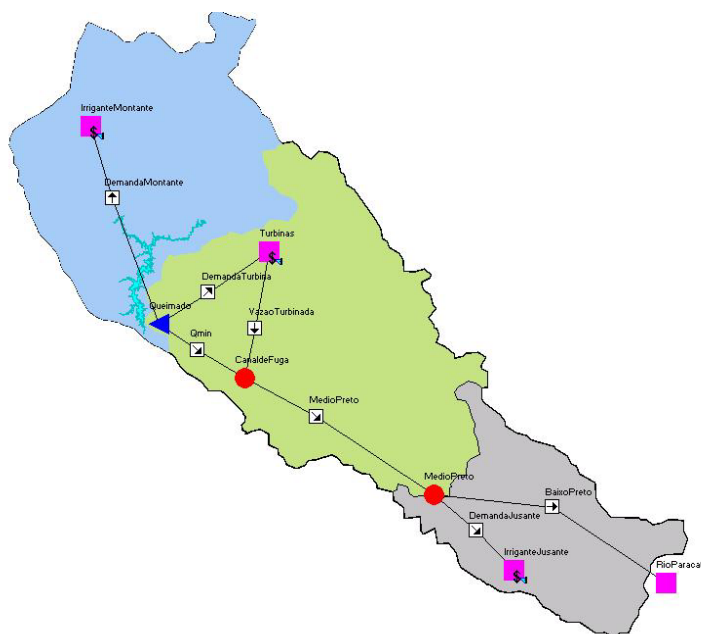


Figura 4.20 – Esquema da Rede de Fluxo da Bacia do Rio Preto

Tabela 4.7 – Vazões médias turbinadas em Queimado (CEMIG, 2008)

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
38,0	38,2	49,1	51,1	50,1	40,1	47,6	49,9	39,5	30,9	28,7	39,8

4.5.3 Simulação de Dois Cenários

Na presente avaliação, foram considerados dois casos de simulação: no primeiro deles, à demanda para a irrigação de montante (nó *Irrigante Montante*), foi atribuída a curva de benefício marginal referente ao Ciclo 2 de produção; já para os irrigantes

²¹ A taxa de desconto sobre o capital foi fixada em 12% ao ano e adotou-se uma tolerância de 5% sobre as metas de consumo (demandas). A simulação levou em conta as aflúncias dispostas em ONS (2008a), cujo período de extensão vai de 1931 a 2006.

de jusante (nó *Irrigante Jusante*), atribuiu-se a curva do Ciclo 1. Em relação à energia elétrica, associou-se a curva de número um – a de maior valor agregado à água. A segunda simulação levou em conta a troca das curvas de irrigação entre suas respectivas demandas, ou seja, curva do ciclo 1 passou aos irrigantes de montante e, a do ciclo 2, aos agricultores de jusante; quanto à energia elétrica, também se alterou a curva de número um para a de número dois – a que considera a produção de energia somente em Queimado. Ambos os cenários são dispostos de forma esquemática na Figura 4.21.

