

Universidade Federal de Pernambuco
Programa de Pós-Graduação em Economia da UFPE - PIMES

Lidia Maria Alves Rodella

**IDENTIFICAÇÃO DA FUNÇÃO BENEFÍCIO LÍQUIDO DA EXPLORAÇÃO
TURÍSTICA DO LAGO DE XINGÓ USANDO PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA**

Recife, 2009.

Lidia Maria Alves Rodella

**IDENTIFICAÇÃO DA FUNÇÃO BENEFÍCIO LÍQUIDO DA EXPLORAÇÃO
TURÍSTICA DO LAGO DE XINGÓ USANDO PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA**

**Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Economia da
Universidade Federal de Pernambuco -
PIMES como requisito para obtenção do
título de Mestre em Ciências
Econômicas, sob a orientação da
Professora Márcia Maria Guedes
Alcoforado de Moraes.**

Recife, 2009.

Rodella, Lidia Maria Alves

Identificação da função benefício líquido da exploração turística do lago de Xingó usando programação matemática / Lidia Maria Alves Rodella.

- Recife : O Autor, 2009.

76 folhas : fig. e tab.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CCSA. Economia, 2009.

Inclui bibliografia e apêndice.

1. Custo-benefício. 2. Água Qualidade. 3. Solos Teor de fósforo. 4. Usinas hidrelétricas – Xingó. 5. Água composição. I. Título.

330.15
330

CDU (1997)
CDD (22.ed.)

UFPE
CSA2009 - 055

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA
PIMES/PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO
MESTRADO EM ECONOMIA DE

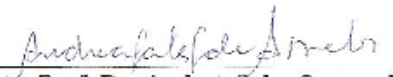
LIDIA MARIA ALVES RODELLA

A Comissão Examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera a Candidata Lídia Maria Alves Rodella **APROVADA**.

Recife, 12/03/2009.



Prof. Dr. Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes
Orientadora



Prof. Dr. Andrea Sales Soares de Azevedo Melo
Examinador Interno



Prof. Dr. Vanice Santiago Fragoso Selva
Examinador Externo/Departº de Geografia/UFPE

À minha mãe.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sua infinita misericórdia, por estar sempre comigo e pelas bênçãos que recebi ao longo dessa jornada.

À minha mãe por estar sempre comigo, apesar da distância, pela sua fé inabalável, pelo exemplo de força, coragem e determinação e por sempre acreditar que a educação é o melhor caminho a seguir.

Ao meu pai pelos ensinamentos sobre a vida.

Ao meu irmão Mateus, pela amizade e carinho.

Ao Carlos, amigo, companheiro, sempre paciente, por estar ao meu lado nos momentos difíceis e por não me deixar desistir.

À professora Márcia M^a. G. Alcoforado de Moraes, pelo exemplo de professora, pela orientação, dedicação e pela confiança.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Economia (PIMES) da UFPE com os quais tive a oportunidade e o prazer de aprender.

A Patrícia, secretária do PIMES, pelas broncas e pelo carinho.

Aos amigos de mestrado, em especial André Melo, André Pontes e Leonardo Ferraz, pela amizade desde a graduação, pela companhia, tanto nos estudos quanto nos momentos de descontração, pelas valiosas contribuições e ajudas.

À tia Ângela, por me acolher ao longo desses anos e pelo carinho.

À Fátima Mendes e Maria José Figueiroa, pela amizade e compreensão.

À Helen Frade, Wellington e Iliana Rezende, pela ajuda e compreensão.

Às pessoas que contribuíram e me auxiliaram na coleta dos dados de pesquisa, em especial, Aragão, da M-TUR e Silvia Oliveira, Diretora de Turismo de Canindé de São Francisco, pela atenção, ajuda e paciência.

Às pessoas que Deus colocou no meu caminho durante a viagem à região de Xingó para levantamento de informações, pela ajuda nas dificuldades que tive.

