

Integração dos Componentes Econômico e Hidrológico na Modelagem de Alocação Ótima de Água para Apoio a Gestão de Recursos Hídricos: Uma Aplicação na Bacia do Rio Pirapama

Márcia G. Alcoforado de Moraes

Professora Adjunta, Departamento de Economia, Universidade Federal de Pernambuco

Yony Sampaio

Professor Titular, Departamento de Economia, Universidade Federal de Pernambuco

José Almir Cirilo

*Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Civil,
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil*

Resumo

Este artigo apresenta a aplicação de um modelo econômico-hidrológico integrado para gestão de recursos hídricos, na bacia do rio Pirapama, Estado de Pernambuco. Integra um grande número de relações físicas, econômicas, institucionais e agronômicas numa plataforma única para subsidiar decisões quanto a alocação ótima de água entre os usos alternativos e vinhoto para fertirrigar áreas plantadas de cana a montante da barragem Pirapama. O modelo envolve um grau de não-linearidade significativo e inclui mais de 10.000 variáveis e restrições, o que permite classificá-lo dentro da categoria de sistemas não-lineares grandes e complexos. Para implementar a referida abordagem utiliza o método *piece-by-piece* (Cai et alii 2001), através do *General Algebraic Modeling System*, software de alto nível utilizado para resolução de problemas de programação não-linear. A plataforma descrita tanto pode servir como uma ferramenta de auxílio na avaliação de políticas de água, como sistema de apoio a decisão das questões operativas hidrológicas.

Palavras-chave: Alocação Ótima de Água, Modelos Econômico-Hidrológicos Integrados, Apoio a Decisão na Gestão de Recursos Hídricos, Otimização Não-Linear; Políticas de Alocação de Água

Classificação JEL: C60, C61, O12, O13, O21, L95, Q20, Q21, Q25, Q28

Abstract

This paper introduces Integrated Economic-Hydrologic water modeling at the basin scale, that can provide essential information for policymakers in resource allocation decisions, applied to the Pirapama river basin, in Pernambuco state. Includes hydrologic, institutional, agronomic and economic relationships in a unique framework in order to identify the best allocation of the water resources among their multiple uses before Pirapama reservoir. Furthermore, the best allocation of the alcohol production process's effluents is also identified. The model has a significant non-linearity level and includes more than 10 thousands variables and equations, so can be considered a complex non-linear system. The *piece-by-piece* method (Cai et alii 2001) is implemented using the General Algebraic Modeling System (GAMS) to solve this system. GAMS is a high level software to solve mathematical programming problems. The results show the effectiveness of the model for water policy analysis and like a decision support system of the hydrologic questions.

1. Introdução

Existem duas estratégias fundamentais para lidar com escassez de água nas bacias hidrográficas com problemas de disponibilidade hídrica: gestão de oferta e gestão de demanda. A primeira envolve atividades para localizar, desenvolver e explorar novas fontes de água e segundo Ribeiro (2000) foi até há bem pouco tempo, a única estratégia usada no Brasil. A estratégia de gestão de demanda relaciona-se com incentivos e mecanismos que promovam o uso eficiente de água. Assim, a idéia é que uma grande parte da água para atender novas demandas, deva vir de água poupada dos usos existentes, através de uma política de realocação adequada da água (McKinney et alii 1999).

Na realidade, a definição e/ou reforma das políticas de alocação de água são cada vez mais importantes não só para atender as demandas de água através da poupança dos usos existentes; mas também para aumentar os benefícios do uso e melhorar a qualidade da água e dos solos. No entanto, é necessário entender melhor e avaliar os efeitos das diversas políticas comparando as existentes. Para isso, é fundamental que se utilize modelos do mundo real, aptos a analisar as conseqüências, tanto ambientais quanto econômicas de decisões de políticas de alocação tanto em nível de bacia, como de cada usuário. A identificação da alocação ótima de água entre os múltiplos usos, subsidia os tomadores de decisão a estabelecer políticas que levem à eficiência econômica.

Este trabalho apresenta as principais formulações de um modelo econômico-hidrológico integrado desenvolvido na UFPE (Moraes 2003), numa parceria entre o Laboratório de Hidráulica e o Departamento de Economia, com recursos do CT-HIDRO / FINEP. Usa os mesmos fundamentos teóricos

* Recebido em dezembro de 2004, aprovado em outubro de 2005.
E-mail address: marciagamoraes@yahoo.com.br.

da modelagem desenvolvida no *International Food Policy Research Institute* (Rosegrant et alii 2000) e já utilizada em algumas bacias do mundo, a saber: Maipo, no Chile (Rosegrant et alii 2000) e Mekong, no Sudeste Asiático (Ringler 2001).

Inicialmente descreve-se a fundamentação teórica do modelo, tratando a questão da alocação de recursos escassos com as peculiaridades do recurso água. São apresentados alguns aspectos referentes a integração dos componentes econômico e hidrológico na modelagem de alocação ótima em nível de bacia. Os princípios básicos da modelagem são apresentados através da aplicação na bacia do Pirapama. A modelagem propriamente dita é descrita através explicitação da função-objetivo e todas as restrições. Finalmente, apresentam-se os resultados e as idéias para continuidade da pesquisa.

2. A Fundamentação Teórica do Modelo

A questão da alocação do recurso água, quebra alguns dos pressupostos que asseguram o atendimento do Primeiro Teorema do Bem-Estar, sendo um deles: a questão de que cada agente toma decisões de consumo e produção sem se preocupar com o que os outros agentes estão fazendo. Na realidade, a poluição e o uso da água de um usuário a montante de um rio, impactam a satisfação do usuário a jusante. Diz-se que o usuário à montante do rio impõe ao usuário à jusante uma externalidade.

Basicamente, existem dois critérios utilizados para fazer a comparação de estados sociais: O critério de Pareto e a Análise Custo-Benefício. A Análise Custo-Benefício pode ser usada para gerar as informações necessárias a estipular alvos reguladores, quando o ótimo de Pareto não pode ser utilizado. A quantidade ótima alocada para cada usuário, deve ser aquela com a melhor relação custo-benefício, ou seja, a quantidade que maximiza o benefício social líquido.

Diante disso, a nossa meta reguladora, ou alocação ótima, será obtida resolvendo-se um problema de otimização de uma função que agrega os benefícios dos usuários agrupados por categorias de uso, bem como os custos sociais dados através da consideração dos custos individuais devidamente agregados. Para isso, é extremamente pertinente um modelo econômico-hidrológico integrado, desenvolvido pelo IFPRI (Rosegrant et alii 2000), e usado em diversas bacias do mundo (Ringler 2001).

3. Aspectos da Integração dos Componentes Econômico e Hidrológico na Modelagem em Nível de Bacia

McKinney et alii (1999) afirmam que a decisão de políticas de alocação de água apropriadas pode se beneficiar diretamente da melhoria ou evolução da modelagem de alocação de água em nível de bacia. Ademais, a adoção da bacia hidrográfica como unidade territorial de planejamento é um dos princípios balizador do novo

arranjo setorial dos recursos hídricos no Brasil, contido na nova política nacional para o setor de recursos hídricos.

Em nível de bacia, mesmo os primeiros modelos de gestão de água, que eram praticamente restritos a planejamento e projeto, já reconheciam a necessidade de combinar considerações econômicas e hidrológicas neste nível de análise. A integração da questão econômica em modelos, em nível de bacia, requer a incorporação de funções de produção para agricultura que incluam água como uma entrada e funções de demanda para água nos usos doméstico e industrial, para estimar o uso e o valor da água por setor. É também recomendável que se estime o valor de outros tipos de demanda para água dentro da bacia, tais como demandas ambientais, de qualidade de água, de lazer e de geração de energia (McKinney et alii 1999).

Apesar do reconhecimento da importância da integração dos aspectos econômico-hidrológicos, especialmente nos estudos voltados a avaliar alternativas e políticas de alocação de água, não se vêm conseguindo êxito, de acordo ainda com a revisão de literatura encontrada em McKinney et alii (1999). Normalmente, o que ocorre é que ou a componente hidrológica ou a econômica dominam. Assim, os estudos com ênfase hidrológica levam em conta componentes de controle do sistema e hidrológicos de uma forma detalhada, com a componente econômica sendo considerada num nível de agregação de benefícios muito alto. Por outro lado, a ênfase nos estudos econômicos têm sido na análise de “input/ output” e na otimização de benefícios líquidos sem uma boa modelagem hidrológica.

O desafio dos novos trabalhos de modelagem em nível de bacia, é superar os obstáculos através da integração das relações econômicas dentro de modelos hidrológicos da bacia, tornando possível a determinação simultânea da oferta e demanda da água, bem como os benefícios econômicos advindos da mesma dentro da bacia. Dessa forma, a operação do sistema hidrológico é dirigida por múltiplos objetivos sócio-econômicos e ambientais e o uso da água, incluindo tanto a questão de quantidade como de qualidade é diretamente simulada ou restrita pela modelagem hidrológica (McKinney et alii 1999).

A plataforma assim obtida tanto pode servir como uma ferramenta de auxílio na avaliação de políticas de água, como um sistema de apoio a decisão das questões operativas hidrológicas.

No desafio de desenvolver modelos que realmente integrem as componentes econômicas e hidrológicas existem duas abordagens: A “modelagem compartimentada” e a “modelagem holística”. Na primeira, tratam-se os componentes hidrológico e econômico como sub-modelos cujas soluções individuais são modificadas por algum método de coordenação que una as mesmas. Na modelagem holística, ao contrário, os sub-modelos são combinados em um único, que em geral é resolvido de uma só vez (Cai et alii 2001).

Cai et alii (2001) acrescentam que a abordagem da “modelagem segmentada” é mais largamente usada para sistemas grandes e complexos, devido ao fato de que resolver cada segmento é muito mais fácil do que resolver o modelo inteiro. Entretanto, em geral é difícil encontrar um método de coordenação destas soluções

compartimentadas para produzir a solução do modelo inteiro. Na modelagem holística os componentes do modelo são estreitamente conectados em um único modelo, de forma que a informação entre os mesmos ocorre endogenamente. A desvantagem aqui é que grandes modelos nesta abordagem nem sempre possuem solução nos softwares existentes. Assim, a princípio o grau de detalhe e complexidade deveria ser reduzido para se adotar esta última abordagem.

A utilização de métodos de decomposição para “modelagem holística” oferece em geral a saída para este dilema. Estes métodos operam de uma forma similar a “modelagem compartimentada”, decompondo o “modelo holístico” em sub-modelos, resolvendo estes sub-modelos individualmente, e encontrando uma solução para o modelo primário através de modificações das soluções de cada sub-modelo iterativamente. Assim, por exemplo, obter-se-ia a solução do primeiro sub-modelo, que seria modificada ao se resolver o segundo e assim por diante. Salienta-se que a vantagem da técnica de decomposição em relação a “modelagem compartimentada” é que a primeira implementa as conexões entre os componentes do modelo endogenamente, enquanto a última trata as conexões exogenamente.

4. Área de Estudo de Caso e Princípios Básicos da Modelagem

A bacia hidrográfica do Rio Pirapama localiza-se nas mesorregiões metropolitana do Recife – RMR e Mata Pernambucana. Ocupa uma área de cerca de 600km² e tem no curso d'água principal uma extensão aproximada de 80km. O Pirapama é o manancial mais importante em um raio de 40km da cidade do Recife. Os problemas no setor de recursos hídricos desta região mais sérios são: insuficiente produção de água tratada, elevadas perdas e altos desperdícios, precário atendimento dos sistemas de esgotamento sanitário e de limpeza pública e altos índices de poluentes (Ribeiro 2000). Como consequência importante, dentre outras, aponta-se o racionamento a que vem sendo submetida a RMR há alguns anos, que tem comprometido a regularidade do atendimento à população, principalmente nas épocas de prolongada estiagem. Além disso, os sistemas de abastecimento de água dos outros municípios integrantes da bacia que não fazem parte da RMR, como Pombos, Escada e Vitória de Santo Antão, já estão enfrentando problemas para atender as crescentes demandas por água potável (Carrera-Fernandez 1999). A questão da qualidade no Rio Pirapama é uma questão crítica. Todo o trecho do rio atualmente monitorado apresenta-se em desacordo com os objetivos de qualidade da água, ou seja, a maioria dos parâmetros utilizados na classificação do rio está fora dos padrões estabelecidos pela legislação.

Para resolver problemas relativos ao abastecimento humano, há projetos de dois reservatórios: um no afluente Águas Claras (Abastecimento de Vitória) e o outro no próprio rio Pirapama para o abastecimento de Recife (ambos foram considerados no modelo para determinação da alocação ótima). O reservatório Pirapama está iniciando sua operação e sua entrada modificará os usos atuais da água, uma vez que exigirá maior eficiência por parte dos usuários. Além disso, o problema da

qualidade da água deve se agravar com o represamento das águas imposto pelo reservatório. A água do Pirapama, avaliada no âmbito do Projeto Pirapama¹ no período de 1990-1996, já apresentava níveis preocupantes de fósforo total, sendo que estes níveis tendem a sofrer elevação com a implantação da barragem.