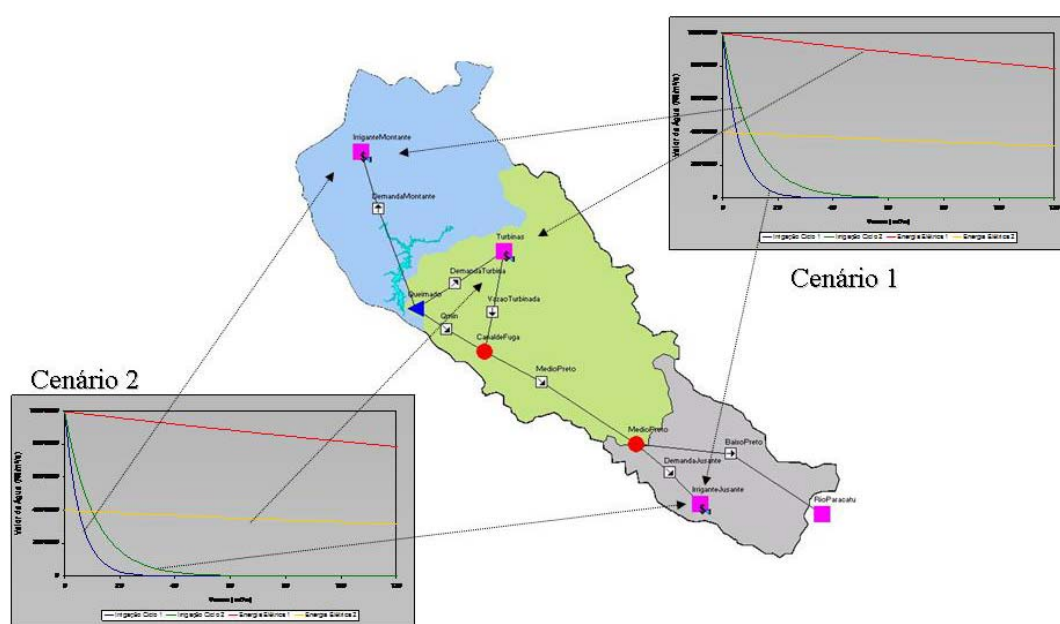


Figura 4.21 – Cenários de Alocação Analisados

Em ambos os casos, o foco da análise foi sobre as demandas preponderantes dessa bacia, turbinamento em Queimado e irrigação a montante desse reservatório. No primeiro deles, avaliou-se a hipótese de se ter um cenário agrícola mais favorável aos irrigantes a montante da usina, em contraste com um viés analítico de se considerar a sinergia da produção hidrelétrica em toda a cascata do São Francisco. No segundo, procurou-se estabelecer um cenário agrícola menos favorável à

irrigação para a demanda de montante, em contraste, da mesma forma, com a premissa de que somente a energia gerada em Queimado (desconsideração das demais usinas) seria levada em conta para a análise de alocação da água. Na Tabela 4.8, dispõe-se, de forma resumida, os resultados obtidos para os dois casos.

Tabela 4.8 – Resultados dos Cenários Analisados

Cenário 1			
Demanda	Frequência abaixo da demanda (%)	Valor Presente Líquido (10³ R\$)	Benefício anual médio (10³ R\$)
Irrigante Jusante	0	1.004.851	120.604
Irrigante Montante	24,45	1.581.261	190.563
<i>Turbinas</i>	28,40	34.056.400	4.019.839
Cenário 2			
Demanda	Frequência abaixo da demanda (%)	Valor Presente Líquido (10³ R\$)	Benefício anual médio (10³ R\$)
Irrigante Jusante	0	1.087.967	130.580
Irrigante Montante	4,61	1.894.734	227.234
<i>Turbinas</i>	28,84	13.403.260	1.586.421

4.5.4 Análise dos Resultados

A análise das informações dispostas na Tabela 4.8 mostra que, em consonância com as curvas econômicas levantadas, houve forte disputa pela água no primeiro caso de simulação, notadamente em relação aos irrigantes localizados a montante do lago de Queimado e a produção de energia nessa usina. Esses dois usuários apresentaram déficits no atendimento de suas respectivas demandas muito próximos um do outro (24% do tempo para a irrigação, e 28% para a energia

elétrica). Em contrapartida, em nenhum evento, dentre os 912 meses do histórico, a demanda para os irrigantes de jusante deixou de ser atendida, tendo em vista o fato de eles, além de apresentarem o menor consumo da bacia, terem maior disponibilidade de água advinda do trecho incremental da bacia do Médio Preto.

No que tange aos aspectos econômicos, nota-se que a energia elétrica obteve o maior benefício médio entre as três demandas analisadas em ambos os cenários. Tal resultado reflete, além de um benefício marginal superior associado a esse uso da água – no caso específico da primeira simulação -, um maior volume bruto médio de água fornecido às turbinas, consoante, também, com esta, que é a maior demanda do sistema. Na Figura 4.22, como ilustração da presente exposição, mostram-se as curvas de permanência para o benefício econômico auferidos pelos usuários ao longo do segundo cenário simulado.