A todos aqueles, aqui não citados, que de alguma forma contribuíram para a obtenção de informações e a realização desta dissertação, o meu muito obrigado.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma função benefício líquido para o uso recreacional do lago de Xingó, representada pelo lucro do empresário prestador dos serviços de passeios de catamarã, função da carga de fósforo aportada no lago, resultante dos passeios. Dessa forma, busca-se mensurar custos sociais, que seriam as reduções de benefícios da atividade, caso haja limitações às cargas de fósforo no lago, para evitar processos de deterioração da qualidade da água. A metodologia utilizada foi desenvolvida neste trabalho e tem como base a resolução de um problema de programação matemática linear inteira mista. Formulou-se um problema de maximização do lucro, simulando o comportamento racional do empresário, representativo do benefício econômico da atividade, sujeito a uma restrição de qualidade da água, que impõe limite de carga de fósforo aportado ao lago para a atividade. A partir da alteração desse limite foram obtidas diferentes soluções da otimização, ou seja do lucro ótimo, indicador do benefício líquido do uso recreacional do lago. A restrição de qualidade se apresentou ativa em todas as otimizações, o que implica numa relação direta entre carga de fósforo e lucro, como esperado. Para verificar a robustez do modelo de otimização utilizado, foi realizada uma análise de sensibilidade para algumas variáveis exógenas utilizadas. Os resultados mostraram que mesmo diante de alterações significativas das mesmas, os valores dos benefícios se mantêm relativamente estáveis, indicando uma certa independência destes possíveis erros.

Palavras-chave: Função benefício líquido. Custos Sociais. Qualidade da Água. Carga de fósforo.

ABSTRACT

This dissertation introduces a net benefit function for the recreational use of the Xingó Lake, from the profit of the manager that offer the catamaran tour services, having phosphorus load from the tours as independent variable. So, look for measure social costs, that would be the benefit reduction of the activity, if becomes necessary impose load phosphorus restriction in the lake, to avoid damage to the water quality. The methodology used was developed in this work and is based in solution of a mixed integer nonlinear programming. Was formulated a profit maximizing problem, simulating the manager rational behavior, representative of the activity economic benefit, subject to a water quality constrain, that impose limit to the phosphorus load allocated in the lake by the activity. From changes in this limit different solutions were found from the optimization, in other words the optimum profit, index of the net benefit from the recreational use of the lake. The restriction was binding in all optimizations, what implies a direct relationship among load phosphorus and profit, as expected. To verify the robustness of the optimization model used, a sensibility analyses was made for any exogenous variables. The results showed that even before significant changes of them, the benefit values remain relatively stable, indicating a certain independence of these possible errors.

Key-words: Net benefit function. Social costs. Water quality. Phosphorus load.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
2. ÁREA DE ESTUDO DE CASO.....	12
3. PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA	18
3.1 TURISMO E LAZER EM LAGOS E RESERVATÓRIOS INTERIORES.....	18
3.2 EUTROFIZAÇÃO	20
3.3 ASPECTOS ECONÔMICOS DA ÁGUA	24
3.4 A GESTÃO INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS (GIRH)	26
4. REFERENCIAL TEÓRICO	29
4.1 VALORAÇÃO ECONÔMICA DO MEIO AMBIENTE E MÉTODO DO CUSTO DE OPORTUNIDADE.....	29
4.2 A PESQUISA OPERACIONAL E A PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA	32
4.3 A OTIMIZAÇÃO NA GESTÃO DE ÁGUAS.....	36
5. METODOLOGIA	41
5.2 O MODELO	43
5.2.1 Problema de Maximização	44
6. RESULTADOS.....	49
6.1 A FUNÇÃO BENEFÍCIO LÍQUIDO.....	54
6.2 A FUNÇÃO CUSTO SOCIAL AMPLO.....	56
6.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	57
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	62
REFERÊNCIAS.....	64
APÊNDICES.....	69

1. INTRODUÇÃO

A água é essencial para a vida, o desenvolvimento, a saúde e a redução da pobreza. Ela detém importantes e diversos usos e valores para a sociedade, por exemplo: uso para beber, cozinhar, industrial, hidroelétrico, transporte, pesca, agricultura, valores ecológico, estético e recreacional. Muitos desses benefícios possuem características de bens públicos, resultando em importantes desafios para a aplicação dos instrumentos econômicos na gestão da água, principalmente porque é difícil organizar mercados para bens públicos.