Isto leva o reservatório Pirapama, apenas iniciando sua operação, a já estar numa situação de risco com relação a uma possível eutrofização.² A avaliação do potencial de eutrofização no reservatório e a identificação de ações que devem ser adotadas no sentido de minimizar o aporte de nutrientes se colocam como questões prioritárias, considerando-se as repercussões que podem advir sobre a qualidade da água para abastecimento público em decorrência da eutrofização (Gama 1998).

O primeiro trecho da bacia onde o modelo é aplicado, vai da nascente até o reservatório Pirapama, ou seja, se constitui em todo o trecho a montante da barragem. Este é um trecho de crucial importância, pois nele está concentrada a maioria das agroindústrias localizadas na bacia, cuja produção de efluentes é a principal fonte de carga orgânica nesta área. Além disso, o segmento é responsável por todo o aporte de água afluente ao reservatório Pirapama. Dentre os fatores que levam à ocorrência de poluição no trecho modelado por este estudo, os mais significativos provêm da presença do vinhoto. Localizam-se no trecho modelado três destilarias de álcool: a JB, a Sibéria e a Liberdade. A produção das mesmas à época da elaboração do Diagnóstico Integrado (Gama 1998) era de cerca de 94.000 m³ ano, ou seja, 522.000 litros/ dia, possuindo o vinhoto dessas indústrias uma carga orgânica potencial de 226.335 kgDBO/dia com um equivalente populacional de 4.2 milhões de habitantes.

A única prática atualmente adotada para disposição final deste vinhoto é a de seu aproveitamento na fertirrigação. A questão que vem sendo colocada decorre das observações feitas em campo e principalmente da avaliação dos dados de monitoramento da qualidade da água do rio Pirapama: é que parte deste vinhoto lançado no solo atinge os cursos d'água, seja através do escoamento direto do vinhoto no período da irrigação, seja através do arraste superficial no período das chuvas ou mesmo através do escoamento subterrâneo.

Assim, o modelo não só trata a questão da alocação da água de forma a otimizar o bem-estar de todos os usuários no que se refere ao atendimento de disponibilidades, como também a questão da qualidade – crítica para o Pirapama especialmente depois que foi construído o reservatório – é considerada ao se incluir o uso da fertirrigação. Busca-se ainda definir a alocação ideal do vinhoto nas áreas plantadas de cana ao longo da bacia, de forma a garantir níveis de qualidade adequados aos usos. Ao mesmo tempo, na medida em que se inclui o benefício da fertirrigação na função-objetivo e as questões da qualidade e quantidade de água são tratadas

¹ O Projeto Pirapama foi motivado pela importância da bacia para a Região Metropolitana do Recife (RMR). O mesmo envolveu uma estratégia multidisciplinar e interinstitucional para propor diretrizes a fim de minimizar os atuais e potenciais conflitos relativos ao crescimento econômico, gerenciamento ambiental e desenvolvimento social na bacia.

² Eutrofização é o crescimento excessivo das plantas aquáticas, a níveis tais que sejam considerados como causadores de interferências com os usos desejáveis do corpo d'água. O principal fator de estímulo é um nível excessivo de nutrientes no corpo d'água, principalmente nitrogênio e fósforo.

como restrições, o processo está considerando diluição de cargas orgânicas como um outro uso, e a disponibilidade será certamente afetada. Em síntese, outros usos deverão ser restringidos para que o rio possa se recuperar através do processo de autodepuração.

A inclusão do fenômeno de autodepuração dentro do modelo de otimização traz consigo a possibilidade do alcance dos seguintes objetivos (Von Sperling 1996): **Utilizar a capacidade de assimilação dos rios:** Dentro de uma visão prática, pode-se considerar que a capacidade que um corpo d'água tem de assimilar despejos, sem apresentar problemas do ponto de vista ambiental, é um recurso natural que pode ser explorado. Esta visão realista é de grande importância em nossas condições, em que a carência de recursos justifica tal utilização. **Impedir o lançamento de substâncias poluidoras acima do que possa suportar o corpo d'água:** Desta forma, a capacidade de assimilação do corpo d'água pode ser utilizada até um ponto aceitável e não prejudicial, não sendo admitido o lançamento de cargas poluidoras acima deste limite.

A idéia para obter a alocação ótima através da maximização do benefício social líquido, bem como avaliar estratégias de implementação da referida meta, foi partir de um modelo hidrológico-agronômico-econômico-institucional integrado desenvolvido por um grupo de pesquisa conjunta sendo membros: International Food Policy Research Institute (IFPRI); Center for Research in Water Resources (CRWR) na Universidade do Texas, Austin e International Waterem Austin e International Water Management Institute (IWMI). O modelo atendia aos objetivos estabelecidos além de estar alinhado com as tendências atuais para a modelagem em nível de bacia.

O referido modelo representa a bacia hidrográfica como um todo, através de uma rede de nós e links. Todos os usos, tanto os consuntivos como os não-consuntivos, são considerados. Os benefícios líquidos de cada uso são implementados numa função-objetivo única, restrita por relações hidrológicas, ambientais e institucionais (Rosegrant et alii 2000).

Outra importante característica do modelo do IFPRI é a abordagem utilizada para combinar os diversos componentes do modelo integrado. Utiliza-se a “modelagem holística” e o método de decomposição a partir de temas, para obter dois sub-modelos que são resolvidos iterativamente. O primeiro deles é resolvido e os resultados são usados como uma “boa” condição inicial para o seguinte. Restrições adicionais surgem com o segundo sub-modelo, mas a busca da solução é simplificada desde que se tem um bom ponto de partida. A decomposição de temas neste caso foi usada para integrar modelagem de quantidade e de qualidade.

Na realidade, o modelo do IFPRI simula um constituinte de qualidade, que é muito importante para a questão da irrigação e impacta na produção de várias culturas que é a salinidade. Assim, o primeiro sub-modelo trata o balanço de quantidade e usa as funções de produção das culturas considerando fixa a condição de qualidade, ou seja, a salinidade é fixa. Então no segundo sub-modelo se introduz o balanço e o transporte de qualidade, de forma a encontrar valores razoáveis para ambos salinidade e fluxos.

O modelo desenvolvido para o Pirapama, assim como o do IFPRI, inclui constituintes de qualidade, sendo que diferentes de salinidade. No caso da bacia do Pirapama, o problema maior está relacionado com compostos orgânicos usados para fertirrigar as áreas de cana que existem em toda a bacia, o que vem acarretando níveis de Oxigênio Dissolvido em vários trechos do rio, abaixo do valor estabelecido para as classes a que pertencem. Assim, os constituintes que consideramos são: Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Oxigênio Dissolvido (OD). O desafio maior aqui é que esses constituintes, ao contrário da salinidade, sofrem um decaimento ao longo do rio através do processo de autodepuração do rio, e as equações que governam este processo são altamente não-lineares. A abordagem que foi usada para conseguir obter uma solução, foi da mesma forma que no modelo do IFPRI, utilizar a “modelagem holística” e o método de decomposição por temas com dois sub-modelos: o de quantidade e o de qualidade.

5. A Modelagem

O modelo elaborado na UFPE representa a bacia hidrográfica como um todo, através de uma rede de nós e links (Rosegrant et alii 2000), nos quais os nós representam entidades físicas e os links, as conexões entre estas entidades. Os nós podem ser de dois tipos: os nós-fonte, que representam entidades físicas tais como: rios, reservatórios, águas subterrâneas, etc; e os nós-demanda, que podem ser: agroindústrias, cidades, pequenas centrais hidroelétricas-PCHs, etc. (ver Figura 1).

Há também os nós de demanda por efluentes, que são as áreas plantadas de cana ao longo do curso d'água em que se lançam efluentes do processo industrial das destilarias, na chamada fertirrigação.

Os links entre os nós podem representar captações de usuário e lançamentos. Estes lançamentos representam tanto a contribuição da drenagem pluvial natural (lançamentos naturais médios), no que se refere à quantidade e à qualidade de água dos trechos e dos afluentes, como os fluxos de retorno diretos e indiretos de alguns nós-demanda.

Os retornos diretos são conhecidos e nesta área modelada constituem-se nos lançamentos pelas agroindústrias das águas usadas no processo de refrigeração e que retornam ao rio. Poderiam ter sido usados também para representar fontes de contaminação tais como esgotos ou outros tipos de descargas diretas provenientes de usuários.

Os retornos indiretos pretendiam representar as possíveis formas de chegada do efluente usado na fertirrigação ao rio, tais como: uma suposta volta de uma proporção do quantitativo do efluente lançado na terra para o rio e sobras de vinhaça que poderiam, através de vazamentos ou descartes em épocas de vazões mais altas, ter uma parcela delas atingindo o rio. Deve-se salientar que na aplicação em questão não foram usados estes retornos indiretos por falta de dados conclusivos sobre os mesmos. Não que eles não sejam importantes. Foi desenvolvido um modelo

de simulação de qualidade que comparou os valores observados medidos nas estações de qualidade com as formulações matemáticas do modelo Streeter-Phelps e algumas hipóteses de retorno e parâmetros conhecidos do rio. Com relação as hipóteses consideradas acerca das formas de chegada ao rio dos efluentes utilizados na fertirrigação, constatou-se que a mais significativa e que poderia explicar alguns níveis de oxigênio muito baixos apresentados nos anos utilizados como referência, é a de sobra de efluentes, vazando ou sendo descartados nos meses de entressafra de forma muito particular. No entanto, apesar de se mostrar importante, este tipo de contaminação não pôde ser levado para a plataforma de otimização.

Isto devido ao comportamento muito específico destes retornos nos dois anos observados, o que mostrou a não existência de um padrão para este tipo de volta (na realidade acredita-se que eles são irregulares e/ ou acidentais), e impediu a determinação de valores representativos para a simulação de um ano médio.

Assim, a contaminação por vinhoto foi considerada apenas através dos lançamentos naturais médios resultantes das áreas fertirrigadas. Na verdade, no caso do Pirapama, há uma parcela considerável e importante de contaminação, que se apresenta desta forma, que é exatamente a poluição trazida pelas águas da chuva (lançamentos naturais médios) ao percorrer terrenos onde se utiliza vinhoto. Procurava-se uma estimativa da carga orgânica dessas águas da drenagem pluvial natural num terreno com vinhoto, através de uma proporção da carga orgânica total do vinhoto.

Tentou-se calibrar essa proporção de acordo com o trecho (para diferenciar possíveis características do solo e distância do rio), mas o número de incógnitas inviabilizava a determinação, bem como a ausência de dados. Sendo assim, foi considerada uma proporção única – deve-se ressaltar que a bacia é pequena e não apresenta grandes diferenças de um trecho para outro – sendo a premissa de que a drenagem pluvial natural apresenta 1% da carga do vinhoto, mostrando melhores resultados na simulação e portanto adotada no modelo de otimização.

Deve-se ressaltar que o cenário de qualidade de águas assim obtido e utilizado no modelo de otimização pode ser considerado otimista em relação ao real. Diante da ausência de dados, acredita-se que os procedimentos de simulação ora descritos possibilitaram melhores estimativas dos valores necessários para a obtenção da solução ótima. É indiscutível entretanto, que deve-se procurar levantar mais detalhadamente as fontes de contaminação do rio, para que os resultados retratem melhor a situação real.

Através da Figura 1 pode-se verificar que o trecho modelado se constitui num sistema em que são agregados: 8 principais afluentes, 2 reservatórios, 2 PCHs (PCHJB e PCHCIP), 25 fontes superficiais de água e 25 áreas plantadas de cana (FIR0 a FIR24) que demandam lançamentos de efluentes agroindustriais como fertilizante. As categorias de uso consideradas foram: abastecimento humano (AH), agroindustrial (AI), geração de energia (GE) e fertirrigação(FIR). Este último, como explicado, não emprega nem compromete a água no que se refere à disponibilidade hídrica (pois usa-se na fertirrigação o vinhoto, que é um efluente da produção das destilarias) e sim impacta na qualidade da mesma.

