

Gestão de recursos hídricos usando modelagem econômico-hidrológica integrada na identificação de alocação ótima de água entre usos múltiplos

Márcia Maria G. Alcoforado de Moraes

José Almir Cirilo

Yony Sampaio

Sérgio Parente Vieira da Rocha

RESUMO: A escassez de água exige que se formulem políticas para garantir uma alocação intersetorial eficiente do recurso, ao mesmo tempo em que se reverta a degradação do mesmo. A definição de uma alocação ótima ou ideal, por meio de modelagem, estabelece uma referência para que se possam avaliar mecanismos econômicos de implementação que mais se aproximem do valor ótimo. Este trabalho utiliza um modelo econômico-hidrológico que integra um grande número de relações físicas, econômicas, institucionais e agronômicas numa plataforma única para subsidiar decisões que digam respeito à alocação ótima de água, entre os usos alternativos, e vinhoto para fertirrigar as áreas plantadas de cana no primeiro trecho da bacia do rio Pirapama, localizada no estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil. O modelo introduz a questão da qualidade não só ao incluir o uso da fertirrigação e determinar a alocação de efluentes das agroindústrias nas áreas plantadas de cana ao longo da bacia, mas também ao garantir através de restrições, níveis de qualidade adequados aos usos ao longo do curso d'água, bem como o não atingimento de limites de trofia nos dois reservatórios da área estudada. Envolve um grau de não-linearidade significativo e inclui mais de 10.000 variáveis e restrições. Para implementar a referida abordagem utiliza o método piece-by-piece (CAI, McKINNEY et al. 2001), através do General Algebraic Modeling System, software de alto nível utilizado para resolução de problemas de programação não-linear. O método decompõe o problema em dois sub-modelos, o primeiro considerando as restrições de disponibilidade hídrica e o segundo as restrições de qualidade de águas. Os resultados do modelo mostram que os benefícios líquidos totais são substancialmente reduzidos, quando introduzem-se as restrições de qualidade de águas, mas principalmente aqueles relacionados ao uso industrial e a fertirrigação. Os benefícios também são reduzidos nos demais usos devido a disponibilidade hídrica que se reduz com a introdução das referidas restrições. 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.

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.

ABSTRACT: The shortage of water demands that politics are formulated to guarantee an allocation efficient intersectorial of the resource, at the same time in that the degradation of the same is reverted. The definition of an allocation great or ideal, through modelling, establishes a reference so that she can evaluate economical mechanisms of implementation that more they approach of the great value. This work uses a model economical-hidrológico that integrates a great number of relationships physical, economical, institutional and agronomic in an only platform to subsidize decisions that concern the great allocation of water, among the alternative uses, and vinhoto for fertirrigation the planted areas of cane in the first space of the basin of the river Pirapama, located in the state of Pernambuco, Northeast of Brazil. The model introduces the subject of the quality not only when including the use of the fertirrigation and to determine the allocation of effluents of the agro-industries in the planted areas of cane along the basin, but also when guaranteeing through restrictions, appropriate quality levels to the uses along the course of water, as well as the not reaching of eutrophization limits in the two reservoirs of the studied area. The model was applied for a horizon of one year with monthly steps. This model involved an reasonable degree of non-linearity is denoted, and included. In addition, as there are more than 10,000 variables and restrictions, the model can be considered within the category of large and complex non-linear systems. To implement this approach, the piece-by-piece method (CAI, McKINNEY et al. 2001), through of General Algebraic Modeling System, high-level software used to resolve problems of mathematical programming, was used. The method decompose the problem in two sub-models, the firstly considering hydrologic availability constraints and the second quality constraints of water. The solution for model shows that the total net benefits are substantially reduced, when quality restrictions are introduced, but chiefly those related to industrial use and fertirrigation. The benefits are also reduced in the other uses due to water availability which is lessened by the introduction of quality restrictions. This shows that the model is considering the dilution of organic loading with another use, restricting withdrawals of water so that the river can recover by means of the process of autodepuration, in other words, by using the assimilation capacity of the rivers.

KEY-WORDS: Optimal water allocation; River basin model, water resources management, non-linear optimization, water policy.

INTRODUÇÃO

A escassez de água exige que se formulem políticas para garantir uma alocação intersetorial eficiente do recurso, ao mesmo tempo em que se reverta a degradação do mesmo. No entanto, a maioria das questões relacionadas aos efeitos das políticas alternativas de alocação de água, continua sem resposta. 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.

Este trabalho utilizou um modelo desenvolvido na UFPE (MORAES 2003) com recursos do CT-HIDRO/ FINEP que integra componentes de Hidrologia, Economia, de qualidade das águas, institucionais e agrônômicos numa plataforma única, para determinar a alocação ótima de água em diferentes usos e vinhoto nas áreas plantadas de cana no primeiro trecho da bacia, a saber: a montante da barragem Pirapama. A idéia central do modelo desenvolvido é determinar a alocação ótima por meio da maximização de uma função objetivo representando o benefício social líquido. Isto leva a uma alocação mais eficiente, diante das imperfeições da economia dos mercados de águas e do gerenciamento dos recursos hídricos. O valor ótimo ainda deve ser tal que todas as restrições, sejam de disponibilidade ou de qualidade das águas, sejam institucionais, venham a ser respeitadas.

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 mais sérios no setor de recursos hídricos nessa região mais sérios são: insuficiente produção de água tratada¹, elevadas perdas, precário atendimento dos sistemas de esgota-

mento sanitário e de limpeza pública e altos índices de poluição hídrica (RIBEIRO 2000). A questão da qualidade de água no Rio Pirapama é crítica.² O problema da qualidade de água deve agravar-se com o represamento das águas imposto pelo reservatório Pirapama. A água do Pirapama, avaliada no âmbito do Projeto Pirapama³ no período de 1990-1996, já apresentava níveis preocupantes de fósforo total, sendo que esses níveis tendem a sofrer elevação com a implantação da barragem. Isso leva o reservatório Pirapama, apenas iniciando sua operação, a já estar numa situação de risco com relação a uma possível eutrofização⁴.