Segundo Ramos (1996), a água é um recurso dificilmente apropriável, uma vez que é fisicamente e/ou legalmente inviável para um agente manter o controle exclusivo de sua utilização, e, portanto, de uso não exclusivo: ela possui a natureza de um bem público a qualidade variável. Os bens públicos são fontes de falhas de mercado, situações em que o comportamento individual não conduz à eficiência paretiana, quando uma melhoria adicional para um agente qualquer só poderá ser obtida às expensas de um outro. As limitações do mercado, que não permitem associar um preço à qualidade da água, conduzem a uma degradação da qualidade da água.

Diante dos múltiplos usos da água, da sua importância para o desenvolvimento da sociedade e considerando que a sua escassez não está relacionada apenas com fenômenos meteorológicos, mas também com a forma pela qual esse recurso é utilizado, é relevante atentar para a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos, definida em CAP-NET (2008) como um processo sistemático para o desenvolvimento sustentável, alocação e monitoramento dos recursos hídricos no contexto de objetivos social, econômico e ambiental.

Um paralelo pode ser feito entre o que pode ocorrer com a falta de gestão dos recursos hídricos e o exemplo de esgotamento de um recurso natural causado pela exploração sem planejamento citado por Hardin (1968, *apud* Bandeira, 2006) denominado “A Tragédia dos Comuns”. O recurso em questão é um campo, sem propriedade definida, onde a população leva seu rebanho para pastar. O problema começa a tomar forma à medida que cada pastor resolve ampliar seu rebanho, pois seu incremento lhe acarreta um benefício maior que o dano causado pela redução da disponibilidade de pasto, já que este último é repartido por todos os pastores. Por se tratar de um recurso finito, à medida que os pastores levavam mais animais ao campo, uma

menor área de pasto restava a todos. Sem o adequado planejamento de uso, o recurso se esgotou causando danos aos próprios pastores e, também, à sociedade pela perda da renda gerada pela atividade. Nesse caso, pode-se, ainda, dizer que o excesso de animais de um pastor provocou efeitos adversos na atividade econômica de outro pastor e na sociedade em que vive.

Visando evitar a ocorrência desse tipo de tragédia com a água, através do seu uso sem planejamento, e face à imponência da bacia do rio São Francisco e sua importância para o país, esta dissertação tem como objetivo fornecer instrumento que auxilie no desenvolvimento de atividades recreacionais no lago de Xingó, um de seus reservatórios, levando em consideração a questão ecológica. O lago foi criado a partir da construção da Usina Hidroelétrica de Xingó, inaugurada em 1994, e situada em Canindé de São Francisco (SE), na divisa dos Estados de Alagoas e Sergipe. Com o reservatório, as antes inavegáveis corredeiras deram lugar a águas mais calmas, possibilitando passeios de catamarã em meio aos cânions do São Francisco, que têm atraído em média 80.000¹ visitantes por ano.

Além do desenvolvimento de atividades recreacionais, como os passeios de catamarã, o lago abrange outros usos, como a piscicultura, a irrigação para a agricultura, o abastecimento humano e o turismo/lazer. Esses não se relacionam diretamente, mas suas ações têm influência sobre todos os usos e não é levada em consideração na fixação do preço de mercado dos produtos dessas atividades desenvolvidas, resultando assim em externalidades². Além disso, em alguns desses usos, a influência não diz respeito à redução de disponibilidade, e sim à qualidade da água, que, de acordo com Ramos (1996), é um bem público e uma externalidade. Bem público pela impossibilidade de apropriação, significando que um agente não pode ter o controle exclusivo do bem (no caso, a qualidade da água), externalidade negativa, pois quando uma empresa descarrega os resíduos em um lago e não está submetida a nenhum tipo de restrição, ela modifica a qualidade deste recurso. Isto influencia o consumo dos outros agentes, os quais não têm controle sobre as descargas da empresa.