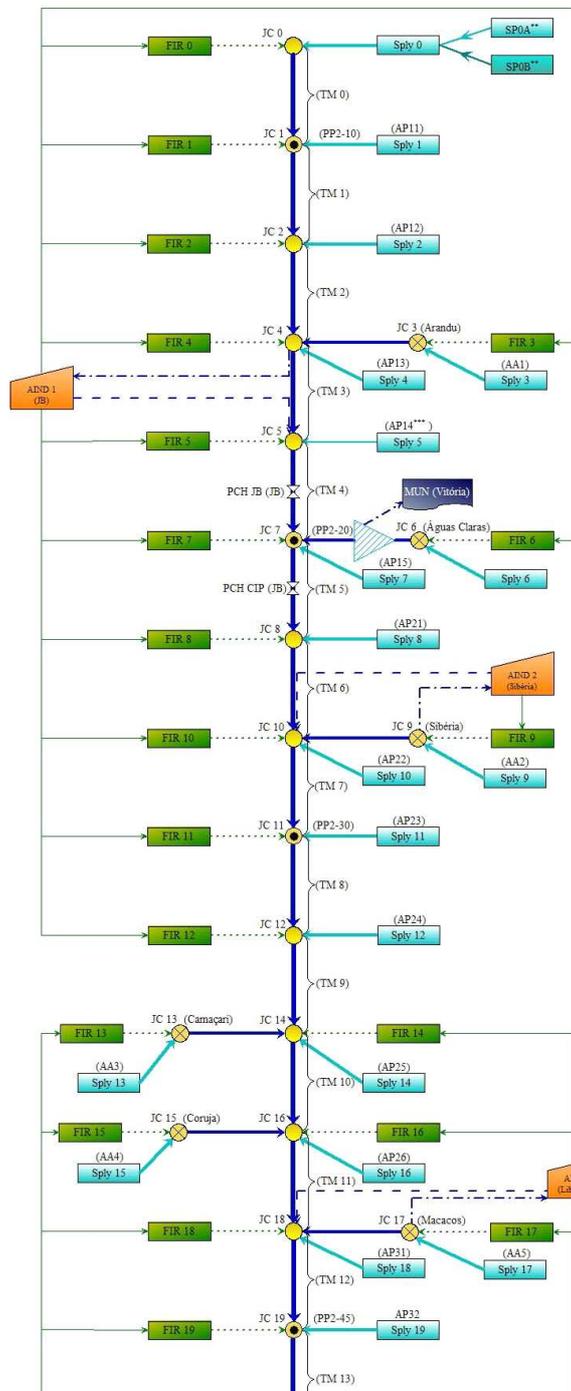


Fig. 1. Parte 1: Rede de nós e links representativo da área estudada

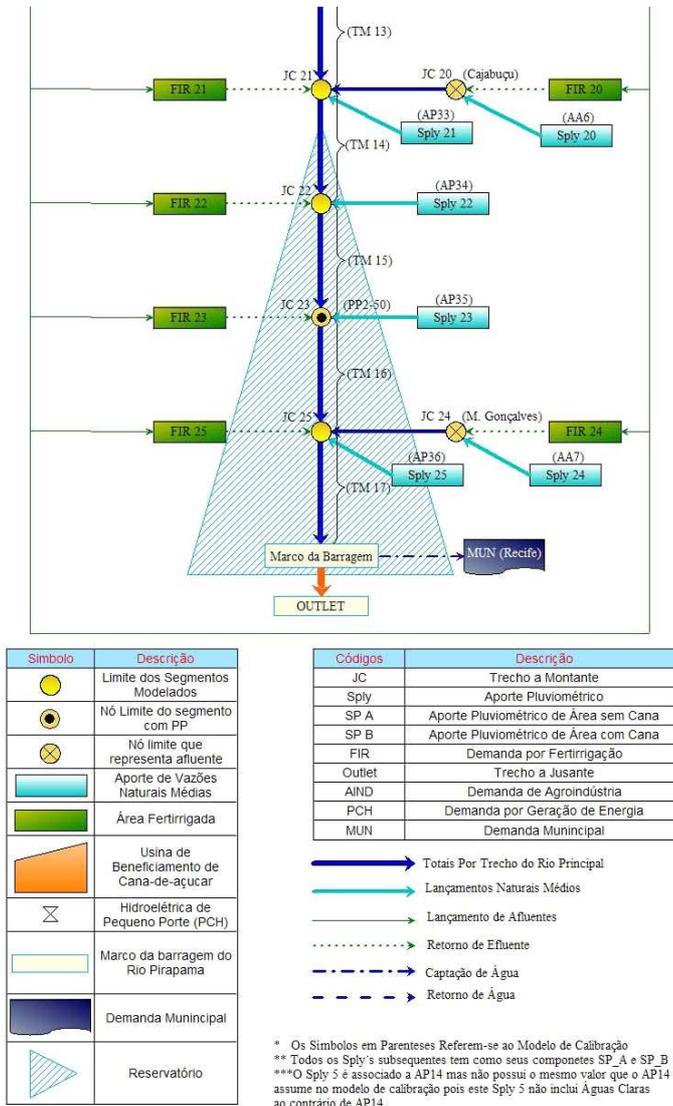


Fig. 1. Parte 2 : Rede de nós e links representativo da área estudada

O modelo contém um grande número de relações físicas e econômicas, além de incluir algumas institucionais e outras agronômicas. Os seguintes componentes são incluídos:

- (i) Componentes de Hidrologia Qualitativa – levam em conta o balanço hídrico com respeito à quantidade, nos nós que representam os diversos trechos do rio, bem como nos seus afluentes e reservatórios. Não foi levada em consideração nenhuma contribuição de águas subterrâneas por não se dispor de dados, mas

estas fontes podem ser facilmente incluídas no modelo;

- (ii) Componentes de Qualidade das Águas – inclui o balanço, bem como o processo de decaimento e transporte ao longo do rio, de dois constituintes básicos utilizados para avaliar qualidade de água: o Oxigênio Dissolvido (OD) e a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). São consideradas apenas as principais fontes poluidoras, que são os efluentes lançados pelas agroindústrias nas áreas plantadas de cana e demais fertilizantes/ pesticidas usados na referida lavoura. Além disso, avalia-se também indiretamente a questão do aporte de fósforo aos reservatórios, de forma a avaliar a possível eutrofização dos mesmos;
- (iii) Componentes Econômicos – funções de benefício líquido para os usos consuntivo e não-consuntivo, bem como simulação de funções de produção para os principais produtos industriais da bacia levando em conta a água alocada como insumo;
- (iv) Componentes Institucionais – regras e políticas institucionais tais como outorga, níveis mínimos de constituintes de qualidade permitidos, fluxos mínimos exigidos por demandas ecológicas, etc;
- (v) Componentes Agronômicos – são consideradas diferentes produtividades da cana-de-açúcar em função do efluente aplicado no terreno como fertilizante, no processo de fertirrigação.

Decisões são tomadas em diversos níveis através do modelo. Em nível de bacia, determinam-se níveis de operação dos sistemas hidrológicos e de alocação de água entre usuários. Em nível de usuário, determina-se uma quantidade e localização ótima de aplicação de efluentes dentre as diversas áreas plantadas de cana disponíveis para colheita cada mês. O modelo é de curto prazo, no específico horizonte de tempo de 1 ano, determinando alocações de água e vinhoto a cada mês, assumindo que as condições de oferta e demanda são relativamente estáveis. As equações do modelo incluem várias formas de não-linearidade, em especial aquelas que tratam a questão da qualidade. ³

A abordagem utilizada para buscar uma solução viável com os softwares de Programação Não-Linear disponíveis para tão complexo sistema foi a “modelagem holística” com método de decomposição por temas. Para implementar a referida

³ Para se ter uma idéia do tamanho e do grau de não-linearidade do modelo, algumas medidas fornecidas pelo software utilizado para buscar a solução são dadas a seguir: Número de Restrições: 22295; Número de Variáveis: 18885; Número de elementos no Jacobiano não-nulos: 44636; Número de elementos no Jacobiano não-constantas: 10828. O número de elementos da matriz Jacobiana não-nulos, bem como o número destes que não são constantes, fornece uma medida da não-linearidade do modelo. Sendo o Jacobiano a matriz de derivadas primeiras das restrições em relação a cada uma das variáveis, a proporção do número de elementos não-nulos que não são constantes dá uma idéia do grau de não-linearidade do modelo. Desde que neste caso, em torno de 25% os elementos não-nulos no Jacobiano são não-constantas, denota-se um grau razoável de não-linearidade. Além disso, tendo-se mais de 10.000 variáveis e restrições, pode-se considerar o modelo dentro da categoria de sistemas não-lineares grandes e complexos. Cai et alii (2000) relatam que, a despeito de grandes melhorias nos softwares de modelagem e solução, bem como na evolução do hardware, resolver grandes modelos de otimização não-lineares continua difícil. As dificuldades crescem muito à medida que o tamanho e o grau de não-linearidade aumentam. Até o melhor software pode falhar com grandes modelos não-lineares, especialmente nas primeiras tentativas do processo de modelagem quando “boas” condições iniciais não são conhecidas.

abordagem utilizou-se o método *piece-by-piece* apresentado em Cai et alii (2001). A mesma utiliza o *General Algebraic Modeling System* (GAMS), software de alto nível utilizado para resolução de problemas de programação matemática, e sua capacidade de reiniciar arquivos. Assim, a solução de um sub-modelo é escrita num arquivo e usada como ponto de partida para o próximo sub-modelo. Todos os *solvers* disponibilizados através do GAMS para resolução de Programação não-linear são baseados no método do gradiente. Os mesmos têm sua performance dependente dos valores iniciais dados às variáveis. Uma condição inicial inadequada pode levar o *solver* a demorar mais a convergir ou até mesmo a não convergir. Isto inclui o problema muito comum em sistemas não-lineares grandes e complexos de não se chegar a uma solução viável. Por isso é usada a abordagem *piece-by-piece*, que usa o fato de que grandes modelos podem ser decompostos em várias partes, que são resolvidas sequencialmente, com cada parte sendo adicionada a cada passo. O “pedaço” ou sub-modelo é composto de restrições adicionais que vão sendo adicionadas às partes anteriores e essas restrições podem envolver novas variáveis que não existiam nos “pedaços anteriores”. No caso em estudo, tem-se dois sub-modelos e a decomposição foi feita por temas: quantidade (sub-modelo1) e qualidade de água (sub-modelo2).

A solução do sub-modelo 1, que será denotada por x^* é então utilizada como condição inicial para o segundo sub-modelo, que inclui as restrições de qualidade de águas. A solução do sub-modelo 2 é assim a solução do modelo completo. A rigor, as duas funções-objetivo, a do modelo completo e a do sub-modelo 1 são idênticas. No sub-modelo1 ressalta-se o balanço hídrico, sendo as restrições envolvidas chamadas de Restrições de Disponibilidade Hídrica. Além disso, considera-se o balanço de massa dos reservatórios, fluxos mínimos para demandas ecológicas institucionais e as restrições relativas a quantidade de efluentes lançados e consequentes valores de áreas de fertilirrigação recomendadas, o que permite cálculo de estimativas de cargas provenientes do processo.

No segundo sub-modelo, que inclui as Restrições de Qualidade de águas, calcula-se a concentração e o transporte dos constituintes de qualidade modelados e a estimação a partir de um deles da quantidade de fósforo associada que será levada aos reservatórios.

Assim, no sub-modelo1 a alocação ótima de água é encontrada sem se restringir valores de concentração dos constituintes de qualidade resultantes. Apenas a questão quantitativa é considerada. As variáveis de decisão são escolhidas de tal forma a respeitarem balanços hídricos e questões institucionais, tais como o de respeitar outorgas estabelecidas, fluxos mínimos para atender demandas ecológicas, etc. Não se considera o impacto destes lançamentos com relação a qualidade do rio. O objetivo do segundo sub-modelo é o mesmo que o primeiro – o de maximizar o benefício para a sociedade como um todo – sendo que novos valores de alocação – ainda respeitando as restrições quantitativas – devem ser encontrados de forma a resultar em constituintes de qualidade dentro dos limites estabelecidos – ou seja, que respeitem também as restrições qualitativas: os valores dos constituintes de qualidade exigidos pela legislação, de acordo com usos correntes, bem como níveis

de aporte de fósforo para prevenir um futuro processo de eutrofização.

5.1. A função objetivo

A Função Objetivo representa o benefício líquido para todos os usos considerados no modelo. Dessa forma, mensuram-se os benefícios sociais líquidos através da agregação dos benefícios e custos individuais líquidos agrupados por categorias de uso. Na aplicação da bacia do Pirapama, realizada em todo o trecho a montante do reservatório de mesmo nome, cujos principais resultados descreveremos aqui, consideraram-se as funções benefício de quatro usos e respectivos usuários, a saber: Abastecimento Humano (municípios de Recife e Vitória), Abastecimento Industrial (agroindústrias JB, Sibéria e Liberdade), Geração de Energia Elétrica (PCHJB e PCHCIP) e Fertirrigação.