O primeiro trecho da bacia, onde o modelo é aplicado, vai da nascente até o reservatório Pirapama.⁵ O segmento é responsável pelo aporte de água afluente ao reservatório Pirapama. Dentre os fatores que levam à ocorrência de poluição no trecho modelado por esse estudo, os mais significativos provêm da presença do vinhoto. A única prática atualmente adotada para disposição final do vinhoto é o seu aproveitamento na fertirrigação. Porém, parte desse vinhoto lançado no solo atinge os cursos d'água, seja através do escoamento superficial direto no período da fertirrigação, seja por meio do arraste superficial no período das chuvas ou mesmo como escoamento subterrâneo.

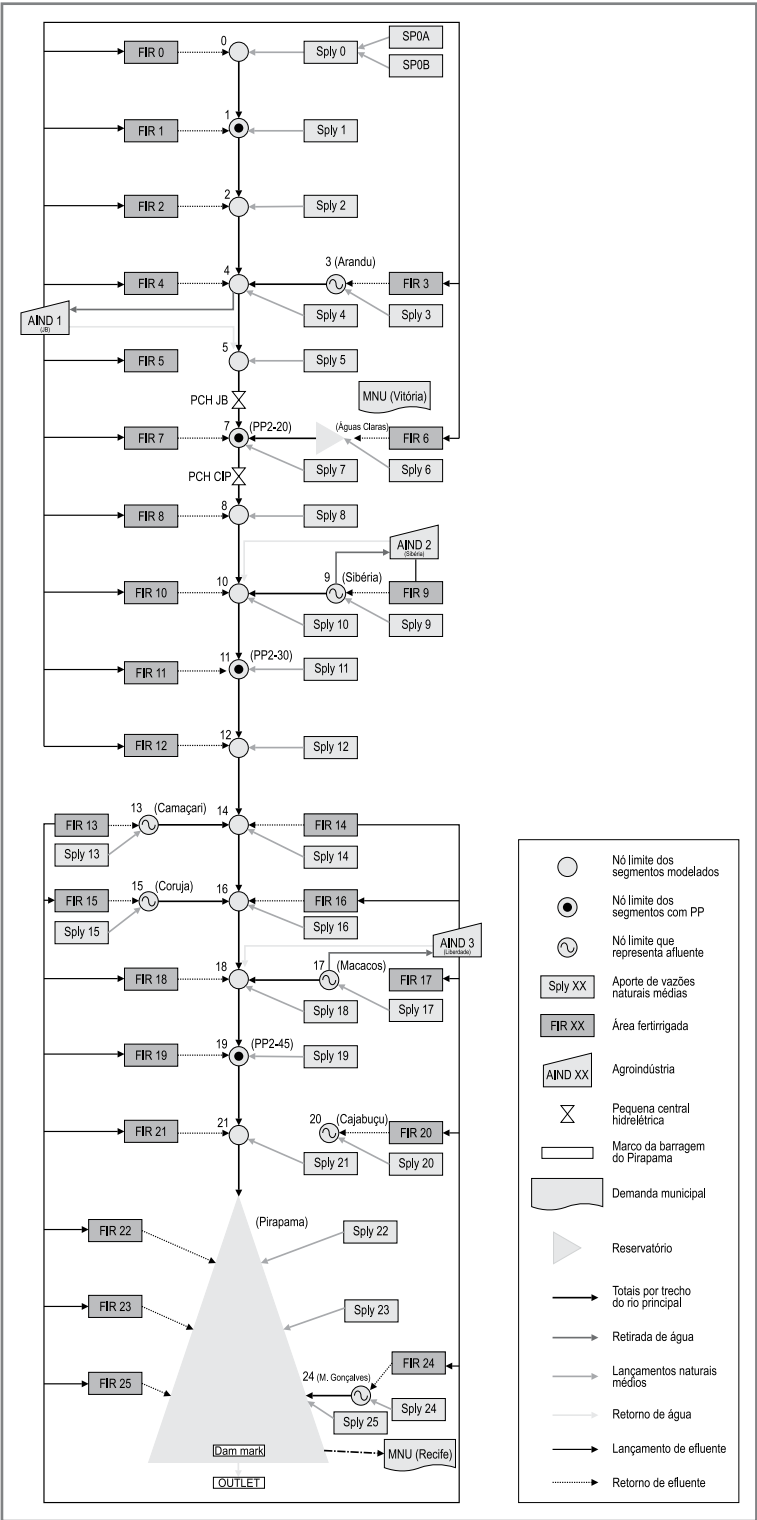
² Todo o trecho do rio atualmente monitorado apresenta-se em desacordo com os objetivos de qualidade da água, ou seja, a maioria dos parâmetros utilizados na classificação do rio está fora dos padrões estabelecidos pela legislação, ou seja, não atende aos limites relativos às diversas classes de enquadramento em que encontram-se os seus trechos.

³ 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.

⁴ 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.

⁵ 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.

¹ Como consequência deste problema, 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 MODELAGEM

O modelo desenvolvido para obter a alocação ótima utilizou os mesmos fundamentos teóricos de um modelo integrado desenvolvido por um grupo de pesquisa conjunta composto pelos seguintes membros: *International Food Policy Research Institute* (IFPRI); *Center for Research in Water Resources* (CRWR) da Universidade do Texas em Austin e *International Water Management Institute* (IWMI). O modelo elaborado na UFPE representa a bacia hidrográfica como um todo, através de uma rede de nós e links (ROSEGRANT, RINGLER et al. 2000), nos quais os nós representam entidades físicas e os links, as conexões entre essas entidades. Os nós podem ser de dois tipos: os nós-fonte, que representam entidades físicas tais como: rios, reservatórios, águas subterrâneas, etc; e os nós-demanda, que podem ser: agroindústrias, cidades, pequenas centrais hidroelétricas - PCHs, etc. Há também os nós de demanda por efluentes, que são as áreas plantadas de cana ao longo do curso d'água em que se lançam efluentes do processo industrial das destilarias, na chamada fertirrigação. Os links entre os nós podem representar captações de usuário e lançamentos. Estes lançamentos representam tanto a contribuição da drenagem pluvial natural, 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-demanda⁶. O trecho modelado (Figura 1) é constituído por um sistema contendo: 8 principais afluentes, 2 reservatórios, 2 PCHs, 22 fontes superficiais de água e 25 áreas plantadas de cana que demandam lançamentos de efluentes agroindustriais como fertilizante. As categorias de uso consideradas foram: abastecimento humano,

agroindustrial, geração de energia e fertirrigação. Esse 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.