Também em relação ao segundo cenário, confrontando-se os resultados dispostos na Tabela 4.8, infere-se que houve uma queda significativa da renda auferida pela usina de Queimado. Em termos numéricos, o valor presente líquido dos benefícios advindos do turbinamento caiu 61%. Portanto, essa última constatação expõe a grande sensibilidade que há na regulação da oferta de água quando esta é feita a partir da mensuração do benefício marginal que a água proporciona às atividades econômicas. Em consequência disso, pode-se dizer que ganha ainda mais importância a qualidade e o peso das informações econômicas de entrada, bem como os valores de produtividade (eficiência) associados a cada atividade.

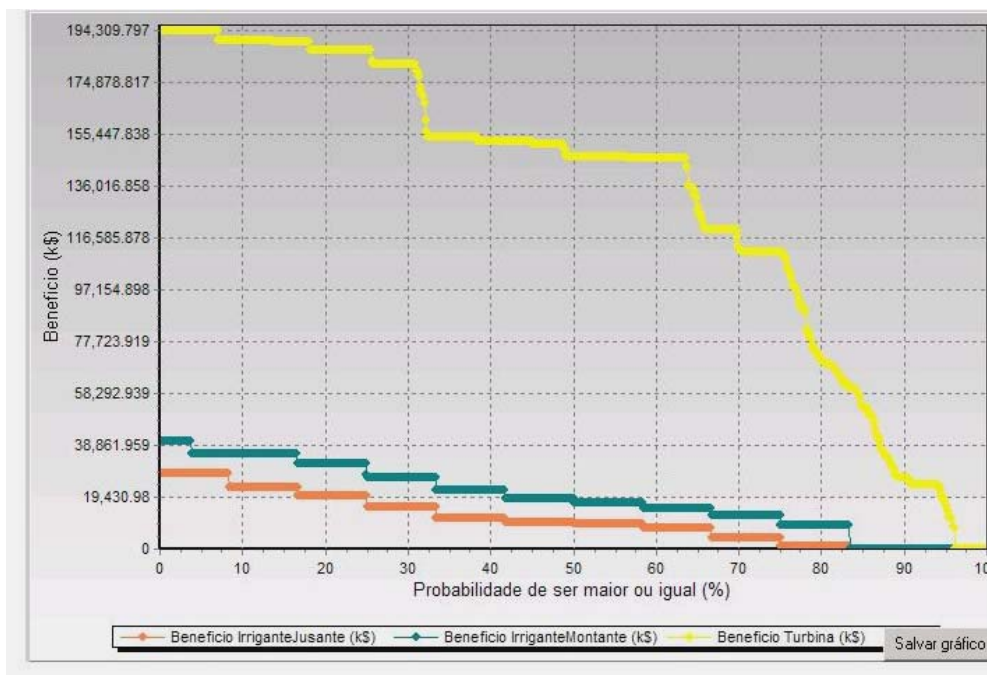


Figura 4.22 - Benefícios das demandas no rio Preto – Cenário 2

No que tange à sensibilidade dessa metodologia quanto à variação dos valores marginais de entrada para cada demanda, no caso mais específico da agricultura, nota-se que os déficits percebidos pelos irrigantes de montante tiveram consequências importantes em seus resultados quando se compara-nos com os mesmos obtidos no segundo cenário. O prejuízo que esses agricultores tiveram com a atribuição da curva de menor benefício marginal foi de 16%, além de terem tido seu atendimento mais restringido em cerca de 20% do tempo.

Na Figura 4.23, comparam-se os benefícios econômicos entre as duas demandas de irrigação para o primeiro cenário de simulação. Nesse caso, embora os agricultores de montante consumam bem mais água do que seus vizinhos de jusante – e a eles, portanto, espera-se ser computada a maior renda bruta final, em termos absolutos -, há, em cerca de 35% do tempo, inversão dessa lógica, em razão de os irrigantes a jusante não terem quaisquer problemas em relação ao seu suprimento de água.