O objetivo deste estudo é construir uma função benefício líquido do uso do reservatório para atividades turísticas, relacionada com a carga de fósforo, vista como uma externalidade

¹ Segundo informações de um guia de turismo da região.

negativa, que o seu uso deixa no lago e a estimação do custo da qualidade da água. Essa carga impacta sobre a qualidade da água do reservatório, uma vez que altas concentrações de fósforo acarretam o desenvolvimento do processo de eutrofização³ do lago, prejudicial para os seus diversos usos⁴.

Cabe aqui destacar que o turismo na região está em fase de crescimento e é visto como uma atividade potencial para o desenvolvimento econômico e social da região, que possui outros atrativos além dos passeios de catamarã pelo lago de Xingó e seus cânions, tais como o rio São Francisco, a Usina Hidrelétrica de Xingó, as trilhas ecológicas, os sítios arqueológicos, o Museu do Sertão, a cidade histórica de Piranhas e o Museu de Arqueologia de Xingó. Segundo estudo de Barbosa e Melo (2000), que traçou um cenário mais provável de crescimento dos municípios de Canindé de São Francisco, de onde saem os passeios de catamarã, e de Poço Redondo, no horizonte de trinta anos, tanto o setor agrícola quanto o de turismo, seriam favorecidos no primeiro município, que manteria um crescimento econômico mais acelerado e com maior urbanização. Tal fato aconteceria devido aos investimentos em turismo e pela possibilidade de investir os elevados valores arrecadados em infra-estrutura econômica e social. O setor terciário, nesse horizonte de tempo, seria ampliado, movido pela renda criada pelos projetos em agricultura irrigada e pela expansão do turismo, mas também por investimentos. Estimulados pelo turismo, o comércio e o serviço cresceriam, acompanhando a evolução urbana e o fluxo turístico. Ainda segundo a pesquisa, os segmentos mais expressivos e de maior dinamicidade do setor terciário deverão ser os de alojamento, alimentação e comércio, que hoje são os mais importantes na região em termos de geração de emprego e renda. O provimento de uma estrutura turística impulsionará a ampliação desse segmento, com o surgimento de novos estabelecimentos de hotelaria, restaurantes, artesanato, atividades de entretenimento e lazer.

² Quando uma ação de um produtor ou consumidor tem influência sobre outros produtores ou consumidores, sem que seja levada em consideração na fixação do preço de mercado, diz-se que ocorreu uma externalidade. Esta pode ser positiva, quando o efeito é benéfico, ou negativa, caso contrário (PINDYCK; RUBINFELD, 2002).

³ 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.

⁴ Diminuição do uso da água para recreação, balneabilidade e redução geral na atração turística, mortandade de peixes, elevação nos custos de tratamento da água, modificações na qualidade e quantidade de peixes de valor comercial, aumento de ferro e manganês na forma solúvel, afetando a geração de energia por acarretar o desenvolvimento de ferrugem nas turbinas, e a toxicidade das algas. Esses dois últimos comprometendo o abastecimento humano, podendo gerar sérios problemas de saúde para a população usuária.

Assim, busca-se contribuir para o desenvolvimento econômico da região a partir do turismo, mas se preocupando com as possíveis consequências ambientais dessa atividade, de forma que não se comprometa a qualidade da água, evitando prejuízos no longo prazo para a região e a sociedade como um todo. Com a presente pesquisa procura-se uma forma de aumentar a eficiência da gestão ambiental com a utilização complementar de um critério econômico, ou seja, reforçando a dimensão humana da gestão ambiental.