O modelo contém os seguintes componentes : 1)

Componentes de Hidrologia Qualitativa: levam em conta o balanço hídrico com respeito à quantidade, nos nós que delimitam 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 essas fontes podem ser facilmente incluídas no modelo; 2) **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, considera-se também, indiretamente, o aporte de fósforo aos reservatórios, de forma a avaliar possível eutrofização dos mesmos; 3) **Componentes Econômicos:** funções de benefício líquido para os usos consuntivo e não-consuntivo, bem como funções de produção para os principais produtos industriais da bacia, levando em conta a água alocada como insumo; 4) **Componentes Institucionais :** regras e políticas institucionais tais como outorga, níveis mínimos de constituintes de qualidade permitidos, fluxos mínimos exigidos por demandas ecológicas, etc; 5) **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 por meio do modelo. Na escala de bacia, determinam-se níveis de operação dos sistemas hidrológicos e de alocação de água entre usuários. Para cada usuário determina-se uma quantidade e localização ótima de aplicação de efluentes dentre as diversas áreas plantadas de cana disponíveis para colheita em 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,

⁶ 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 atingir o rio através de vazamentos ou descartes em épocas de vazões mais altas. Deve-se salientar que na aplicação em questão não foram usados estes retornos indiretos por falta de dados sobre os mesmos. A contaminação por vinhoto foi considerada apenas através dos lançamentos naturais médios proporcionais às áreas fertirrigadas.

em especial aquelas que tratam a questão da qualidade. 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: 24147; Número de Variáveis: 21610; Número de elementos no Jacobiano não-nulos: 54519; Número de elementos no Jacobiano não-constantes: 14067. 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. Desde que nesse caso, em torno de 26% dos elementos não-nulos no Jacobiano são não-constantes, 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, McKINNEY et al. 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. 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 abordagem utilizou-se o método *piece-by-piece* apresentado em (CAI, McKINNEY et al. 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. A abordagem *piece-by-piece* usa o fato de que grandes modelos podem ser decompostos em várias partes, resolvidas sequencialmente, com cada parte sendo adicionada a cada passo. O “pedaço” ou sub-modelo subsequente é composto por restrições adicionais que são incorporadas às partes anteriores, podendo envolver novas variáveis não existentes nos “pedaços anteriores”. No caso em estudo, são dois os sub-modelos com a decomposição feita por temas: quantidade(sub-modelo1) e qualidade de água(sub-modelo2). No sub-modelo1 ressalta-se principalmente o balanço hídrico, sendo as restrições envolvidas chamadas de Restrições de Disponibilidade Hídrica. No sub-modelo 2, 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.

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 Fertilirrigação. 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 constantes⁷, 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.

⁷ 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 desses ajustes.

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 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.

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 2).

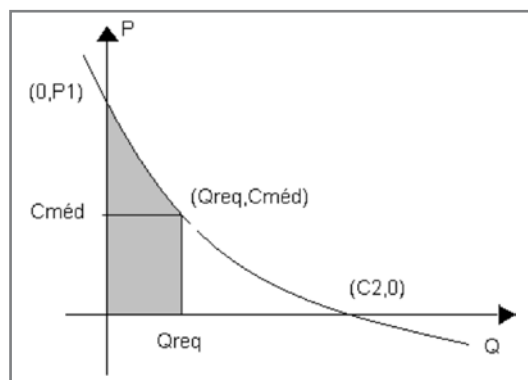


Figura 2. Ponto de operação para os usos consuntivos

Os pontos de operação considerados para cada usuário consuntivo foram a demanda por água (Q_{req}), que tanto pode ser a demanda requerida ou outorgada⁸. Neste estudo de caso, utilizou-se como ponto de operação os valores de outorga cedidas pela SECTMA (Secretaria de Tecnologia e Meio-Ambiente) e os custos operacionais (C_{med}), que foram obtidos com a COMPESA (Companhia Pernambucana de Saneamento) e diretamente com 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 2.

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) O benefício calculado foi então obtido com a integração da função de demanda inversa (ver Equação 3) para qualquer valor alocado. Para determinar a função de demanda para o uso não-consuntivo (geração de energia elétrica) bem como para a fertirrigação a estratégia é diferente, pois não há valores outorgados, e portanto não teríamos de antemão, o ponto de operação (uma das condições de contorno). Na verdade, o que existem nesses casos são os valores máximos que vamos considerar como sendo os próprios valores de consumo autônomo (C_2).⁹ 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. Finalmente no caso da fertirrigação, os valores autônomos (C_2) 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,

⁸ Há casos em que a demanda outorgada excede a demanda requerida, pois como os direitos são dados para vários anos, os usuários tendem a pedir mais do que o que realmente precisam.

⁹ Com o conhecimento prévio de uma das constantes (C_2) não mais seriam necessárias duas condições de contorno.









através da área sob a curva de demanda estabelecida para cada usuário. O benefício líquido é resultante da subtração dos valores de custo médio incorridos com a obtenção deste mesmo valor alocado.¹⁰ No caso do abastecimento industrial, além desse custo médio, o modelo debitará do valor do benefício bruto, um custo adicional, se houver sobra de efluentes¹¹. No modelo, caso não seja possível a alocação nas áreas fertirrigadas de todo o efluente produzido pela agroindústria, a mesma deverá arcar com os custos do tratamento dessa 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. 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.

$$F - OBJ = \sum_{mun} B.Liq_{AH}(usuario_{mun}) + \sum_{aind} B.Liq_{AI}(usuario_{aind}) + \sum_{pch} B.Liq_{GE}(usuario_{pch}) + \sum_{firtig} B.Liq_{FIR}(usuario_{firtig}) \quad (4)$$

¹⁰ Lembrar que nos usos (AH e AI) em que eram necessárias duas condições de contorno, uma delas era justamente o ponto de operação, que era o valor de alocação associado ao custo médio de obtenção da água na curva de demanda para aquele uso. Por ter esta associação este ponto implica no máximo benefício líquido possível. Por isso este valor, considerando que os usuários se comportam de forma racional, é o valor demandado pelos mesmos. Nos casos de GE e fertirrigação como não é solicitado nenhum valor o ponto de operação não é um dado do usuário, mas uma vez determinada a curva de demanda, bastaria procurar o ponto de alocação associado ao custo médio de obtenção da água para os referidos usos, e portanto é possível se obter um ponto de operação para esses usos, que vai ser útil na análise dos resultados.