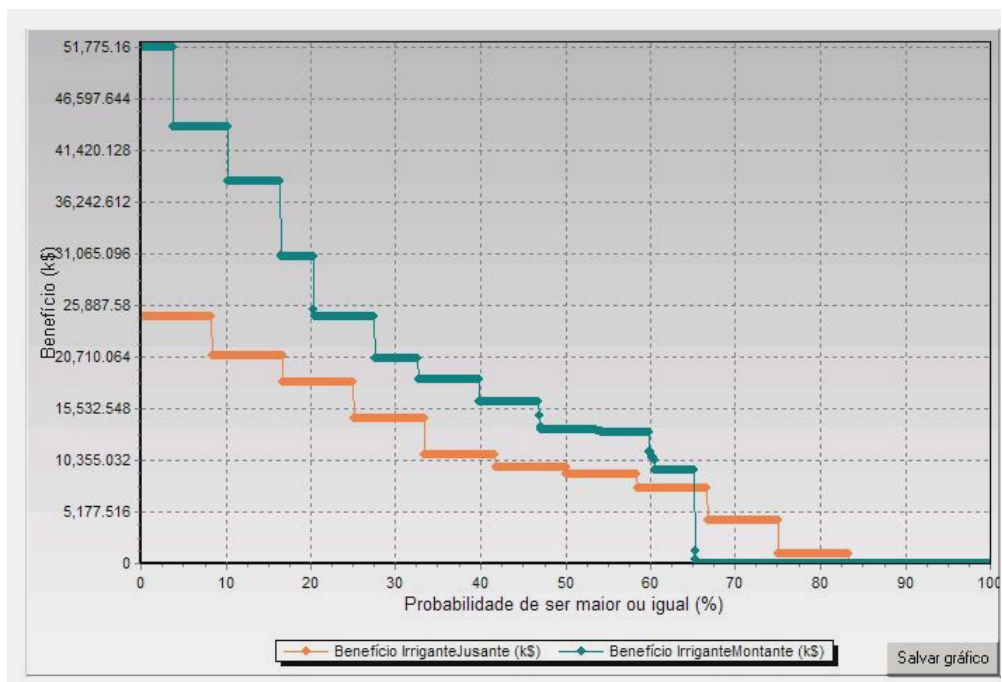


Figura 4.23 – Benefícios Econômicos dos Irrigantes – Cenário 1

A mudança de curvas entre os irrigantes na segunda rodada, por sua vez, fez com que diferença de patamar entre os benefícios percebidos pelos mesmos aumentasse, conforme se apresenta na Figura 4.24. Tal constatação advém, majoritariamente, do fato de ter sido atribuída a curva de menor valor relativo à demanda da UHE Queimado, o que implicou em uma maior preferência para a irrigação a montante de seu reservatório em detrimento da produção de energia. Ademais, dessa vez, em termos absolutos, a permanência dos benefícios auferidos dos irrigantes de montante manteve-se superior aos de jusante em todo período simulado, em face do menor racionamento experimentado pela primeira nesse segundo caso.