A estratégia utilizada para obtenção de funções de demanda inversa para cada um dos usuários, foi usar valores de elasticidades-preço da demanda por água, obtidas nos respectivos pontos previstos de demanda, na bacia do Pirapama , para cada modalidade de uso. (Carrera-Fernandez 1999). A partir dos valores de elasticidade e do pressuposto de que os valores das mesmas são constantes⁴ ao longo da curva de demanda, obtém-se a expressão de uma função de demanda inversa através da resolução de uma equação diferencial simples. Senão vejamos:

A elasticidade-preço da demanda η é definida por:

$$\eta = (dQ/Q)/(dP/P) \quad (1)$$

Onde P é o preço no qual a quantidade observada Q é a demandada. Assumindo a elasticidade constante, a equação acima pode ser rearranjada e integrada resultando na seguinte função de demanda inversa:

$$|P| = \exp[\{\ln |Q| / \eta\} + C] \quad (2)$$

Esta função, dado que as elasticidades preço são negativas, é uma função exponencial no primeiro quadrante do eixo (P, Q) , que assintota os eixos P e Q em direção ao infinito. Assim, quando Q tende a zero o valor de P tende a infinito e tende a zero quando Q aumenta indefinidamente. Isto representa a realidade teoricamente, dado que para pequenas quantidades de água, o valor da água seria muito alto, enquanto para maiores quantidades o valor tende a diminuir. No entanto, tal função demanda impossibilitaria o cálculo dos benefícios brutos associados a uma determinada quantidade demandada, que é dado pela área sob a curva de demanda de zero até o valor alocado. Estas áreas teriam valores ilimitados. Na prática é importante que possamos mensurar e limitar estes valores. Uma função com as mesmas características da função teórica, sendo que deslocada

⁴ Embora não acurada, esta premissa é bastante razoável. Há relatos na literatura de que embora esperem-se mudanças na elasticidade à medida que os preços aumentem, não há base confiável para a realização destes ajustes.

horizontalmente e na qual possamos usar os valores absolutos das elasticidades preço é dada por:

$$|P| = \exp[\ln |Q - C_2|^{1/\eta} + C_1] \quad (3)$$

Tal função traria para valores finitos o valor da água para quantidades alocadas nulas (a curva assim deslocada passaria a interceptar o eixo dos Preços – no ponto $(0, P_1)$) além da quantidade alocada a partir da qual o valor (preço) tenderia a zero. Além disso, no ponto $(C_2, 0)$ a função não é definida, mas a partir dela os valores de alocação passariam a assumir novamente valores positivos, já que se trata de uma função módulo.

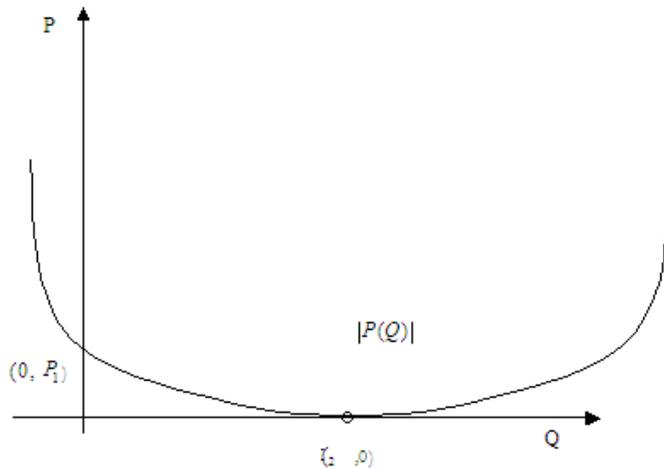


Fig. 2. Representação da função exponencial deslocada(ver equação 3)

Na realidade, espera-se que a quantidade alocada associada a um valor nulo, ou muito próximo disso – consumo autônomo(C_2) – seja tal que ao atender as necessidades do usuário plenamente, faça com que uma quantidade maior de água entregue leve a uma redução dos benefícios. Para determinar completamente a função de demanda inversa, descrita pela equação (3), precisam-se de duas condições de contorno para que as duas constantes (C_2 e C_1) sejam definidas. Toma-se para o caso dos usos consuntivos (AH e AI) a primeira condição de contorno como sendo o ponto de operação de cada usuário em valores atuais (ver Figura 3).

Os pontos de operação considerados para cada usuário consuntivo foram as outorgas cedidas pela SECTMA (Secretaria de Tecnologia e Meio-Ambiente) e os custos operacionais foram obtidos com a COMPESA(Companhia Pernambucana de Saneamento) e as agroindústrias. A segunda condição de contorno vem de estimativas do benefício bruto obtido com os valores outorgados, que deve corresponder a área sob a curva que aparece hachureada na Figura 3.

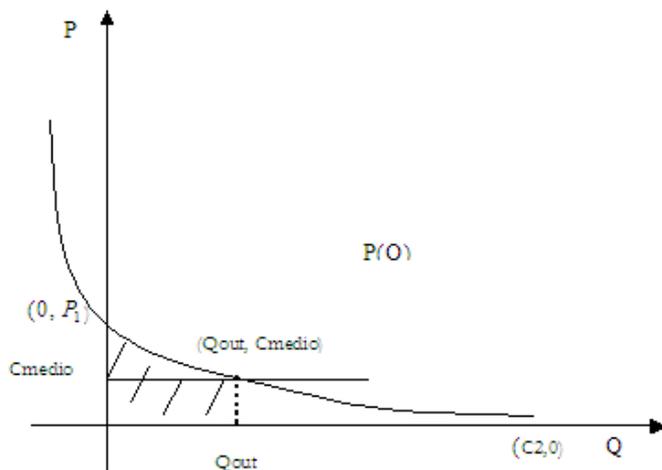


Fig. 3. Ponto de operação para os usos consuntivos

Estas estimativas de benefícios foram calculadas e consideraram-se perdas no processo de captação do abastecimento humano e das agroindústrias na região. (Carrera-Fernandez 1999). A idéia é estimar a constante C_2 e a partir daí o valor de P_1 (já relacionado a C_2 e C_1 através da primeira condição de contorno), através da aproximação dos valores estimados com os valores calculados como a área sob a curva de demanda inversa até o valor outorgado. O benefício calculado, obtido com a integração da função de demanda inversa (ver equação 3) para qualquer valor alocado, é dado por:

$$\text{Benefício(R\$/seg)} = e^{C_1} \left[\frac{C_2^{(1/\eta)+1}}{(1/\eta)+1} - \frac{|C_2 - Q_{aloc}|^{(1/\eta)+1}}{(1/\eta)+1} \right] \quad (4)$$

onde: $C_1 = \ln\left\{\frac{P_1}{|-C_2|^{1/\eta}}\right\}$ ou $e^{C_1} = \frac{P_1}{|-C_2|^{1/\eta}}$, obtido do fato de que o valor na equação (11) associado a quantidade nula é P_1 .

Q_{aloc} = Para o cálculo do benefício em questão, este valor será o valor outorgado.

Deve-se atentar para o fato de que a formulação em (4) já dá a área líquida sob a função de demanda inversa no intervalo de integração que vai de $Q = 0$ até $Q = Q_{alocado}$, considerando áreas após o valor de indefinição da função ($Q=C_2$) como áreas negativas, pois representarão redução no benefício total bruto.

Para determinar a função de demanda para o uso não-consuntivo (geração de energia elétrica) bem como para a fertilirrigação a estratégia é diferente, pois não há valores outorgados. Na verdade, o que existe nesses casos são os valores máximos que vamos considerar como sendo os próprios valores de consumo autônomo (C_2). No caso do uso para geração de energia, as duas PCH's são a fio d'água. Isto quer dizer que o aproveitamento é feito sem regularização, não se considerando nenhuma variação na queda líquida utilizada para a geração, não impactando nas outras demandas.

Para este uso pode-se considerar o consumo autônomo como sendo a capacidade máxima instalada, na realidade a vazão correspondente a essa capacidade máxima. Com este valor e estimativas do benefício obtido com o mesmo, determinamos o P1, que mais aproxime a área calculada sob a curva das referidas estimativas. A formulação que dá a área sob a curva até o ponto de indefinição é mais simples, pois é dada apenas pela primeira parte da equação (4), a saber:

$$\text{Benefício(R\$/seg)} = e^{C_1} \left[\frac{C_2^{(1/\eta)+1}}{(1/\eta) + 1} \right], \text{ com } e^{C_1} = \frac{P_1}{|-C_2|^{1/\eta}} \quad (5)$$

Com os valores de C2 e P1, fica assim completamente especificada a função de demanda inversa a ser usada para os cálculos do benefício bruto desses usuários. O valor do custo médio de geração de energia não foi necessário para este cálculo, mas será na determinação do benefício líquido. Além disso, com o mesmo pode-se ter uma idéia do ponto de operação das PCH's, já que não há solicitação de outorga. Este será o valor de vazão associado a esse custo médio na curva de demanda inversa.

Finalmente no caso da fertirrigação, os valores autônomos (C2) serão iguais para os nós fertirrigados pela mesma agroindústria e dados pela máxima área plantada de cana que atende a referida indústria, e que demanda efluentes durante cada mês de safra (5 meses).

Com as funções de demanda inversa totalmente identificadas para cada usuário, o modelo obtém valores de benefício bruto para cada um deles e a cada mês, dependendo do valor alocado, através da formulação dada pela equação (4) ou (5), dependendo do uso. O benefício líquido é resultante da subtração dos valores de custo incorridos com a obtenção deste mesmo valor alocado.

Assim, no caso do abastecimento humano e geração de energia elétrica, para cada usuário e a cada mês, o valor do benefício líquido resultante da alocação correspondente, é obtida usando a equação (6).

$$B.Liq(usuário, t) = e^{C_1} \left[\frac{C_2^{(1/\eta)+1}}{(1/\eta) + 1} - \frac{|C_2 - Q_{aloc}(usuário, t)|^{(1/\eta)+1}}{(1/\eta) + 1} \right] - C_{medio} * Q_{aloc}(usuário, t) \quad (6)$$

Onde e^{C_1} , C_2 , η e C_{medio} assumem valores dependendo do usuário, de acordo com os valores já mostrados. O valor $Q_{aloc}(usuário, t)$ deverá ser tal que atenda a todas as restrições hidrológicas (quantidade e qualidade de águas), de controle e institucionais e ainda maximize a soma de todos esses benefícios.

No caso do abastecimento industrial, além desse custo médio que aparece na equação (6) o modelo debitará do valor do benefício bruto, um custo adicional, se houver sobra de efluentes.⁵ Ocorre que o modelo considera, que caso não

⁵ A variável que mensura a sobra dos efluentes produzidos de cada agroindústria e a cada mês é tanto função da decisão de alocação de água para a referida indústria (pois esta decisão implicará na quantidade total de efluente produzido), como na decisão de alocação do vinhoto nas áreas fertirrigadas associadas a mesma.

seja possível a alocação nas áreas fertirrigadas de todo o efluente produzido pela agroindústria, a mesma deverá arcar com os custos do tratamento desta sobra.:

Na fertirrigação, há custos com o processo de aspersão do vinhoto, mas há também economia com os fertilizantes que não precisam ser usados. Além disso, dependendo do nó de demanda a ser fertirrigado, haverá ou não custos de transporte por carros-pipa, já que os sistemas de bombeamento atualmente existentes atingem apenas as proximidades das agroindústrias.

O custo de transporte foi considerado apenas para os nós de demanda por efluentes mais de 2 Km distantes da agroindústria cuja produção de vinhoto se utiliza no processo. Considerou-se que no caso de fertirrigação de áreas nestes nós, seria necessário a utilização de carros-pipa para o transporte destes efluentes. O custo então foi computado como tendo um valor por metro cúbico associado ao aluguel do carro,⁶ e um custo em função da distância em Km.⁷ O custo de transporte resulta em:

$$C_{transp}(usuario, t) = C_{carro-pipa} * Q_{aloc_vinh}(usuario, t) + 0.25 * dist_Km(usuario) \quad (7)$$

Onde $C_{carro-pipa}$ é o custo do carro-pipa em R\$/m³, $Q_{aloc_vinh}(usuario, t)$ é a quantidade de vinhoto alocada no nó de demanda naquele mês, e a $dist_Km(usuario)$ é a distância em quilômetros do nó de demanda para agroindústria cujo efluente se utiliza.