¹¹ 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.

Assim, o $B.Liq_{AH}(usuario_{mun})$ é a soma dos benefícios líquidos anuais dos municípios (*mun*), 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 (*firtig*) na fertirrigação (FIR). As Restrições de Disponibilidade Hídrica (Sub-modelo 1) são as seguintes:

-  Equação de *Balance* nas Junções Principais e nas Junções Afluentes;
-  Balanço de massa para os reservatórios;
-  Fluxo mínimo para atender demandas ecológicas;
-  Vazão de Restrição a jusante dos barramentos;
-  Capacidades Máxima e Mínima do Reservatório;
-  Conservação do Volume Armazenado ao fim do período de análise;
-  Capacidade máxima instalada de Pequenas Centrais Hidroelétricas-PCH's;
-  Quantidades limite para aplicação de efluentes.

Com relação a Restrições de Qualidade de Águas (Sub-modelo 2), basicamente as mesmas visam assegurar que a escolha das variáveis de decisão (alocações por uso) sejam tais que o oxigênio dissolvido (OD)¹² 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. Isso 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. Na realidade, no caso de reservatórios, a preocupação maior no que se refere

¹² Para representar e simular a curva de oxigênio dissolvido no modelo, utilizaram-se as equações representativas do clássico modelo dentro da Engenharia Ambiental, o modelo dos pesquisadores Streeter e Phelps STREETER, H. W. and E. B. PHELPS (1925). "A Study of the pollution and natural purification of the Ohio River." Public Health Bulletin.

RESULTADOS

Primeiramente serão apresentados os resultados do sub-modelo 1, i.e. os valores ótimos obtidos levando em consideração apenas restrições de disponibilidade hídrica.

Os valores de benefício líquido por usuários, obtidos na solução ótima do sub-modelo 1 resultam em alocações praticamente iguais aos valores outorgados no caso dos usos consuntivos (AH e AI) e, no caso das PCH's, iguais ao ponto de operação, que é o equivalente ao valor concedido para o caso do uso não-consuntivo GE. Isto ocorre em todos os meses, até mesmo nos meses mais secos – Novembro e Dezembro.

Na Tabela 1, observa-se que praticamente apenas o usuário PCHCIP sofre uma redução de benefícios. Este, juntamente com Vitória – que também sofre uma redução sendo que bem pequena – e a PCHJB são os usuários que recebem os menores benefícios líquidos.

TABELA 1
Limites estimados dos benefícios líquidos
considerando os valores oficialmente concedidos
os resultantes do sub-modelo 1

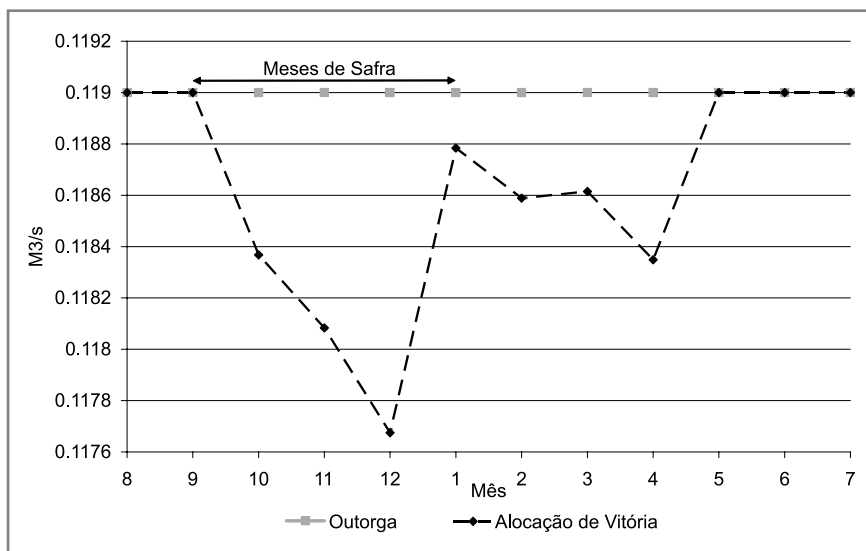
Usuário demandante	Valor máximo de Benefício líquido, equivalente ao valor outorgado (milhões R\$)	Benefício líquido obtido a partir do Sub-modelo 1 (milhões R\$)	Diferença arredondada entre o máximo e o obtido pelo Sub-modelo 1 (%)
Recife	16,31175	16,31175	100,0%
Vitória	0,4041	0,40408	100,0%
JB	22,22689	22,22681	100,0%
Sibéria	1,2732	1,27282	100,0%
Liberdade	12,96641	12,96633	100,0%
PCHJB	0,13313	0,13307	100,0%
PCHCIP	0,25653	0,25238	98,4%

Na realidade, o pleno atendimento do usuário PCHJB, não se deve aos benefícios resultantes do mesmo, e sim devido ao seu caráter não-consuntivo. Na verdade, caso o não atendimento pleno da PCHJB, de alguma forma disponibilizasse mais água para os outros usuários, o modelo certamente o faria. Analisando em detalhes os valores alocados resultantes, por usuários e por mês, observa-se que para os meses mais secos (Novembro - Dezembro) coincidentes com os meses de safra (Setembro - Janeiro), 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 é para assegurar que os usuários que recebem os maiores benefícios sejam atendidos. O modelo então procura resolver conflitos segundo o critério de maximização do bem-estar da sociedade como um todo.