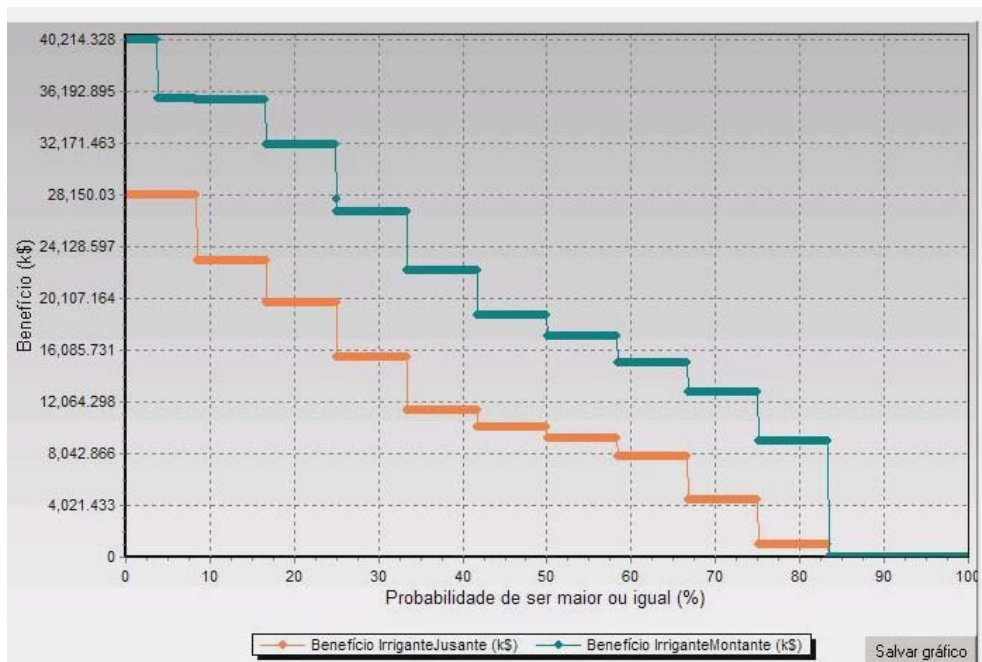


Figura 4.24 - Benefícios Econômicos Auferidos pelos Irrigantes – Cenário 2

É interessante notar, portanto, que o critério de alocação calcado no benefício marginal não prioriza aquela demanda que requer maior volume e, por conseguinte, poderia resultar - em uma visão mais simplista do problema - na alocação do recurso para o agente que proverá um maior produto interno bruto de forma isolada. O critério marginalista beneficia aquela atividade mais eficiente e cujo valor relativo é maior do que as demais demandas presentes, independentemente do montante total a ser utilizado ou do poder de barganha que algumas atividades, ou associações de agentes econômicos, têm sobre os demais produtores.

5. CONCLUSÕES

A valoração econômica da água, além de ser um mecanismo previsto na legislação brasileira, é um instrumento indispensável à eficácia dos modelos de gestão de recursos hídricos. Todavia, em face da importância e complexidade envolvida em torno desse recurso natural, desde aspectos relacionados à sua ocorrência estocástica, passando pela diversidade de fatores intervenientes em suas características física, química e biológica, fazem com que a problemática envolvida em torno do seu gerenciamento seja ainda mais desafiadora. Somam-se a esses aspectos, fatores de cunho político e institucional, além da multiplicidade de objetivos em torno de seus múltiplos usos.

Com efeito, um primeiro aspecto importante quando da realização de uma análise econômica aplicada à regulação no uso da água diz respeito a uma criteriosa avaliação da realidade econômica em que esta está inserida. Tal avaliação deve perseguir uma completa delimitação das variáveis econômicas envolvidas em cada modalidade de uso da água. A depender dessa realidade, diferentes serão os métodos analíticos mais adequados à sua valoração – função de produção, valoração contingente, preços hedônicos, entre outros. Destaca-se que, não obstante essa avaliação, a estimativa do valor econômico da água necessariamente recai em nas dimensões ambiental e social associadas à dinâmica dos processos produtivos. Essas duas vertentes, por sua vez, requerem a internalização das externalidades, as quais, por si só, constituem em grandes desafios sob os pontos de vista metodológico e conceitual.

Em relação ao procedimento preconizado nesta monografia, não foram consideradas quaisquer externalidades para os usos irrigação e produção de energia elétrica. Seria desejável que análises futuras incorporassem uma abordagem mais robusta para a aferição do valor do recurso hídrico presente nessas ou em demais atividades econômicas, a qual levantasse os impactos causados, no meio ambiente e na sociedade, pelas atividades produtivas em que a água seja um dos fatores principais envolvidos.

No que tange especificamente aos procedimentos relacionados à confecção da curva de demanda para o uso irrigação, ressalta-se que outros aspectos metodológicos podem ser aprimorados em futuras análises dessa natureza. O primeiro deles seria o aprofundamento do estudo em relação à realidade agrícola da região analisada, com maior detalhamento dos perfis dos agricultores, da variedade dos produtos cultivados e das técnicas de plantio. Um segundo aspecto residiria em um maior esforço para a obtenção de informações primárias sobre as variáveis econômicas intervenientes ao processo produtivo, notadamente às receitas, investimentos e depreciações.

Em relação a aspectos da modelagem econômica da produção agrícola, outra vertente de aprimoramento metodológico seria a de se considerar outras distribuições estatísticas para a caracterização da variabilidade produtiva dos grãos praticados na região de estudo. Conforme visto, a metodologia proposta para a prática de alocação e regulação da oferta de água nesta monografia é bastante sensível aos valores de produtividade agrícola e, dessa maneira, requerem investigações mais aprofundadas nesse sentido.