Para obter a função benefício líquido representativa do uso, foi formulado e resolvido um problema de maximização do lucro diário do empresário responsável pelos passeios de catamarã no lago, decidindo o número de viagens e o percentual de ocupação dos seus barcos, diante de diversas restrições. Dentre elas, a de qualidade da água, que foi alterada para diversos valores de carga de fósforo de forma a obter pontos de lucro máximo sob diferentes limites, como poderá ser observado no Capítulo 6. Em seguida, procurou-se identificar uma forma funcional que melhor representasse estes pontos, utilizando para isso hipóteses de funções e estimação dos seus parâmetros através de minimização dos erros ao quadrado. A função que melhor aproximou os pontos foi uma polinomial de grau 4. A mesma pode ser utilizada para auxiliar uma possível política pública de desenvolvimento econômico a partir do turismo baseado na sustentabilidade da região de estudo, fornecendo para o formulador de políticas os efeitos diretos de prováveis cenários de restrição de emissão de carga de fósforo para o uso turístico/recreacional do lago de Xingó. Ainda, a metodologia aqui desenvolvida poderá ser extrapolada para outras regiões que exploram lagos para o desenvolvimento do turismo.

A função encontrada poderá também fazer parte de uma modelagem econômico-hidrológica integrada para alocar as cargas entre os usuários de forma a maximizar o benefício de todos os usuários do lago, ou seja, o benefício social. Modelos Econômico-Hidrológicos Integrados (Moraes, 2003 e Cai *et al.*, 2000) maximizam o benefício social da água de uma bacia hidrográfica, respeitando os limites de disponibilidade hídrica e qualidade dos corpos d'água. O benefício social é a agregação das funções benefício de todos os usuários em uma única função que ao ser maximizada, sujeita a restrições hidrológicas (quantidade/qualidade de águas) e institucionais, determinará uma alocação ótima de água entre os usos, contribuindo dessa forma para o melhor planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos desta região e possibilitando seu desenvolvimento sustentável. Resultados como esse podem apoiar decisões e políticas

públicas, que através de instrumentos econômicos viabilizem uma real Gestão Integrada de Recursos hídricos (GIRH).

Além desta introdução, a dissertação está estruturada em mais seis capítulos. No próximo há uma breve caracterização da região de estudo, em seguida são apresentadas a problemática e a justificativa, embasadas nos aspectos do desenvolvimento de atividades turísticas em lagos e reservatórios interiores, no processo de eutrofização, nos aspectos econômicos da água e na Gestão Integrada de Recursos Hídricos. No capítulo seguinte está o referencial teórico sobre pesquisa operacional, programação matemática e finalizando com algumas aplicação de otimização de recursos hídricos. No capítulo cinco é descrita a metodologia desenvolvida na dissertação, seguida pelos resultados e sua análise de sensibilidade. As considerações finais encerram o estudo.

2. ÁREA DE ESTUDO DE CASO

A bacia do Rio São Francisco é a terceira bacia hidrográfica do Brasil e a única totalmente brasileira. Drena uma área de 640.000 km² e ocupa 8% do território nacional. A Bacia abrange sete unidades da federação - Bahia (48,2%), Minas Gerais (36,8%), Pernambuco (10,9%), Alagoas (2,2%), Sergipe (1,2%), Goiás (0,5%), e Distrito Federal (0,2%) - e 504 municípios (cerca de 9% do total de municípios do país). Entre as cabeceiras, na Serra da Canastra, em Minas Gerais, e a foz, no oceano Atlântico, localizada entre os estados de Sergipe e Alagoas, o rio São Francisco percorre cerca de 2.700 km (IBGE, 2005, p. 285-286).

De acordo com o Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco - PBHSF (2004-2013), devido à sua extensão e diferentes ambientes percorridos, a Bacia está dividida em 4 regiões, que podem ser observadas na figura a seguir: Alto São Francisco - das nascentes até a cidade de Pirapora (111.804km² - 17,5% da região); Médio São Francisco - de Pirapora até Remanso (339.763km² - 53% da região); Sub-Médio São Francisco - de Remanso até Paulo Afonso (155.637km² - 24,4% da região); e o Baixo São Francisco - de Paulo Afonso até sua foz (32.013km² - 5,1% da região). Cerca de 16,14 milhões de pessoas (9,5% da população do país) habitam a bacia hidrográfica do São Francisco, com maior concentração no Alto (56%) e Médio São Francisco (24%). Nas demais regiões, observa-se percentual de população da ordem de 10% no Sub-Médio e no Baixo São Francisco.



Figura 1. Subdivisão da bacia do Rio São Francisco.