De fato entre os meses de Setembro a Abril, para o município de Vitória (veja Figura 3) deixam de ser alocados, para todos os meses, em torno de 1% do valor outorgado, sendo o mês de Dezembro aquele onde ocorre a maior redução. Esse é um dos meses de safra, portanto todos os outros usuários consuntivos demandam água. Ao contrário de Vitória, esses usuários têm os seus valores de outorga atendidos uma vez que os valores de benefício resultantes de todas as agroindústrias bem como os de Recife são superiores aos da referida cidade. 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 à mesma, que está a jusante de Vitória. Isto implica num conflito entre os dois usos, pois o atendimento pleno a Vitória reduziria 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 (veja Tabela 1). A perda de benefícios da PCHCIP é de aproximadamente R\$ 4.144,00 num total de R\$ 256.521,00 de benefícios anuais possíveis de serem obtidos pelo referido usuário. Já as perdas de benefícios resultantes do não atendimento pleno a Vitória são desprezíveis.

Em relação ao uso de fertilirrigação os resultados do sub-modelo 1 alocam os efluentes de tal forma que não há sobras. Deve-se ressaltar que a informação

Figura 3. Alocação ótima para o município de Vitória do Sub-modelo 1 vs. Valor Outorgado



mais confiável obtida da configuração atual da distribuição das áreas nos nós de demanda que recebem os efluentes na safra toda, foi a da distribuição entre as mesmas e não o quantitativo de cada uma. Assim, com relação ao que ocorre hoje, sabe-se com mais segurança quais nós de demanda estão recebendo efluentes, e não quanto. A alocação ótima (resultado do sub-modelo 1) 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 ($300 \text{ m}^3/\text{ha}$). Ao comparar as duas configurações (ótima e atual) no que se refere a quais nós recebem efluentes encontra-se bastante similaridade. 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 em FIR19. Com relação a distribuição dos efluentes entre os nós de demanda, observa-se que em todas as agroindústrias, a distribuição entre os nós resulta em diferentes áreas fertirrigadas, mas que representa o mesmo percentual da área máxima do nó. Por exemplo, em todos os nós onde a JB aloca efluentes: FIR3-FIR7, o valor ótimo da área fertirrigada representa aproximadamente 64,76% da

área máxima possível de ser fertirrigada naquele nó. Entre os meses, a divisão foi idêntica.¹³

Para explicar este comportamento, calculou-se o valor percentual de área que coincide com o ponto de operação para todos os nós de demanda por efluentes para fertirrigação. O mesmo foi obtido através da curva de demanda calculada no caso da fertirrigação¹⁴, (ver nota de rodapé 9 na pág. 12). Como já explicado, este é o valor de área (que requer uma quantidade de água) associado ao custo médio¹⁵, e portanto o que maximiza o benefício líquido de cada um dos nós. O valor encontrado de ponto de operação foi idêntico para todos os nós e igual

¹³ Como a área total a ser fertirrigada é durante os 5 meses de safra, a área máxima possível de ser fertirrigada em cada mês é 1/5 da total. Como resultado do sub-modelo 1 este percentual manteve-se o mesmo para cada mês. Isto será explicado mais adiante pelo fato de não haver restrição de cargas neste primeiro sub-modelo.

¹⁴ Também poderá ser obtido no caso da geração de energia elétrica.

¹⁵ Neste custo não foi considerado o custo de transporte, pois atualmente estas agroindustriais não o têm, já que lançam nos locais mais próximos. Como associamos este custo ao valor demandado atual, este custo tinha que estar relacionado aos gastos atuais.

a 67,65%. O resultado não só dos nós fertirrigados pela JB (64,76%), como também do nó utilizado pela Sibéria (12,03%) e dos nós associados a Liberdade (65,66%) mostram que na verdade, nenhuma das alocações atinge este máximo. Isto se deve a não existência de um total de efluentes suficiente para tal, pois não há sobra (devido a não limitação da qualidade de águas) e mesmo assim a área ideal (o ponto de operação) não é atingida.

Com relação a igualdade entre os meses, o que poderia diferenciar a alocação, no que se refere a área percentual, de um mês para o outro, seria a carga resultante, 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.

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 Fertirrigação, usos diretamente envolvidos na produção e alocação do efluente com impactos na qualidade das águas. Essas perdas são da ordem de R\$ 350.000,00 na AI, o que representa em torno de 1% do valor resultante do sub-modelo1 para o referido uso. Contudo, na fertirrigação, as perdas são maiores, chegando a R\$ 776.000,00, ou seja, 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. Isto ocorre pois os efluentes produzidos por essa agroindústria não são mais totalmente alocados.

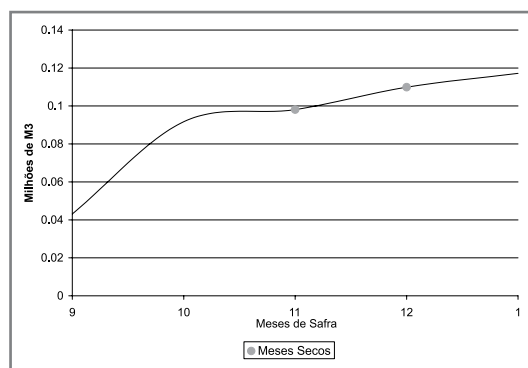


Figura 4. Sobra de Efluentes da JB e em destaque os meses secos

Há sobra de efluentes e, portanto, há um custo imputado à agroindústria que deverá tratar essa sobra. A Figura 4 mostra a sobra de efluente da JB durante os meses de safra, com destaque para os meses secos (Dezembro e Janeiro). 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. Na verdade, observa-se que a alocação em outros nós, que incorrem em custos de transporte, é pouco significativa. Isto leva a crer que os custos com o transporte do total de efluentes na soma geral¹⁶, levam a uma redução maior dos benefícios do que o tratamento das sobras¹⁷.

No que se refere às perdas na fertirrigação que são as maiores, as mesmas se verificam basicamente nos nós de demanda fertirrigados com os efluentes produzidos pela JB. Nesses, as perdas ocorrem principalmente pela redução das áreas fertirrigadas nos nós onde se alocava totalmente, isto é, sem sobras, os efluentes no resultado do sub-modelo1¹⁸.

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, implicando em menores áreas fertirrigadas. Como exemplo, será explicitada a nova distribuição das áreas fertirrigadas, nos diversos meses, no nó FIR7 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 (221,48ha). Sendo assim, ao fim da safra, aproximadamente 65% da área de cana total (1107,43ha) do nó será fertirrigada, ou seja, 716,5ha. Com relação aos resultados do sub-modelo 2 no que se refere a alocação de efluentes no nó FIR7,

¹⁶ Deve-se ressaltar que os custos com transporte compõem a função benefício relativa ao uso da fertirrigação e a sobra de efluentes entra como custo para uso agroindustrial. No entanto, o que se maximiza é a soma dos benefícios líquidos de todos os usos.