Ademais, outro viés analítico que se propõe para aprimoramentos futuros, ou mesmo a utilização prática dessa metodologia, seria o de se aplicar distribuições de frequência à série histórica de preços de grãos agrícolas e incorporar essa variável como sendo mais um fator – ou até mesmo o principal - de grande relevância sobre a renda percebida pelo irrigante em uma determinada região de produção agrícola com forte presença da irrigação.

Sobre a segunda demanda econômica estudada – produção de energia elétrica - as conclusões em relação ao valor da água estão intrinsecamente ligadas às potencialidades e limitações do modelo matemático utilizado no planejamento da operação energética do sistema elétrico brasileiro, o NEWAVE. Uma vantagem da metodologia contida nesse modelo está no fato de o mesmo aferir o custo de utilização da água para a hidroeletricidade a partir do custo de oportunidade da geração termelétrica, a qual detém um mercado de preços estruturado na economia real. Ademais, o algoritmo do NEWAVE detém uma estratégia robusta quanto à consideração da ocorrência estocástica da água, avaliando, de maneira abrangente, o risco envolvido no planejamento da operação hidroenergética, a partir de cenários de afluências futuras (até o horizonte de cinco anos à frente), geradas por meio de séries sintéticas de vazões compatíveis com o histórico de observações disponível.

Todavia, apesar de toda a sofisticação metodológica do NEWAVE, considera-se que o uso dessa ferramenta no processo de alocação proposto neste trabalho implica em algumas limitações importantes, pelo fato de não ser possível avaliar a operação de usinas de forma isolada. A agregação das mesmas em um único reservatório equivalente de energia faz com que os resultados sejam de caráter mais macro-

regional, havendo pouca margem para análises de sensibilidade em torno de usinas individualmente, notadamente as com menor potência instalada, como é o caso da UHE Queimado.

Por fim, a disposição das curvas de demanda econômica em um mesmo gráfico, bem como a posterior análise dos efeitos da alocação realizada no Aquanet mostrou que os resultados da simulação econômica obtida para as duas modalidades de uso da água em questão sofreram influência importante - e direta - dos parâmetros e critérios de partida. Conclui-se, portanto, que o procedimento analítico ora construído é dinâmico no tempo e, dessa maneira, deve ser continuamente atualizado, não só em relação à sua metodologia propriamente dita – pesquisa de novas distribuições estatísticas para a produtividade agrícola, levantamento de curvas econômicas que considerem a operação de usinas de forma individualizada -, mas, também, quanto à oscilação de preços de mercado das *commodities* envolvidas nesses dois usos, notadamente, grãos agrícolas, petróleo e carvão (relacionado ao custo da operação de usinas termelétricas).

Não obstante, esse processo decisório sofre influência direta das decisões políticas das áreas agrícola e energética, as quais são fortemente influenciadas pelos respectivos planejamentos setoriais governamentais. O plantio de culturas de maior valor agregado, como frutas ou legumes, elevam sobremaneira a renda líquida específica por metro cúbico de água captado do manancial hídrico e, por conseguinte, o valor da água para irrigação. Por outro lado, a opção de construção de mais centrais termelétricas, em detrimento de usinas hidráulicas, aumenta o custo

de oportunidade da utilização da água estocada nos reservatórios hidrelétricos e, como consequência, o valor da água para a produção de eletricidade.