Fonte: (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2004, PBHSF - 2004-2013).

Os dados referentes à população urbana e rural, e taxa de urbanização dessas sub-bacias estão apresentados na tabela abaixo:

Tabela 1. População por regiões da bacia do rio São Francisco.

Regiões	População (hab)			Urbanização (%)
	Urbana	Rural	Total	
<i>Alto</i>	6.461.510	269.230	6.730.740	96
<i>Médio</i>	2.814.511	2.302.782	5.117.293	55
<i>Sub-médio</i>	1.375.230	1.080.538	2.455.768	56
<i>Baixo</i>	901.713	938.518	1.840.231	49
Total	11.552.964	4.591.068	16.144.032	77

Fonte: Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (2004-2013) (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2004).

Um panorama da bacia hidrográfica do rio São Francisco pode ser observado a partir de três indicadores socioeconômicos: 1. a mortalidade infantil na região apresenta variações entre 25,66‰ (MG) e 64,38‰ (AL), em sua maior parte, com valores superiores a média nacional, que é de 33,55‰; 2. o PIB contempla variações entre R\$ 2.275,00 (AL) até R\$ 5.239,00 (MG), enquanto a média nacional é de R\$ 5.740,00 e 3. o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) - que combina aspectos de renda, saúde e educação - varia entre 0,823 no Alto São Francisco, onde está localizada a região metropolitana de Belo Horizonte, a 0,538 nas demais sub-bacias (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2004).

A bacia possui seis reservatórios para fins de produção de energia, cujas características e balanço geral da operação no mês podem ser observados na figura abaixo:

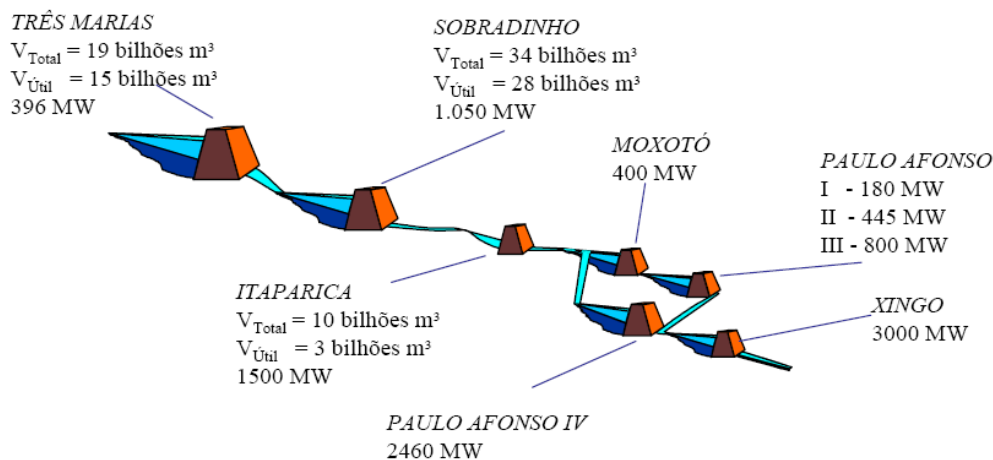


Figura 2. Principais reservatórios da bacia

Fonte: ANA, 2006.

Os reservatórios são sistemas aquáticos modificados, extremamente complexos e dinâmicos, que apresentam as funções principais de manutenção da vazão dos cursos de água e atendimento às variações da demanda dos usuários (PRADO, 2002 *apud* Vilas Boas, 2006). São construídos pelo barramento artificial de um vale natural ou pela formação artificial de lagos, não associados a uma bacia de drenagem natural e com vazões defluentes sujeitas a controle (CRUZ e FABRIZY, 1995 *apud* Vilas Boas, 2006). Essas obras hidráulicas tornam o potencial hidroelétrico dos rios aproveitável, viabilizam seu uso como vias navegáveis interiores e possibilitam a utilização mais racional da água com a regularização de vazões, assegurando deste modo, o uso da água de forma contínua para fins de abastecimento humano, industrial e para irrigação (LINK e ROSA, 2000 *apud* Vilas Boas, 2006).