¹⁷ 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

¹⁸ Há também perdas de benefícios devido à alocação dos efluentes nos nós onde, sem restrições de qualidade, não haveria, pois os mesmos implicam em custos de transporte.

TABELA 2
Redução da área e benefícios dos nós demanda por efluente

Nós demanda por efluentes de JB	Área Total (ha)	Área fertirrigada obtida pelo Sub-modelo 1 (%)	Áreas fertirrigadas obtida pelo Sub-modelo 2 (%)	Redução da área fertirrigada com o modelo completo (ha)	Redução no benefício (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

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 tipo¹⁹, a menos da que está relacionada ao nó FIR6. Na verdade, esse nó está numa área responsável pela vazão afluente ao reservatório Águas Claras, e a restrição da carga orgânica aí lançada previne uma futura eutrofização do mesmo.

Na tabela 2 pode-se observar que os nós com maiores áreas totais (maiores valores de C2), ao sofrerem reduções nas áreas fertirrigadas equivalentes aos de menor área (ver FIR3 e FIR5), ocasionam uma

redução no benefício total bem menor²⁰. Dessa forma, entre os meses, como já visto, a restrição é sentida principalmente nos meses mais secos. Entre os nós, há uma tendência dos nós de demanda com menores áreas serem mais penalizados²¹. De fato, levando em conta a concepção do modelo, cada um desses nós de demanda é 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.

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, 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 (Figura 5), enquanto mantém-se os valores para Recife e para as agroindústrias, nos meses de safra. Nota-se claramente uma redução na disponibilidade hídrica

²⁰ 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.

²¹ Na realidade, a questão da localização ao longo do rio também influi, daí poder-se-ia 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.

¹⁹ São restrições às cargas lançadas nas junções do rio, de forma que o oxigênio dissolvido (OD) no início e no fim de cada trecho esteja acima dos limites permissíveis pela legislação.

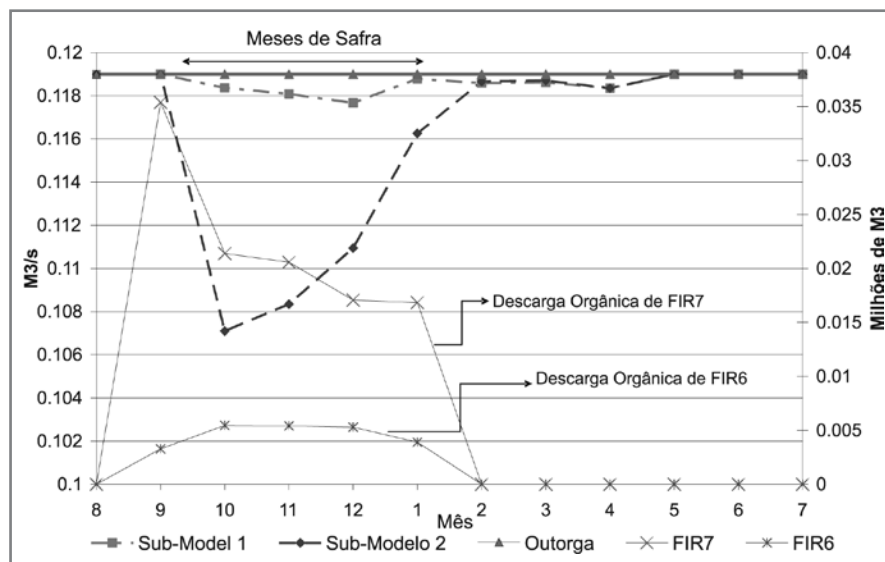


Figura 5. Alocação de água para Vitória resultante do Sub-modelo 1 e Sub-modelo 2 com valor outorgado (Escala a esquerda) vs. Alocação de efluentes resultante do sub-modelo 2 para as áreas fertilirrigadas FIR6 e FIR 7 (Escala a direita)

em razão das restrições de qualidade, nesses meses. Diferentemente do sub-modelo 1, a maior redução não se dá no mês mais seco, e sim no mês em que se alocam mais cargas (mês com maiores vazões), o que exige a manutenção de mais água no rio para garantir a diluição dos efluentes.²²

Além disso para evitar um processo de eutrofização, um volume maior de água é mantido no reservatório de Águas Claras (Figura 6). Esse último fator de redução na disponibilidade hídrica é o responsável pelo que ocorre nos meses seguintes à safra. De Fevereiro a Abril, os resultados do sub-modelo 1 mostram que a redução na alocação ótima de Vitória foi mantida, até mesmo quando não havia mais ne-

hum consumo das agroindústrias, a fim de garantir a vazão no trecho associado à PCHCIP (Figura 7).

Os resultados do sub-modelo 2 mostram que as reduções persistem, mas os valores alocados são ligeiramente maiores aos resultados do sub-modelo 1. Isto decorre das maiores liberações de Águas Claras, que durante a safra, devido a limitações de qualidade, armazenou maiores volumes de água. (Figura 8).

Um outro resultado interessante é o preço-sombra (multiplicador de Lagrange) referente ao limite de fósforo no reservatório de Águas Claras, que é facilmente obtido junto a solução. Quando um multiplicador de Lagrange assume um valor diferente de zero, implica que a restrição associada ao mesmo é ativa. Pode-se obter esse valor²³ para cada mês e o mesmo fornecerá uma estimativa do custo de prevenção por mês. Eles podem ser comparados com os custos de

²² Deve ser enfatizado que as restrições que impactam na alocação dos efluentes nos nós de demanda por efluentes da JB (FIR6 e FIR7), não são do mesmo tipo. Enquanto que as restrições relacionadas a FIR7 são referente a limitações de OD no início e no fim do trecho não ultrapassarem os limites da legislação, as relacionadas a FIR6, que é uma área responsável pelos volumes afluentes ao reservatório de Águas Claras, são para prevenir uma futura eutrofização.