Com efeito, tem-se, nessa vertente analítica ora proposta, a maximização do produto econômico gerado na bacia hidrográfica e premia-se aquela atividade que usa o recurso hídrico de maneira mais eficiente, sem fazer distinção de uso ou de volume requerido, consoante, portanto, com uma visão mais contemporânea do conceito de desenvolvimento sustentável. Ainda nesse contexto, destaca-se a importância de se terem instrumentos analíticos calcados em alguma racionalidade servindo como ferramentas de auxílio aos processos de tomada de decisão em gestão e regulação do uso de recursos hídricos, as quais atualmente, estão sob a tutela de colegiados e órgãos legalmente constituídos para tais finalidades, como é o caso da Agência Nacional de Águas – ANA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA (2008). *Sistema de Informações Hidrológicas - Hidroweb*. Agência Nacional de Águas. Disponível em <www.hidroweb.ana.gov.br>. Acesso em julho de 2008.
- Azevedo, J.A.A., Silva, D.B., Andrade, J.M.V., Andrade, L.M. (2001). “Tensiometria Aplicada no Manejo da Irrigação por Pivô-Central na Cultura do Trigo”. *Comunicado Técnico*. N. 39. Embrapa Cerrados, Planaltina, DF, 2p.
- Azevedo, L.G.T.; Porto, R.L.L. e Zahed Filho, K. (2002). “Modelos de Simulação e de Rede de Fluxo”. In: Porto, R.L.L. (Organizador). *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Editora da UFRGS/ABRH, Porto Alegre, Brasil, 165-237.
- Bernardo, S. (1995). *Manual de Irrigação*. Editora da Universidade Federal de Viçosa, 6ª Edição, Viçosa, Minas Gerais, 657 p.
- CEMIG (2008). *Histórico de Vazões turbinadas na UHE Queimado*. Contato estabelecido com técnicos dessa instituição via correio eletrônico.
- CONAB (2008). *Central de informações agropecuárias da Companhia Nacional de Abastecimento*. Disponível em <www.conab.gov.br>. Acesso em julho de 2008.
- Cordeiro Netto, O.M., Baltar, A.M. e Pimentel, C.E.B. (2000). “Critérios de Outorga de Uso para Água de Irrigação: o Caso da Bacia do Rio Preto no Distrito Federal”. *Anais do I Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste*, Brasília, Brasil.
- ELETROBRÁS (2008). *Sistema de Informações sobre o Potencial Hidrelétrico Brasileiro – SIPOT*. ELETROBRÁS. Acesso em setembro de 2008.
- EMATER (2008). *Custos de Produção de Grãos no Distrito Federal*. Disponível em <www.emater.df.gov.br>. Acesso em junho de 2008.
- Graham, L.P., Labadie, J.W., Hutchison, I.P.G. e Ferguson, K.A. (1986). “Allocation of Augmented Water Supply Under a Priority Water Rights System”. *Water Resources Research*, 22(7), 1083-1094.
- Griffin, R.C. (1998) “The Fundamental Principles of Cost-Benefit Analysis”. *Water Resources Research*, 34 (8), 2063-2071.
- Guerra, A.F. e Jacomazzi, M.A. (2001a). “Método do Tanque Classe A para Irrigação Suplementar da Cultura de Trigo no Cerrado”. *Comunicado Técnico*, n. 58. Embrapa Cerrados, Planaltina, DF, 2p.
- Guerra, A.F. e Jacomazzi, M.A. (2001b). “Método do Tanque Classe A para Irrigação Suplementar da Cultura de Milho no Cerrado”. *Comunicado Técnico*, n. 59. Embrapa Cerrados, Planaltina, DF, 2p.