O presente estudo está focalizado no lago de Xingó, reservatório resultante da instalação da Usina Hidrelétrica de Xingó no rio São Francisco, inaugurada em 1994, situada no Baixo São Francisco. O lago tem 65 km de extensão, 60 km² de área inundada, volume máximo de 3800 hm³ e seu entorno é formado pelos municípios de Delmiro Gouveia/AL (46.599⁵ habitantes), Olho D'água do Casado/AL (8.139), Piranhas/AL (23.910), Paulo Afonso/BA (101.952) e Canindé do São Francisco/SE (21.806) (MORENO e FERREIRA, 2002).

De acordo com a pesquisa do IBGE (2005) Perfil dos Municípios Brasileiros – Meio Ambiente 2002, três desses municípios, Canindé de São Francisco/SE, Paulo Afonso/BA e Olho d'Água do Casado/AL, eram responsáveis por problemas de poluição da água e, ainda, nos dois últimos houve despejo de esgoto doméstico nesse recurso. No entanto, em todas as cidades do entorno do lago, como ações de gestão dos recursos hídricos, houve implantação e/ou ampliação da rede de tratamento de esgoto sanitário. Ainda de acordo com a pesquisa, no critério outras ações de caráter ambiental, nenhuma delas têm implementado impedimento de obtenção de incentivos fiscais a atividades poluidoras mas, em Paulo Afonso/BA e em Canindé de São Francisco/SE, existiam programas de educação ambiental e, nesse último município e em Piranhas/AL e Olho d'Água do Casado/AL, haviam incentivos ao turismo ecológico.

Nos municípios que margeiam o lago de Xingó, citados acima, as principais culturas agrícolas são feijão e milho, destacando-se ainda o cultivo da banana em Paulo Afonso/BA (IBGE, 2007). Quanto a estrutura empresarial (IBGE, 2006), em Canindé de São Francisco/SE, onde está instalada a Usina Hidrelétrica de Xingó, da CHESF, a administração pública concentra

⁵ Fonte: IBGE, Contagem da População 2007.

a maioria do pessoal ocupado, enquanto nos demais municípios que circundam o reservatório de Xingó a maior parte do pessoal ocupado está no Comércio. Apesar dessa concentração de pessoas no comércio, em Delmiro Gouveia/AL e em Paulo Afonso/BA, que abriga o Complexo Hidrelétrico de Paulo Afonso, respectivamente, a indústria de transformação e a eletricidade apresentam o maior valor agregado dos salários.

A seguir, na Tabela 2, são apresentados indicadores socioeconômicos dos municípios que ficam às margens do reservatório de Xingó. Nota-se que em Olho D'Água/AL do Casado e em Piranhas/AL a maior parte do PIB é composta pelo setor de serviços, enquanto nos demais municípios é a indústria que tem a maior participação no PIB. Observa-se que o PIB per capita é bastante elevado em Delmiro Gouveia/AL, Paulo Afonso/BA e em Canindé de São Francisco/SE, por outro lado a incidência de pobreza, nesses municípios é alta, variando de 42,01% a 64,04%. O Índice de Desenvolvimento Humano⁶ (IDH) na região que circunda o lago varia de 0,542 a 0,719, tendo um dos menores índices (0,58) o município de Canindé de São Francisco/SE, que por outro lado possui o maior PIB per capita entre os municípios destacados.

Tabela 2. Indicadores socioeconômicos dos municípios às margens do lago de Xingó.

Município	PIB (mil reais)	Participação Agropecuária no PIB (%)	Participação Indústria no PIB (%)	Participação Serviços no PIB (%)	PIB per capita	Incidência Pobreza (%)	IDH
Delmiro Gouveia/AL	682.336	0,65	83,79	15,56	15.399	61,71	0,645
Olho D'Água do Casado/AL	18.426	17,56	7,04	75,40	2.445	56,93	0,542
Piranhas/AL	49.632	10,34	9,32	80,34	2.059	44,38	0,607
Paulo Afonso/BA	1.544.607	0,49	76,98	22,53	14.884	42,01	0,719
Canindé de São Francisco/SE	1.037.226	1,31	91,28	7,41	46.313	64,04	0,58
MÉDIA	666.445	6,07	53,68	40,25	16.220	53,81	0,62

Fonte: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>> e Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil, PNUD, <www.pnud.org.br>.