Assim, a função benefício líquido no caso da fertirrigação é dada por:

$$B.Liq(usuario, t) = e^{C_1} \left[\frac{C_2^{(1/\eta)+1}}{(1/\eta) + 1} - \frac{|C_2 - Area_{ferrig}(usuario, t)|^{(1/\eta)+1}}{(1/\eta) + 1} \right] - C_{medio} * Area_{ferrig}(usuario, t) + G_{medio1} * Area_{ferrig}(usuario, t) - C_{transp}(usuario, t) \quad (8)$$

Onde o último termo só aparece se os nós de demanda estiverem mais de 2 Km distantes da agroindústria associada. Ademais e^{C_1} e C_2 assumem valores para cada nó de demanda por efluentes⁸, η é o mesmo para todos os nós e todos os meses conforme já mostrado, e a $Area_{ferrig}(usuario, t)$ é a área de cana a ser fertirrigada,⁹ que tem que ser tal que atenda às restrições de disponibilidade hídrica (quantidade de vinhoto disponível, quantidade de cana plantada e dose de aplicação utilizada), as de qualidade de águas (níveis de OD ao longo do rio resultantes da

⁶ Segundo dados da COMPESA, o carro-pipa com água bruta é vendido a R\$ 6,30/m³, sendo a água bruta comercializada pela mesma companhia por R\$ 0,30/m³, se o usuário providencia o transporte da mesma. Considerou-se então o custo do carro-pipa como sendo de R\$ 6,00/m³.

⁷ O custo por Km utilizado foi R\$ 0,25/Km, obtido do produto entre o custo de combustível (R\$2/litro) e o consumo esperado (1/8)l/Km.

⁸ Não há diferença entre os meses, pois a área total de cana foi dividida igualmente para cada mês.

⁹ Resultante da decisão da quantidade de vinhoto lançado naquele nó de demanda em cada mês, dado pela variável $Q_{aloc_vinh}(usuario, t)$.

decisão de alocar vinhoto.) e ao mesmo tempo maximize os benefícios. Observar que para aplicar as restrições de qualidade de água precisa-se da relação entre o vinhoto lançado e a carga alocada resultante¹⁰ Esta depende da dosagem de aplicação (utilizou-se para as três agroindústrias o valor de 300m³/ha), da vazão específica média, que varia com o nó de demanda e com o mês, e do pressuposto de que 1% da concentração de matéria orgânica do vinhoto está presente nos lançamentos naturais médios proporcionais a áreas fertirrigadas.¹¹

O C_{medio} é o custo com aspersão por hectare fertirrigado. O ganho médio 1, G_{medio1} , representa a economia com os fertilizantes, relativo a mesma área onde se utilizou o vinhoto. Da mesma forma que no uso para geração de energia elétrica, onde não há valores outorgados, podemos usar os custos médios para estimar os pontos de operação de cada nó de demanda por efluentes. Ou seja, os valores de área fertirrigada de cada nó, a partir do qual o benefício marginal é menor do que o custo marginal, ou o valor de área fertirrigada correspondente ao custo médio na curva de demanda inversa. O ponto de operação encontrado, ao se levar este valor de custo médio, na curva de demanda inversa de cada nó FIR, são valores de área fertirrigada que fazem máximo o benefício líquido para cada nó e a cada mês. Observa-se que as áreas são diferentes para cada nó, e dentro deste iguais entre os meses. Ademais, embora as áreas sejam diferentes em valor absoluto, elas representam o mesmo percentual em relação a área máxima (C2) ou seja o ponto de operação de todos os FIR, igual em todos os meses, é 67,65% de C2.

Finalmente, agregando os valores dos benefícios líquidos ao longo dos meses, obtém-se no horizonte de tempo do modelo (1 ano) o benefício líquido de cada usuário. A Função-objetivo será a soma dos benefícios líquidos de todos os usuários individuais, o que representa o benefício social líquido a ser maximizado.

$$F - OBJ = \sum_{mun} B.Liq_{AH}(usuario_{mun}) + \sum_{aind} B.Liq_{AI}(usuario_{aind}) + \sum_{pch} B.Liq_{GE}(usuario_{pch}) + \sum_{firrig} BL_{fir}(usuario_{firrig}) \quad (9)$$

Assim, o $B.Liq_{AH}(usuario_{mun})$ é a soma dos benefícios líquidos anuais dos municípios, o que daria um benefício resultante do uso da água para abastecimento humano(AH), e da mesma forma para as agroindústrias(aind) no abastecimento industrial(AI), pequenas centrais hidroelétricas(PCH's) na geração de energia(GE) e nós de demanda por efluentes(firrig) na fertirrigação(FIR).

¹⁰ Esta é dada pela variável

$$C_{gloc}(usuario, t).$$

¹¹ Este valor foi obtido através de procedimentos de calibração realizados no modelo de simulação externo de qualidade utilizando 2000 e 2001 como anos de referência (Moraes 2003).

5.2. As restrições do modelo

5.2.1. Restrições de disponibilidade hídrica (sub-modelo 1)

- Equação de Balance nas Junções Principais e nas Junções Afluentes: Representa o equilíbrio quantitativo em cada um dos nós *junção* — que inicia trechos no rio principal e nos seus afluentes — e em cada unidade de tempo (mês) e traduz o fato de que o fluxo de água que entra em cada junção em qualquer mês deve ser igual ao fluxo de água que a deixa.
- Balanço de massa para os reservatórios: Esta restrição diz respeito ao balanço hídrico para um nó *reservatório* e não para um nó *junção*. Sendo assim, o balanço hídrico passa a ser de que a variação de volume no reservatório é dada pela diferença entre o volume afluente ao mesmo e o volume efluente. Em particular, foi utilizada a abordagem para balanço de massa de reservatório, que considera como volume efluente ao reservatório não só as liberações a jusante do mesmo, que inclui as captações para abastecimento humano, como também as perdas por evaporação proporcionais a área da superfície do reservatório em média daquele mês.¹²
- Fluxo mínimo para atender demandas ecológicas: O valor do volume efluente a cada um dos reservatórios, que deve chegar ao nó seguinte, deve atender a um limite mínimo, quando houver, que se constitui numa demanda ecológica para o trecho seguinte ao lago. A demanda ecológica neste caso é a quantidade de água mínima exigida para a manutenção das condições ambientais do rio no trecho a jusante do barramento. No caso da aplicação em questão, havia sido estabelecida pela então Secretaria de Recursos Hídricos (SRH), para o reservatório Pirapama, uma demanda ecológica de 1,2 m³/s, o que significa um volume mínimo de 3,1104 milhões de m³ em qualquer mês que tem que ser respeitado.
- Vazão de Restrição a jusante dos barramentos: Para assegurar que as liberações dos barramentos não irão alagar a região a jusante do reservatório, também é acrescentado um limite máximo ao valor efluente de cada barragem que chega ao nó seguinte, ou seja, já descontando-se o valor retirado para abastecimento humano. Foram usados para simular estas vazões de cheia, o dobro do valor das vazões médias afluentes aos reservatórios que constam nos respectivos projetos básicos de cada uma das barragens.
- Capacidades Máxima e Mínima do Reservatório: Estas restrições são estabelecidas para as variáveis que representam o volume de cada reservatório em cada mês. Como em cada mês. Como já foi visto, a abordagem utilizada para

¹² A determinação desta área se deu através de uma aproximação linear da relação volume do reservatório e área do espelho, sendo considerado o volume médio naquele mês para fins de evaporação, como a média do volume ao fim do mês corrente e o volume ao fim do mês anterior. Deve-se salientar ainda que no primeiro mês simulado, o volume no mês anterior não é uma variável e sim uma condição inicial. Adota-se para cada reservatório no modelo, este valor inicial como sendo o valor de acumulação do mesmo. Para tornar isto bem provável de ocorrer, o modelo simula um período de 12 meses, iniciando-se a partir do mês de agosto. Sendo este mês, o último da estação chuvosa, muito provavelmente num ano médio o reservatório já estará cheio — no seu valor de acumulação — no mês de julho, o que faz a condição inicial ter uma margem de erro pequena.

o balanço de massas utiliza uma aproximação linear para a relação área/ volume do reservatório. Esta linearidade só é adequada para um intervalo de volume que vai do “volume morto” (*dead storage*) até o volume associado a lâmina máxima.

- Conservação do Volume Armazenado ao fim do período de análise: Esta restrição garante que não há perdas nem ganhos de água armazenada ao fim de um ano típico adotado na modelagem. Isto é implementado igualando-se o volume do reservatório no último mês modelado, ou seja, ao fim do período de análise (1 ano), à condição inicial, que como já visto é o volume de acumulação do reservatório, já que o modelo inicia a simulação no último mês da estação chuvosa.
- Capacidade máxima instalada de Pequenas Centrais Hidroelétricas-PCH's: O uso da água para geração de energia elétrica no trecho estudado da aplicação em questão, é feito através de duas PCH's a fio d'água. O volume de água efetivamente usado para geração durante o mês num determinado trecho será limitado de um lado pela disponibilidade de água no trecho, por outro lado pela capacidade máxima da planta instalada. Introduce-se também uma condição para que a equação de produção de energia no modelo só calcule valores de potência geradas se o valor de vazão alocado for maior do que o associado ao *engolimento mínimo*¹³ de cada PCH.
- Quantidades limite para aplicação de efluentes: O valor a ser aplicado por cada agroindústria nas áreas plantadas de cana associadas é limitado inicialmente de duas formas. Uma delas diz respeito ao tamanho da área plantada de cana em cada mês de safra e em cada trecho, e a dosagem em que o vinhoto deve ser aplicado. A partir destes dois valores, o máximo de área demandada e a dose de aplicação obtém-se um dos limites superiores do volume a ser alocado. A outra limitação com respeito a quantidade de aplicação do efluente em cada trecho, diz respeito a soma dessas alocações em todas as áreas que são fertirrigadas por uma dada indústria. Obviamente, esta soma não poderá ser maior do que a produção de vinhoto total da agroindústria. Nos meses de entressafra a produção é nula e a alocação também.

5.2.2. Restrições de qualidade de águas (sub-modelo 2)

Von Sperling (1996) relata que em termos ecológicos, a repercussão mais nociva da poluição de um corpo d'água por matéria orgânica é a queda nos níveis de oxigênio dissolvido, causada pela respiração dos microrganismos envolvidos na depuração de carga orgânica. Os níveis de oxigênio dissolvido têm sido utilizados tradicionalmente para a determinação do grau de poluição e de autodepuração cursos d'água. A sua medição é simples, e o seu teor pode ser expresso em concentrações, quantificáveis e passíveis de modelagem matemática. Para representar e simular a curva de oxigênio dissolvido no modelo, utilizaram-se

¹³ Segundo o documento da Eletrobrás (Eletrobrás), que contém diretrizes para projetos de PCH's as turbinas possuem um valor de engolimento mínimo, que é um valor de vazão abaixo do qual a máquina deve ser desligada. Assim, se forem alocados para a geração um valor de vazão menor que este valor de engolimento, as máquinas estariam desligadas e não haveria produção.

as equações representativas do clássico modelo dentro da Engenharia Ambiental, o modelo dos pesquisadores Streeter e Phelps (Streeter e Phelps 1925). Nele, considera-se a situação relativamente simples em que apenas a desoxigenação e a reaeração atmosférica influem no balanço do oxigênio dissolvido. Diz-se simples pois uma série de outros fenômenos integram este balanço, tais como: demanda bentônica, nitrificação, fotossíntese, etc. Mas ao mesmo tempo relativamente, pois só a simulação destes dois processos, já envolve e introduz no modelo de otimização um grau de não-linearidade considerável. De acordo com revisão de literatura acerca dos modelos econômico-hidrológicos integrados existentes (McKinney et alii 1999), não se encontra menção de nenhum deles tratando a questão da qualidade, no que diz respeito a constituintes que sofrem processo de depuração ao longo do rio. Sendo assim, acreditamos que a aplicação de uma formulação básica como o Streeter-Phelps, que serve de suporte aos modelos mais sofisticados posteriores, já se constitui num avanço à medida que introduz de forma integrada — tanto no que diz respeito a disponibilidade hídrica como aos componentes econômicos — constituintes de qualidade tão importantes quando se trata de contaminação por cargas orgânicas. Assim, basicamente as Restrições de Qualidade de águas do modelo visam assegurar que a escolha das variáveis de decisão (alocações por uso) sejam tais que o oxigênio calculado ao longo de cada um dos trechos em cada mês, esteja sempre acima do valor permissível pela legislação. Deve-se atentar para o fato de que ao se limitar níveis de oxigênio ao longo de cada trecho, limita-se também a carga orgânica permissível de se lançar na área associada. Isto porque o oxigênio ao longo do trecho, é função da carga lançada no início do mesmo, além dos valores iniciais de oxigênio e da capacidade de depuração do rio. O problema é que no caso dos reservatórios modelados as referidas restrições não limitam a carga lançada nos lagos. O fato é que o cálculo e a evolução do oxigênio dissolvido dentro dos reservatórios não podem ser feitos através das equações do modelo Streeter-Phelps. O mesmo não é adequado para utilização em lagos. Desta forma, não se poderia limitar os níveis de OD, e portanto não se estaria restringindo as cargas referentes aos lançamentos dos trechos que contribuem para o reservatório. Assim é que procurou-se estabelecer uma outra restrição para limitar a carga independente da questão do oxigênio. Na realidade, no caso de reservatórios, a preocupação maior no que se refere a lançamentos de cargas é a questão da eutrofização. O principal fator de estímulo deste processo é um nível excessivo de nutrientes no corpo d'água, principalmente nitrogênio e fósforo. Procurou-se então estabelecer uma outra restrição para limitar a carga independente da questão do oxigênio. Usa-se uma relação para determinar o fósforo a partir da DBO. Limita-se assim a carga orgânica lançada nos reservatórios de forma que a carga máxima admissível de fósforo associada não resulte numa concentração de fósforo superior ao limite de eutrofia.