- Guerra, A.F., Rodrigues, G.C., Nazareno, R.B. (2002). "Uso do Tanque Classe A para Irrigação do Feijão Pérola no Cerrado". *Comunicado Técnico*, n.84. Embrapa Cerrados, Planaltina, DF, 4p.
- Guerra, A.F., Rocha, O.C., Rodrigues, G.C., Souza, P.I.M. (2005). "Método do Tanque Classe A para Irrigação da Soja, Cultivar Sambaíba, no Cerrado". *Comunicado Técnico*, n. 120. Embrapa Cerrados, Planaltina, DF, 3p.
- Heinz, I., Pulido-Velazquez, M., Lund, J.R. e Andreu, J. (2007). "Hydro-economic Modeling in River Basin Management: Implications and Applications for the European Water Framework Directive". *Water Resources Management*, 21, 1103-1125.
- IBGE (2007). *Sítio Institucional do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. Disponível em <www.ibge.gov.br>. Acesso em julho de 2008.
- Just, R.E. e Weninger, Q. (1999). "Are Crop Yields Normally Distributed?" *American Journal of Agricultural Economics*, 81 (2), 287-304.
- Ker, A.P. e Coble, K. (2003). "Modeling Conditional Yield Densities". *American Journal of Agricultural Economics*, 85 (2), 291-304.
- Labadie, J.W. (2004). "Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(2), 93-111.
- Moreira, A.R.B., Seroa da Motta, R. e Rocha, K. (2003). "A Expansão do Setor Elétrico Brasileiro de Energia Elétrica: Falta de Mercado ou de Planejamento." *Notas Técnicas*. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Rio de Janeiro, Brasil. 17p.
- Mueller, C. C. (2007). *Os Economistas e as Relações entre o Sistema Econômico e o Meio Ambiente*. Editora Universidade de Brasília, Brasília, Brasil. 562 p.
- ONS (2004). *Evaporações Líquidas nas Usinas Hidrelétricas*. Operador Nacional do Sistema Elétrico, Rio de Janeiro, Brasil. 61p.
- ONS (2008a). *Sítio Institucional do Operador Nacional do Sistema Elétrico*. Disponível em <www.ons.org.br>. Acesso em abril de 2008.
- ONS (2008b). *Relatório Mensal de Previsão de Vazões e Geração de Cenários de Afluências*. Operador Nacional do Sistema Elétrico, Rio de Janeiro, Brasil. 58p. Disponível em <www.ons.org.br>. Acesso em novembro de 2008.
- PBHSF (2004). *Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco – PBHSF (2004-2013)*. Publicação da Agência Nacional de Águas – ANA. Brasília, DF. Disponível em <www.ana.gov.br>. Acesso em maio de 2008.
- Pereira, M.V.F. e Pinto, L.M.V.G. (1985). "Stochastic Optimization of a Multireservoir Hydroelectric System: A Decomposition Approach". *Water Resources Research*, 21 (6), 779-792.

- Pereira, M.V.F. (1989). "Optimal Stochastic Operations Scheduling of Large Hydroelectric Systems". *Electrical Power and Energy Systems*, 11 (3),161-169.
- Pereira, M.V.F., Campodónico, N. e Kelman, R. (1998). "Long-term Hydro Scheduling Based on Stochastic Models". *Conference on Electrical Power Systems Operation and Management (EPSOM'98)*, Zurich, Switzerland. 22p.
- Pindyck, R. S. e Rubinfeld, D. L. (2002). *Microeconomia*. Prentice-Hall, 5ª edição, São Paulo.
- Porto, M. e Lobato, F. (2004). "Mechanisms of Water Management: Economics Instruments and Voluntary Adherence Mechanisms". *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 1 (2), 131-146, Santiago, Chile.
- Porto, R.L.L., Roberto, A.N., Schardong, A., Mello Júnior, A.V., Teixeira, C.A., Oliveira, C.P.M., Castro, H.L., Lisboa Neto, H., Palos, J.C.F., Zahed Filho, K., Porto, M., Carvalho, M.A. e Marcellini, S.S. (2003). "Sistema de suporte à decisão para análise de sistemas de recursos hídricos". In: Vieira da Silva, R.C. (Editor). *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 6*. Editora da ABRH, Porto Alegre, Brasil, 93-240.
- Sano, E.E., Lima, J.E.F.W., Silva, E.M. e Oliveira, E.C. (2005). "Estimativa da Variação na Demanda de Água para Irrigação por Pivô-Central no Distrito Federal entre 1992 e 2002." *Engenharia Agrícola*, 25 (2), 508-515, Jaboticabal, São Paulo, Brasil.
- SEINFRA (2006). *Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal*. Secretaria de Infra-Estrutura e Obras do Distrito Federal, Brasília, Brasil.
- Seroa da Motta, R. (1998). *Manual para Valoração Econômica de Recursos Ambientais*. Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, Brasília, Brasil.
- Wurbs, R.A. (1996). "Reservoir-System Simulation and Optimization Models." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 119(4), 455-472.
- Yeh, W. (1985). "Reservoir Management and Operation Models: A State-of-the-Art Review." *Water Resources Research*, 21 (12), 1797-1818.
- Young, R.A. (1996). *Measuring Economics Benefits for Water Investments and Policies*. World Bank Technical Paper No. 338. The World Bank, Washington D.C., U.S.A.