²³ Este valor representa o acréscimo em milhões de reais que se teria no benefício líquido total (função-objetivo), se a restrição do limite de fósforo permissível, que é dada através da concentração permissível do mesmo (0.025 gP/m³) fosse acrescida de 1 gP/m³.

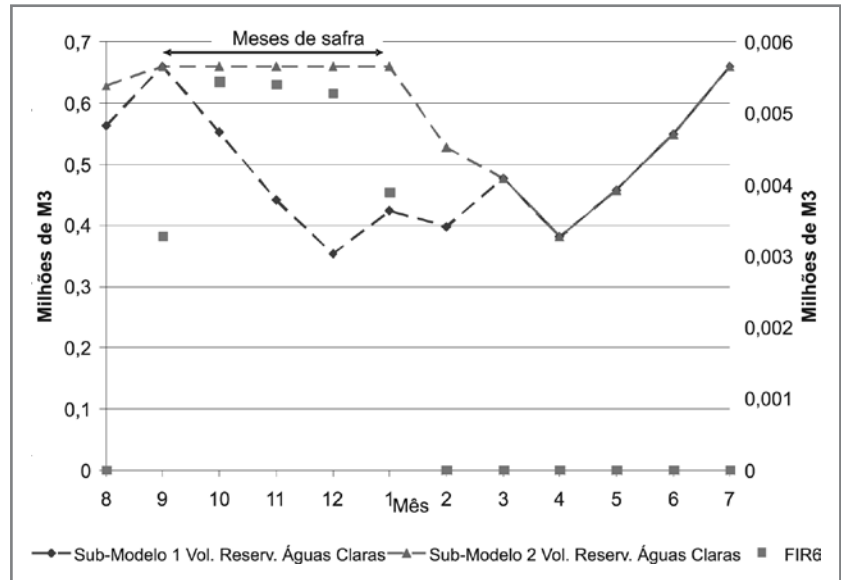


Figura 6. Volume armazenado do reservatório de Águas Claras resultante do Sub-modelo1 e sub-modelo2 (Escala a esquerda) e Alocação resultante do sub-modelo2 para área de demanda efluente FIR6 (Escala a direita)

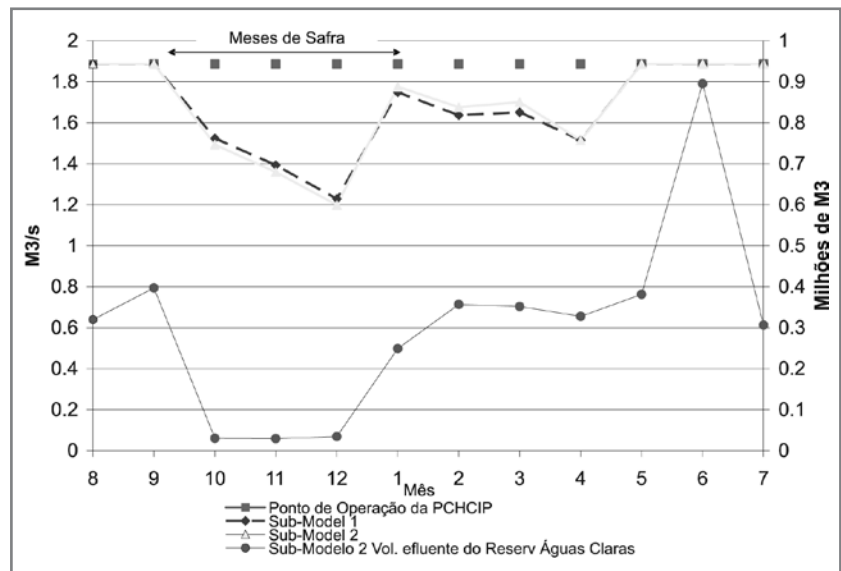


Figura 7. Alocação ótima para PCHCIP do Sub-modelo 1 com o ponto de operação (Escala a esquerda) vs. Volume efluente do reservatório de Águas Claras resultante do sub-modelo 2 (Escala a direita)

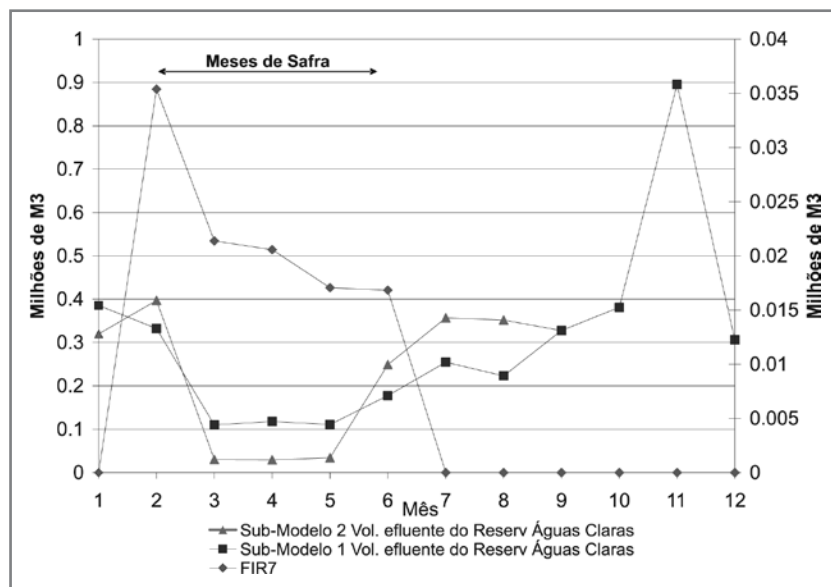


Figura 8 Volume efluente do reservatório de Águas Claras do sub-modelo1 e sub-modelo2 (Escala a esquerda) vs. Alocação de efluentes resultante do sub-modelo2 para a área irrigada FIR7 (Escala a direita)

medidas corretivas devidamente amortizados, para subsidiar a decisão de políticas e estabelecimento de taxas. É perfeitamente possível através do modelo identificar quanto perdem e quem são os usuários que arcarão com limites mais ou menos restritivos. Bastaria para isso comparar resultados sem e com diversos limites de carga de fósforo admissível. Dessa forma, um esquema de compensação ou de subsídio cruzado ao se implementar uma cobrança poderia ser melhor embasado e levar a eficiência no sentido econômico.