6. Resultados do Modelo

Inicialmente serão mostrados os resultados do sub-modelo 1, ou seja, os valores ótimos se o modelo fosse constituído apenas por restrições de disponibilidade hídrica. Os valores dos benefícios líquidos por uso, obtidos na solução ótima do sub-modelo1, são apresentados no Gráfico 1. Estes valores de benefícios líquidos resultam de alocações praticamente iguais aos valores outorgados no caso dos usos consuntivos considerados (AH e AI). Isto significa que os valores de benefícios líquidos obtidos nestes dois casos foram muito próximos dos máximos possíveis.¹⁴ Isto ocorreu em todos os meses, mesmo nos meses mais secos – ver Gráfico 2 que apresenta a oferta simulada endogenamente pelo sub-modelo 1 ao longo do rio em cada mês do ano.¹⁵

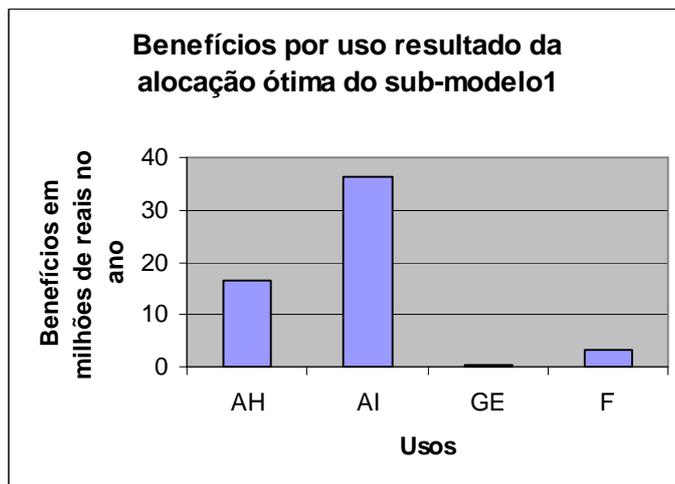


Gráfico 1 – Benefícios líquidos em milhões de reais por uso resultantes da alocação ótima dada pelo sub-modelo 1

A rigor, analisando-se os valores de alocação por usuário e por mês, percebe-se que nos meses mais secos que coincidem com a safra, e onde portanto os dois usos consuntivos demandam água simultaneamente, os usuários que resultam em benefícios líquidos menores começam a não ser atendidos totalmente com o seu valor de outorga. Isto para assegurar que os usuários que levam a benefícios maiores sejam atendidos. O modelo então começa a resolver conflitos baseado no critério de

¹⁴ Lembrar que admitimos para estimar as funções de demanda inversa dos usos consuntivos, ser o ponto de operação de cada usuário em valores atuais (valor de outorga solicitada e custo médio de operação atual) o valor que maximiza o benefício líquido já que a partir deste ponto o benefício marginal passa a ser menor que o custo marginal (ver seção 3.1).

¹⁵ Deve-se observar que destes dois usos consuntivos, o abastecimento humano (AH) ocorre em todos os meses do ano, já o industrial (AI) limita-se aos meses de safra, que na modelagem considerou-se de setembro a janeiro. É só neste período então que há a presença dos dois usos consuntivos, o que coincide com a estação seca no Nordeste.

maximizar o bem-estar de toda a sociedade. Na realidade, nos meses de outubro a abril, à cidade de Vitória deixa de ser alocado a cada mês em torno de 1% do valor outorgado, sendo o mês de dezembro – mês mais seco – onde acontece a maior redução. Isto ocorre entre os meses de outubro a janeiro para que todos os demais usuários consuntivos¹⁶ – nestes meses as agroindústrias também demandam – tenham os seus valores de outorga totalmente assegurados, já que os valores de benefício resultantes de todas as agroindústrias bem como os de Recife são maiores que os de Vitória.

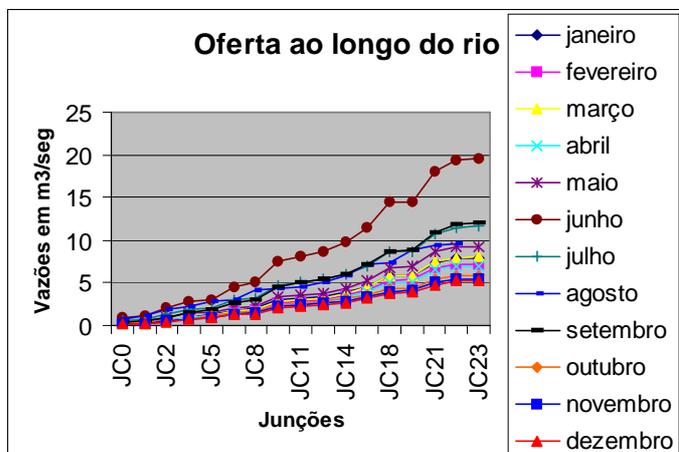


Gráfico 2 – Oferta simulada pelo sub-modelo 1 ao longo do rio nos diversos meses

No que se refere aos meses de fevereiro a abril, apesar de não haver mais a demanda pelas agroindústrias, a redução na alocação de Vitória se mantém. Isto pode ser explicado pelo uso não-consuntivo da PCHCIP. Apesar da PCH não ser um uso consuntivo, é necessário um valor de vazão fluindo no trecho associado a mesma, que está a jusante de Vitória. Isto implica num conflito entre os dois usos, pois o atendimento pleno a Vitória reduzirá a geração a jusante. Além disso, os máximos valores de benefício líquido (resultantes dos valores de vazão correspondentes ao custo médio na curva de demanda inversa – ponto de operação) associados a PCHCIP são da mesma ordem de grandeza dos máximos valores associados a Vitória, sendo estes últimos maiores.¹⁷

Em virtude disso, observando agora mais de perto o que ocorre com a PCHCIP, a alocação ótima resulta em valores fluindo no trecho associado a mesma, entre outubro e abril, menores que os valores de operação. Há uma redução em relação

¹⁶ Veremos que há além desses um usuário não-consuntivo (PCHCIP), que por estar a jusante de Vitória, requer nessa época e também nos meses seguintes (fevereiro a abril) uma redução na alocação de Vitória. No entanto, como os benefícios resultantes desta PCH são menores do que os de todos os demais usuários consuntivos, inclusive Vitória, as maiores reduções são no fluxo associado a PCH.

¹⁷ Os valores de benefícios mensais resultantes da alocação igual ao valor de outorga para Vitória fica em torno de 33 mil reais, enquanto que para PCHCIP, os benefícios mensais associados ao valor de operação é de 21 mil reais.

ao ponto de operação, que vai de 8 e chega a 35% no mês mais seco, que além disso está no período de safra, ou seja, o período em que os usos industriais também exercem demanda. Isto implica numa perda de benefícios de aproximadamente R\$ 4.144,00 num total de R\$ 256.521,00 de benefícios anuais possíveis de serem obtidos por este usuário. Já as perdas de benefícios resultantes do não atendimento pleno a Vitória são desprezíveis. Assim, dos usuários que disputam por água – todos os usos a menos da fertirrigação, pois a mesma usa vinhoto e afeta a qualidade das águas, que não é considerada no sub-modelo1 – todos obtêm benefícios líquidos anuais que são os maiores possíveis, a menos de Vitória e da PCHCIP. Sendo que a perda de benefícios anuais de Vitória é desprezível, enquanto que a da PCHCIP é muito pequena, em torno de 1,5% do máximo possível. O Gráfico 3 mostra os benefícios líquidos anuais resultantes da alocação ótima por usuário, que como acaba de ser dito, são praticamente os valores máximos de benefícios líquidos anuais. Observa-se, como esperado, que os usuários que não são plenamente atendidos (PCHCIP e Vitória, o primeiro perdendo mais) são os que levam a menores valores de benefícios líquidos, a menos da PCHJB.

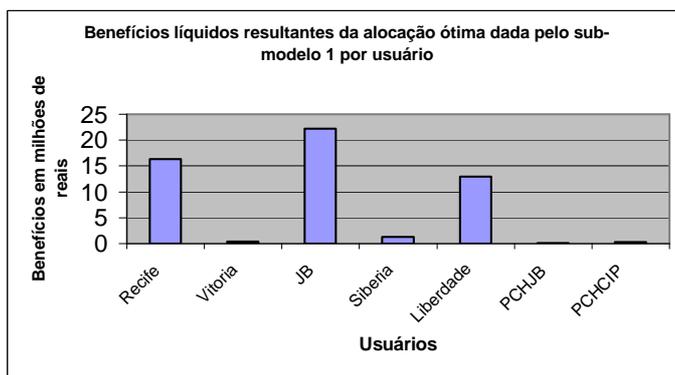


Gráfico 3 – Benefícios líquidos resultantes da alocação dada pelo sub-modelo 1 por usuário

O Gráfico 4 mostra apenas os usuários cujas alocações resultam em menores benefícios líquidos anuais. Na realidade, o pleno atendimento do usuário PCHJB, não se deve aos benefícios resultantes do mesmo, e sim devido ao seu caráter não-consuntivo, além de sua posição, a jusante de usuários plenamente atendidos e a montante de usuários a se atender. Na verdade, caso o não atendimento pleno da PCHJB, de alguma forma disponibilizasse mais água para os outros usuários, o modelo certamente o faria.

Com relação ao uso para fertirrigação, como já dito, o resultado do sub-modelo1 aloca os efluentes sem considerar restrições de qualidade de águas. O que se verifica é que todo o efluente é alocado, ou seja, não há sobras. A distribuição das áreas nos nós de demanda que recebem os efluentes na safra toda é dada pelo Gráfico 5.

Deve-se salientar que a configuração que estamos chamando de atual, é na realidade uma estimativa grosseira baseada nas entrevistas feitas com os

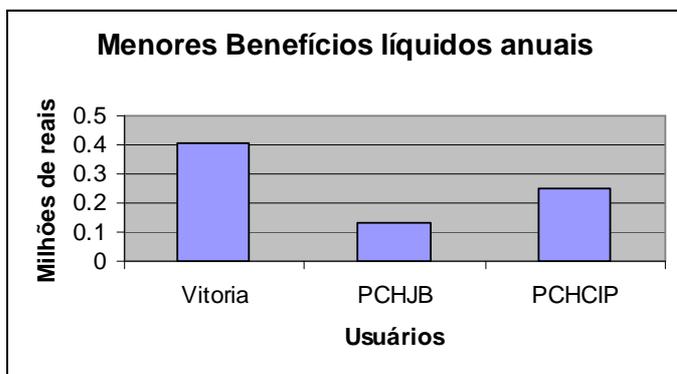


Gráfico 4 – Usuários com menores benefícios líquidos anuais

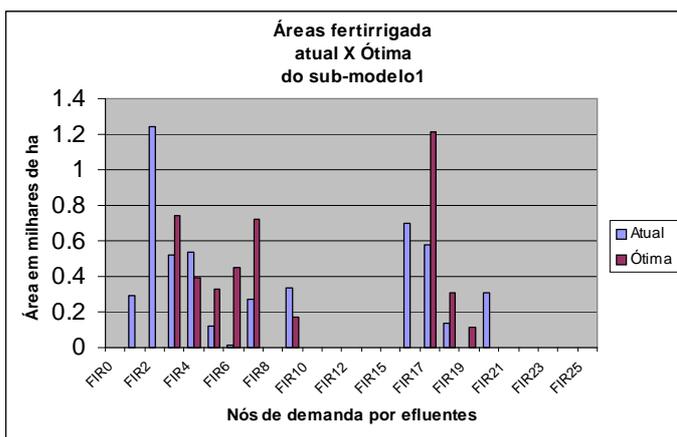


Gráfico 5 – Áreas fertirrigadas atualmente e resultantes da alocação ótima do sub-modelo1

responsáveis pelas agroindústrias, de localizações de áreas de cana ao longo do rio, em que hoje se usa o vinhoto como fertilizante. Portanto a informação mais confiável que pode-se extrair desta configuração não são as quantidades por nó e sim a distribuição entre os mesmos, ou seja, quais nós de demanda estão recebendo efluentes, e não quanto.

Já a alocação ótima é obtida, distribuindo-se o vinhoto produzido pelas agroindústrias (resultante de uma alocação ótima de água para as mesmas) de forma a maximizar os benefícios com a fertirrigação e considerando-se fixa a dosagem de aplicação (300 m³/ha). A maximização dos benefícios líquidos com a fertirrigação é tal que ao mesmo tempo que eleva ao máximo os benefícios brutos - função da carga resultante da alocação do vinhoto (proporcional ao ganho de produtividade na cana), economia com fertilizantes e com o não tratamento do vinhoto alocado- diminui ao mínimo os custos com aspersão e o transporte dos

efluentes. Assim é que são fertirrigados na alocação ótima resultante do sub-modelo 1, apenas os nós de demanda por efluentes que não configuram custos de transporte¹⁸ no processo de fertirrigação. Os efluentes produzidos pela JB são alocados em FIR3, 4, 5, 6 e 7. Os de Sibéria no FIR9 e os de Liberdade em FIR17, 18 e 19. Observar que esta configuração, no que se refere a quais nós recebem efluentes é bem similar a atual. No caso da JB a diferença aparece apenas nos nós FIR1 e FIR2 que recebem efluentes segundo informações atuais, e para Liberdade, que aloca atualmente em FIR16 e FIR20 e não aloca FIR19. Comem FIR19. Com relação a distribuição dos efluentes entre os nós de demanda, os Gráficos 6 e 7 apresentam a forma como o total de efluentes produzido pelas agroindústrias JB e Liberdade é distribuído entre os nós de demanda. Os efluentes da agroindústria Sibéria só fertirrigam o nó de demanda FIR9, e como todo o efluente foi alocado é o referido nó que recebe todo o efluente produzido.

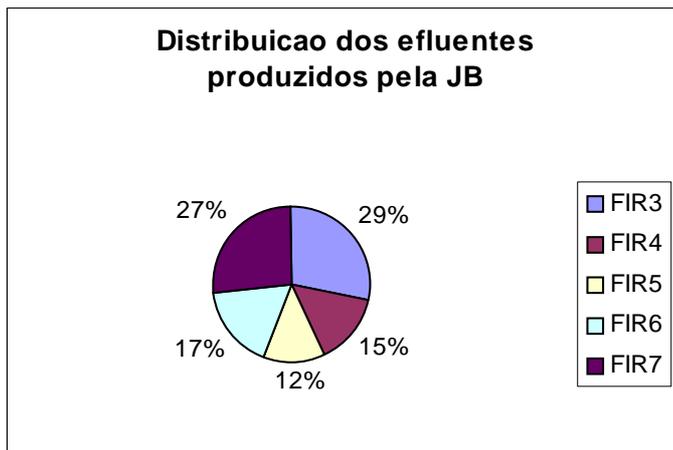


Gráfico 6 – Distribuição dos efluentes produzidos pela JB nos nós de demanda por efluentes associados

No caso da JB, como já foi dito, todo o efluente foi alocado nos nós de demanda que não configuram custos de transporte. A distribuição entre os nós mostrada no Gráfico 6, através dos percentuais diferentes do total de efluente produzido, resulta em áreas fertirrigadas também diferentes, mas que se constituem em um mesmo percentual da área máxima naquele nó. Assim, em todos os nós onde a JB alocou efluentes: FIR3 a FIR7, a área fertirrigada pela alocação ótima representou aproximadamente 64,6% da área máxima possível de ser fertirrigada daquele nó. Entre os meses, a divisão foi idêntica.

¹⁸ Lembrar que foi considerado custo de transporte apenas para os nós de demanda por efluentes mais de 2 Km distantes da agroindústria associada. Para a JB seriam FIR0, 1, 2, 8, 10, 11 e 12. Para Liberdade são: FIR13, 15, 16, 20, 21 e 22. Para os demais não há custos de transporte. Observar que os nós de demanda FIR23, 24 e 25 não estão associados a nenhuma agroindústria do trecho modelado, FIR14 tem área de cana desprezível e que FIR9 é o único nó de demanda associado a Sibéria e é muito próximo deste.

No caso de Liberdade, os nós de demanda onde os efluentes foram alocados são FIR17, 18 e 19. O Gráfico 7 mostra a distribuição entre os três, que resulta em áreas fertirrigadas diferentes, mas que percentualmente todos se constituem em 65,6% da área máxima de cada nó. Entre os meses não houve diferenças. Finalmente no caso de Sibéria, o único nó de demanda FIR9 recebe todo o efluente, o que resulta numa área fertirrigada, que se constitui em 12% da área total. Entre os meses a divisão permaneceu igual.

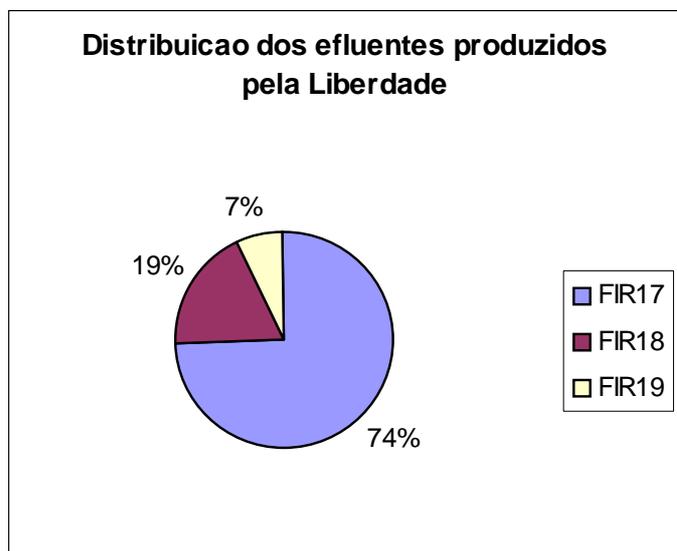


Gráfico 7 – Distribuição dos efluentes produzidos pela agroindústria Liberdade

Para explicar estes valores deve-se lembrar que o ponto de operação calculado para todos os nós de demanda foi de 67,65% da área total. Este ponto de operação era justamente o valor associado ao custo médio sem considerar custos de transporte, que maximizaria o benefício líquido de cada um dos nós. Assim, a alocação ótima busca alcançar este valor, mas esbarra na limitação da quantidade de efluentes produzida pelas agroindústrias. A agroindústria Liberdade é que consegue chegar mais perto do referido ponto, por produzir uma quantidade de efluentes similar a JB, e ter menos áreas a fertirrigar sem custos de transporte. A agroindústria Sibéria é a que consegue menos, por ter menor produção de efluentes, e uma área a fertirrigar razoável. Com relação a igualdade entre os meses, o que poderia diferenciar a alocação de um mês para o outro seria a carga resultante, que é calculada em função da vazão específica de cada mês. Mas o sub-modelo 1 não restringe as cargas, ou seja não considera as restrições de qualidade de águas. Assim, para o uso da fertirrigação, os benefícios líquidos máximos não são alcançados por uma limitação na quantidade de efluentes, que não é suficiente para atingir o ponto de operação. Ao se introduzir as restrições de qualidade de águas e executar o modelo completo, há uma redução no valor da função-objetivo, ou

seja na soma de todos os benefícios líquidos. Agrupando por uso, há uma redução nos benefícios líquidos de todos eles, sendo que as reduções mais significativas se dão no Abastecimento Industrial e na Fertilirrigação, usos diretamente envolvidos na produção e alocação do efluente, que impacta na qualidade das águas. Há perdas de benefícios da ordem de R\$ 350.000,00 no AI, o que representa apenas 1% do valor resultante do sub-modelo1 para o referido uso. Já na fertilirrigação, as perdas são maiores, chegando a R\$ 776.000,00, percentualmente representando 24,5% do valor alcançado pelo uso sem as restrições de qualidade de águas. Investigando em nível de usuário, observa-se que no caso do Abastecimento Industrial, é praticamente a agroindústria JB que sofre a perda de benefícios mencionada acima, o que em relação aos benefícios conseguidos sem as restrições de qualidade para a JB, representam uma redução de 1,7%. Isto ocorre pois os efluentes produzidos por esta agroindústria não são totalmente alocados. Há sobra de efluentes e portanto há um custo imputado a agroindústria, que deverá tratar esta sobra. O ponto de operação que era o valor outorgado atualmente se desloca, devido ao aumento dos custos, e leva a alocação ótima para um valor um pouco menor do que a outorga, com benefícios líquidos máximos menores. A sobra de efluentes ocorre pela impossibilidade de respeitar os níveis mínimos do constituinte de qualidade, com o lançamento total dos mesmos, e obter ao mesmo tempo o máximo do benefício total. Pode-se observar (ver Gráfico 8) que, ao se introduzir as restrições de qualidade, apenas dois nós de demanda anteriormente não fertilirrigados pela JB, passam a receber efluentes.¹⁹ Aparentemente os custos com o transporte do total de efluentes na soma geral levam a uma redução maior dos benefícios do que o tratamento das sobras.²⁰ No que se refere as perdas na fertilirrigação que são as maiores, as mesmas se verificam basicamente nos nós de demanda fertilirrigados com os efluentes produzidos pela JB. Nestes, as perdas ocorrem principalmente pela redução das áreas fertilirrigadas nos nós onde se alocavam os efluentes no resultado do sub-modelo1. Porém há também perdas de benefícios, devido a alocação dos efluentes nos nós onde sem restrições de qualidade não haveria, os nós FIR10 e 12, que implicam em custos de transporte. Podem-se observar no Gráfico 8 não só a alocação nesses últimos, como também as reduções nas áreas dos FIR3 a 7, mais acentuadas nos FIR4 a 6. Para explicar tal comportamento deve-se lembrar que nos nós de demanda que não configuram custos de transporte(FIR3 a 7), em todos os meses, o ponto de operação é a alocação de efluentes de forma que 67,65% da área total seja fertilirrigada. Sem as restrições de qualidade, por uma limitação do quantitativo total dos efluentes, a todos eles foram alocados, distribuídos igualmente entre os meses, uma quantidade tal que 64,69% da área total foi fertilirrigada.

¹⁹ Veremos mais adiante que os benefícios líquidos associados a esses dois nós de demanda são negativos, o que significa que a alocação nos mesmos reduz o benefício total, mas a sobra deve reduzir mais.

²⁰ Ademais, foram feitas simulações sem o custo de transporte, e mesmo assim sobravam efluentes, embora em menor quantidade, o que indica que além da causa econômica, há também a incapacidade do rio de depurar todo o efluentes

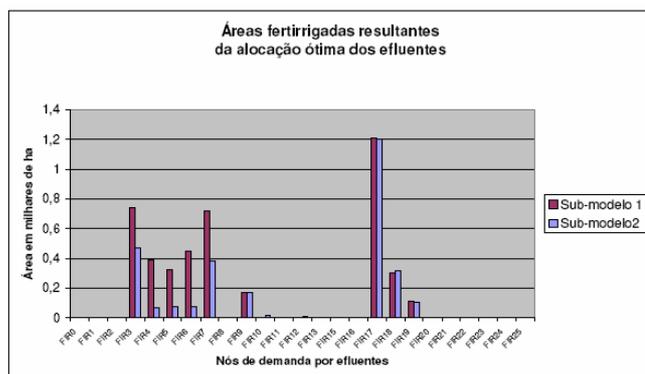


Gráfico 8 – Áreas fertirrigadas resultantes da alocação ótima de efluentes

Ao se introduzir as restrições de qualidade, a alocação proporcional a área total começa a se diferenciar entre os nós e entre os meses. Entre os meses porque em épocas de vazões menores, meses mais secos, a capacidade de depuração do rio é menor, o que condiciona uma maior limitação no lançamento de cargas, o que deve implicar em menores áreas fertirrigadas. Como exemplo será explicitada a nova distribuição entre os meses no nó FIR7 das áreas fertirrigadas comparando-a com os resultados anteriores. Como resultado do sub-modelo1, as áreas fertirrigadas foram idênticas em todos os meses de safra: 143,31 ha, que representa 64,69% da área total possível de ser fertirrigada no mês (221,48 ha). Sendo assim, ao fim da safra, aproximadamente 65% da área de cana total(1107,43 ha) do nó será fertirrigada, ou 716,5 ha.

O Gráfico 9 mostra os resultados do sub-modelo 2 no que se refere a alocação de efluentes no nó FIR7. Observa-se que no mês com maiores vazões (Setembro) se fertirriga uma área maior (53,62% da área total), enquanto que no mês mais seco (Dezembro) apenas 26,65% da área total é fertirrigada. Na média FIR7 tem, em todos os meses de safra, em torno de 34,39% de sua área de cana recebendo efluentes, bem abaixo dos 65%.