CONCLUSÕES E CONTINUIDADE DA PESQUISA

O modelo respondeu com clareza à lógica da distribuição, considerando a maximização dos benefícios globais. Restrições de qualidade de água²⁴ foram introduzidas no modelo final, e mostraram mudanças signi-

ficativas na distribuição espacial e temporal da alocação da água e do vinhoto para irrigação. A integração das relações econômicas dentro de modelos hidrológicos de bacia tornam possível a determinação simultânea da oferta e demanda da água, bem como os benefícios econômicos advindos da mesma. Dessa forma, a operação do sistema hidrológico é dirigido 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. Segundo McKinney, (1999) a decisão de políticas públicas de águas pode se beneficiar diretamente da melhoria da modelagem econômica-hidrológica integrada. 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.

Neste sentido, os primeiros resultados relativos a avaliação de mecanismos econômicos alocativos, através da modelagem econômico-hidrológica integrada, estão sendo obtidos: Moraes et al (2006b) avaliaram o mecanismo de outorga, com relativa facilidade usando a modelagem, como implementador

²⁴ Para maiores detalhes com relação à modelagem de qualidade de águas utilizada ver Moraes et al (2005).

da meta social ótima. Estudos para avaliar metodologias de cobrança propostas para a bacia do Pirapama estão em andamento, através de uma parceria com a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Ademais, encontra-se atualmente em desenvolvimento através de um novo convênio FINEP com recursos CT-HIDRO, um Sistema de Apoio a Decisão Espacial (SADE-GBHidro) (Moraes et al, 2006a) que permitirá ao decisor a construção de vários modelos de otimização utilizando a modelagem econômico-hidrológica integrada, aplicados sobre diversas bacias hidrográficas representadas através de Sistemas de Informação Geográficos.²⁵

O referido sistema, através da sua interface gráfica, permitirá a definição, modificação e visualização de qualquer bacia, incorporando e tratando os seus dados geográficos de forma apropriada à aplicação de uma modelagem econômico-hidrológica integrada.

Além disso, permitirá a obtenção da representação abstrata da bacia através de uma rede de nós e links, que serão os elementos e suas relações considerados no modelo. Esta representação se constituirá numa base de dados temática, que levará uma boa parte das informações da base de dados geográfica e ao mesmo tempo integrará os dados relativos a fatores sociais, econômicos e ambientais, possibilitando o seu uso no processo decisório.

Referências

- BRAAT, L.C. ; W.F.J. LIEROP. 1987. Integrated economic-ecological modeling. In: **Integrated economic-ecological modeling**. Amsterdam: Elsevier Science Publisher, p.49-67.
- CAI, X. ; D.C. MCKINNEY, et al. 2000. Solving large nonconvex water resources management models using generalized benders decomposition. **Operations Research v.2, p. 235-245**
- CAI, X., D.C. MCKINNEY, et al. 2001. Piece-by-piece approach to solving large nonlinear water resources management models. **Journal of Water Resources Planning and Management: v.127, n.6, p.363-368.**
- CARRERA-FERNANDEZ, J. 1999. **Estudo da cobrança pelo uso da água na bacia hidrográfica do Rio Pirapama**. Recife: Companhia Pernambucana do Meio-Ambiente – CPRH. 243p. Publicação Projeto Pirapama
- GAMA, A. M. F. C. 1998. **Estudo da qualidade de água na Bacia do Rio Pirapama**. Recife : Companhia Pernambucana do Meio-Ambiente – CPRH. Publicação Projeto Pirapama
- MCKINNEY, D.C. et al. 1999. **Modeling water resources management at the basin level: review and future directions**. Colombo: IWMI, 59p. SWIN paper 6.
- MORAES, Marcia 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**. Tese(doutorado)- Universidade Federal de Pernambuco, Recife: UFPE. 261f.
- MORAES, Marcia M.G.A., et. al. 2005 **Modelo Econômico-Hidrológico integrado para gestão de bacias hidrográficas: abordagem piece-by-piece para incorporar a capacidade de autodepuração dos rios e limites de trofia dos reservatórios**. (Artigo submetido e preliminarmente aceito a Revista Brasileira de Recursos Hídricos.)
- MORAES, M.M.G.A, et al. 2006a **Sistema de apoio a decisão espacial para gestão de bacias hidrográficas incorporando modelagem econômico-hidrológica integrada para alocação de água: SADE-GBHidro**. (Artigo submetido e aprovado para apresentação no VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Gravata.)
- MORAES, M.M.G.A. ; ROCHA, S.P.V.; MENDES, G.B. 2006 **Avaliação de Mecanismos Econômicos Alcativos na Gestão de Bacias Hidrográficas Usando Modelo Econômico-Hidrológico Integrado**. (Artigo submetido e aprovado para apresentação no VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Gravata).

²⁵ O referido sistema fornecerá uma interface gráfica que possibilitará ao decisor aplicar sobre uma base de dados geográfica incluindo diversas bacias, uma base de modelos de otimização que integram as componentes econômicas e hidrográficas na identificação da alocação ótima de água entre os diversos usos. No referido projeto está sendo construído um modelo econômico-hidrológico integrado para a bacia do São Francisco.

RIBEIRO, M. M. R. 2000. **Alternativas para a outorga e a cobrança pelo uso da água: simulação de um caso.** Xvii, 200 f. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS,

ROSEGRANT, M W. et al, 2000. Integrated Economic-Hydrologic Water Modeling at the basin scale: The Maipo River Basin. **Agricultural Economics**, v.22,p.33-46.

STREETER, h. w. ; E. B. Phelps 1925. A Study of the pollution and natural purification of the Ohio River. **Public Health Bulletin**. n.146

Márcia Ma. G. Alcoforado de Moraes Professora Adjunto do Departamento de Economia - Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). *e-mail:* marciagamoraes@yahoo.com.br

José Almir Cirilo Professor Adjunto do Departamento de Eng. Civil da UFPE. *e-mail:* almir.cirilo@terra.com.br

Yony Sampaio Professor Titular do Departamento de Economia - UFPE. *e-mail:* sampyony@yahoo.com.br

Sérgio Parente Vieira da Rocha Mestre em Engenharia de Produção pela UFPE. *e-mail:* sergio.parente@gmail.com