Isto acontece em todos os nós onde as áreas fertirrigadas se reduzem devido a limitações de qualidade. As maiores reduções se dão nos meses mais secos, pelo motivo já explicado. O decréscimo dos benefícios líquidos no caso do nó FIR7 é de R\$197.000,00, aproximadamente 17% do total de benefícios perdidos. No entanto, este não é o nó que tem a maior redução de benefícios.

Para fazer uma comparação entre os nós será útil a tabela a seguir, que apresenta dados relacionados aos nós de demanda dos efluentes da JB que sofreram as reduções nas áreas fertirrigadas, como resultado do sub-modelo2. Deve-se ressaltar o fato de que as restrições de qualidade que impactam na alocação dos efluentes da JB, nos referidos nós, são do mesmo tipo,²¹ a menos da que está relacionada ao

²¹ São restrições às cargas lançadas nas junções do rio, de forma que o Oxigênio Dissolvido no início e no fim de cada trecho esteja acima dos limites permissíveis pela legislação.

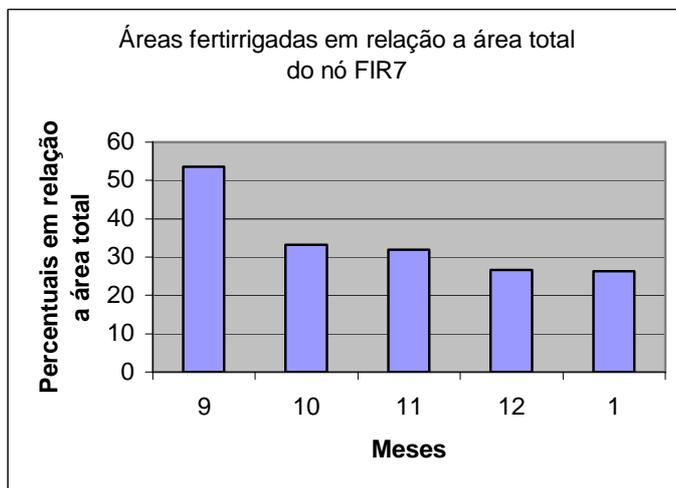


Gráfico 9 – Áreas fertirrigadas em relação a área total no nó FIR7

nó FIR6. Na verdade, este nó está numa área responsável pela vazão afluyente ao reservatório Águas Claras, e a restrição da carga orgânica aí lançada previne uma futura eutrofização do mesmo.

Tabela 1

Redução de áreas fertirrigadas e benefícios por nós de demanda por efluentes

Nós de demanda por efluentes da JB	Área total (ha)	Percentual de áreas fertirrigadas pela alocação ótima (submodelo 1)	Percentual de áreas fertirrigadas pela alocação ótima (submodelo 2)	Redução de áreas fertirrigadas em (ha) com o modelo completo	Redução nos benefícios (Milhares de reais)
FIR3	1.145,17	64,69	40,81	273,46	79,97
FIR4	603,48	64,69	11,66	320,02	198,913
FIR5	505,9	64,69	14,63	253,25	152,656
FIR6	697	64,69	11,15	373,17	211,168
FIR7	1.107,43	64,69	34,39	335,55	117,511

Observar que os nós com maiores valores de C2 (maiores áreas totais) ao sofrerem reduções nas áreas fertirrigadas equivalentes aos de menor área (ver FIR3 e FIR5), ocasionam uma redução no benefício total bem menor.²² Dessa forma, entre os meses, como já visto, a restrição é sentida principalmente nos meses mais secos,

²² A redução em FIR3 (maior área) de 273,46 ha provoca uma redução de R\$ 79.970,00 no benefício total. Já a redução em FIR5 (menor área) de 253,25 ha ocasiona uma redução de R\$ 152.656,00.

já entre os nós, há uma tendência dos nós de demanda com menores áreas serem mais penalizados.²³ Ocorre que da maneira como o modelo foi concebido cada um desses nós de demanda está sendo visto como um usuário, ou seja, é como se cada um desses FIR tivesse um proprietário que com tal área plantada tivesse benefícios e incorresse em custos. E assim, os menores proprietários estariam perdendo em prol dos maiores, o que exigiria mecanismos de compensação.

Na realidade, não foi levantado um cadastro de propriedade destas áreas, e o que se sabe é que a maioria delas pertence as próprias agroindústrias. Sendo assim, neste ponto é necessário reavaliar as funções de benefício das áreas fertirrigadas, assim que se levantar a propriedade das mesmas, que deverão passar a ser vistas de forma integrada. Ou seja, as áreas plantadas espalhadas ao longo do rio que possuem o mesmo proprietário, deverão ter as suas alocações avaliadas conjuntamente.

Com relação as demais agroindústrias as perdas são desprezíveis – com a introdução das restrições de qualidade - tanto por não haver sobra de efluentes como pelo fato de não passar a se fertirrigar nenhum nó que implique em custos de transporte. Na realidade, o total de efluentes a ser alocado pela JB é bem maior que o quantitativo das demais.²⁴ o que pode justificar a alocação total dos efluentes destas últimas e a sobra em JB. Há muito pequenas perdas no caso de Liberdade devido a uma realocação diferente (ver no Gráfico 8 os FIR17, 18 e 19), em apenas um dos meses de safra (mês 9), que é o mês com maiores vazões deste período, e em que a destilaria a montante alocou mais. Para que não haja sobras e as restrições de qualidade sejam atendidas há uma transferência de efluentes lançados pela Liberdade de FIR17 e FIR 19 para FIR18. Este último está na calha do rio e a montante.²⁵ Deve-se ressaltar que não só a redução de área em FIR17 e FIR19 traz perdas, mas o aumento da área em FIR18 também. Finalmente as reduções de benefício que se dão no Abastecimento Humano e na Geração de Energia Elétrica se devem ao não atendimento pleno do valor outorgado para Vitória e do ponto de operação da PCHCIP (da mesma forma que no sub-modelo1) entre os meses de outubro a abril. Com a introdução das restrições de qualidade as reduções se ampliam – chega-se a 11% de redução em relação ao valor de outorga na alocação de Vitória enquanto mantém-se os valores para Recife e para as agroindústrias – nos meses de safra. Nota-se claramente uma redução na disponibilidade hídrica devido a entrada das restrições de qualidade nestes meses. Diferentemente do sub-modelo1, a maior redução não se dá no mês mais seco, e sim no mês em que alocam-se mais cargas (mês com maiores vazões) o que exige a manutenção de mais água no rio para garantir a diluição dos efluentes. Ademais para evitar um futuro processo de eutrofização mantém-se um volume maior de água no reservatório Águas Claras.

²³ Na realidade, a questão da localização ao longo do rio também vai influir, daí poderia-se explicar o fato de FIR4 ser um pouco maior que FIR5 e ter a sua área mais reduzida. Além disso, lembrar que o FIR6 não pode ser comparado com os demais, por sofrer o efeito de mais de um tipo de restrição de qualidade. Observar que é o que sofre a maior redução em área.

²⁴ O total de efluentes produzido pela JB é 15 vezes maior que o de Sibéria e quase 2 vezes maior que o de Liberdade.

²⁵ FIR17 está num afluente e FIR19 está a jusante de FIR18.

Este último fator de redução na disponibilidade hídrica é o responsável pelo que ocorre nos meses seguintes a safra. De fevereiro a abril, os resultados do sub-modelo 1 mostravam que a redução na alocação ótima de Vitória se mantinha, mesmo não havendo mais os usos consuntivos das agroindústrias, para garantir vazões fluindo no trecho associado a PCHCIP. Os resultados do sub-modelo 2 mostram que as reduções persistem, mas os valores alocados passam a ser ligeiramente maiores em relação ao sub-modelo 1. Isto se deve a uma maior liberação de água do reservatório Águas Claras que durante a safra, devido a limites de qualidade, armazenou mais.

7. Conclusões

A solução do sub-modelo 1 mostra que nos meses de safra, todos os usos consuntivos são plenamente atendidos, com exceção de uma pequena cidade na região metropolitana. Esta é justamente o que resulta em menores benefícios líquidos, quando atendida plenamente. Isto é feito para que todos os demais usuários consuntivos tenham os seus valores de outorga totalmente assegurados, já que os valores de benefício resultantes destes últimos são maiores. Dessa forma, o modelo começa a resolver conflitos usando o critério de maximizar a soma dos benefícios de todos os usuários. Vê-se claramente aqui que o critério Custo-Benefício, que está sendo usado não considera a questão distributiva. Para isso, os que saem ganhando tem que compensar os que perdem. Resultados como esses podem subsidiar decisões no que se refere a implementar mecanismos econômicos que possam efetivar esta compensação, na medida em que se pode mensurar os benefícios perdidos e ganhos pelos envolvidos. Nos demais meses não há ainda água suficiente para atender todos os usuários, mas o conflito é menor. Os conflitos ocorrem entre usos consuntivos e não-consuntivos: geração de energia hidroelétrica por exemplo requer um fluxo mínimo que limita o uso consuntivo.

Restrições de qualidade de água são introduzidas no modelo final. Benefícios líquidos totais são substancialmente reduzidos, mas principalmente aqueles relacionados ao uso industrial e a fertirrigação. A maior agroindústria não aloca mais o quantitativo total de efluentes, devido a custos de transporte altos, o que implica que o tratamento das sobras teria uma viabilidade econômica maior. As alocações dos efluentes dependem do mês, devido ao fato de que em meses mais secos a capacidade de depuração do rio é reduzida. Os benefícios também são reduzidos nos demais usos devido a disponibilidade hídrica que se reduz com a introdução das restrições de qualidade. Isto mostra que o modelo está considerando a diluição de cargas orgânicas como um outro uso, restringindo retiradas de água para que o rio possa se recuperar através do processo de autodepuração, em outras palavras usando a capacidade de assimilação dos rios. Ademais, para evitar um futuro processo de eutrofização nos reservatórios mantém maiores volumes nos mesmos. A ferramenta possui recursos que possibilita mensurar custos das restrições. A introdução de restrições tais como fluxos mínimos para fins ecológicos podem ser valoradas. A questão da eutrofização para os reservatórios da bacia é tratada pelo

modelo de uma forma preventiva. Preços-sombra podem ser obtidos destes limites para cada um dos reservatórios qualquer mês. Pode-seem qualquer mês. Pode-se fazer a partir deles estimativas de custos da prevenção a serem comparados com custos de medidas corretivas. Outros resultados interessantes também podem ser obtidos ao se incluir pesos na função-objetivo para refletir prioridades entre os usos, tais como a definida para o abastecimento humano e dessedentação de animais pela Política Nacional de Recursos Hídricos. Uma plataforma como a descrita tanto pode servir como uma ferramenta de auxílio na avaliação de políticas de água, como um sistema de apoio a decisão das questões operativas hidrológicas.

Referências bibliográficas

- Cai, X., McKinney, D. C., & Lasdon, L. S. (2000). Solving large nonconvex water resources management models using generalized benders decomposition. *Operations Research*, II:235–245.
- Cai, X., McKinney, D. C., & Lasdon, L. S. (2001). Piece-by-piece approach to solving large nonlinear water resources management models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127:363–368.
- Carrera-Fernandez, J. (1999). Estudo de cobrança pelo uso da água na bacia hidrográfica do Rio Pirapama. Relatório de Consultoria, CPRH, Agosto.
- Gama, A. M. F. (1998). Estudo da qualidade de água da bacia do rio Pirapama. Companhia Pernambucana do Meio Ambiente – CPRH. Publicações Projeto Pirapama.
- McKinney, D. C., Cai, X., Rosegrant, M., Ringler, C., & Scott, A. (1999). Modeling water resources management at the basin level. Review and Future Directions, SWIM Paper.
- Moraes, M. M. G. A. (2003). *Modelo Econômico-Hidrológico Integrado Para Alocação Ótima de Água Em Diferentes Usos e Vinhoto Em Áreas Plantadas de Cana Na Bacia Do Rio Pirapama*. PhD thesis, UFPE.
- Ribeiro, M. M. R. (2000). *Alternativas Para a Outorga e a Cobrança Pelo Uso Da Água*. PhD thesis, UFRGS.
- Ringler, C. (2001). Optimal water allocation in the Mekong river basin. Discussions Papers on Development Policy, 38 ZEF – Zentrum für Entwicklungsforschung, Universität Bonn.
- Rosegrant, M. W., Ringler, C., McKinney, D. C., Cai, X., Keller, A., & Donoso, G. (2000). Integrated economic-hydrologic water modeling at the basin scale: The Maipo river basin. *Journal of Agricultural Economics*, 25:33–46.
- Streeter, H. W. & Phelps, E. B. (1925). A study of the pollution and natural purification of the Ohio river. Public Health Bulletin 146.
- Von Sperling, M. (1996). *Introdução À Qualidade Das Águas e Ao Tratamento de Esgotos*, volume I. 2a. edition.