Esses municípios recebem *royalties*, uma compensação financeira pela área inundada para a construção do reservatório de Xingó, que são pagos pela CHESF, explicando assim o elevado PIB apresentado na Tabela 2. Os *royalties* são pagos proporcionalmente à área inundada, conforme apresentado a seguir:

⁶ Índice criado por Mahbub ul Haq com a colaboração do economista indiano Amartya Sen com o objetivo de oferecer um contraponto a outro indicador muito utilizado, o PIB per capita, que considera apenas a dimensão econômica do desenvolvimento. Além de computar o PIB per capita, depois de corrigi-lo pelo poder de compra da moeda de cada país, o IDH também leva em conta dois outros componentes, a longevidade e a educação. Essas três dimensões têm a mesma importância no índice, que varia de zero a um <www.pnud.org.br/idh/>.

Tabela 3. Percentual de área inundada pelo reservatório de Xingó.

Município	Área (%)
Delmiro Gouveia/AL	25,66
Olho D'Água do Casado/AL	13,19
Piranhas/AL	11,10
Paulo Afonso/BA	10,82
Canindé de São Francisco/SE	39,22

Fonte: ANEEL, Resolução nº 87, de 22/03/2001.

Esses municípios fazem diversos usos do reservatório de Xingó, como para a geração de energia elétrica, a irrigação, a aquicultura, a recreação e o lazer, destacando-se no último uso os passeios de catamarã, que saem do município de Canindé de São Francisco/SE, levando os visitantes oriundos de diversas regiões do país para apreciarem os cânions, resultantes do singramento da força das águas com o solo rochoso da região, e para se refrescarem em uma estação de banho a 15 km do ponto de partida, denominada Paraíso do Talhado. O benefício direto desse uso pode ser quantificado economicamente através da renda produzida por essa atividade e será analisado ao longo deste trabalho levando em consideração possíveis restrições que visem proteger o meio-ambiente, uma vez que os passeios deixam carga orgânica no lago, afetando assim o seu ecossistema.

Em artigo sobre a contribuição socioeconômica do setor privado na atividade turística em Canindé de São Francisco (SE), município de onde partem os passeios de catamarã estudados na presente dissertação, Oliveira e Teixeira (2005) verificaram que a cidade possuía na época da pesquisa onze estabelecimentos turísticos particulares, distribuídos nos segmentos de alimentação, hospedagem, agência de turismo, transporte náutico e comercialização de artesanatos. Segundo as autoras, essas empresas geram 103 empregos diretos e formais e a média salarial encontra-se na faixa de 1 a 1,47 salário mínimo. Concluíram que a atividade turística ainda não contribui de forma proporcionalmente significativa na geração de empregos no município, pois os empregos formais gerados pelas empresas turísticas locais representam 1,6% do total da PEA (população Economicamente Ativa) do município, mas, de acordo com a pesquisa, o fato de serem formais (com carteira assinada) já faz muita diferença.

A ANA (2005) destaca a Região Hidrográfica do São Francisco no segmento do turismo e lazer, apontando que são incipientes as atividades turísticas nesta região, apesar das possibilidades oferecidas por seus vários reservatórios. Segundo a agência (ANA, 2005), o setor

carece de definição política e estratégia de uso racional dos lagos dos reservatórios como possibilidade de ofertar lazer à sociedade.

3. PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA

3.1 *TURISMO E LAZER EM LAGOS E RESERVATÓRIOS INTERIORES*

Recentemente Souza e Silveira Neto (2008) dimensionaram a atividade turística na região Nordeste a partir de informações sobre ocupações e renda do trabalho e forneceram evidências sobre a contribuição das atividades do turismo para os níveis e evolução da desigualdade regional. As estimativas do artigo mostram, a partir dos microdados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) do período entre 2002 e 2006, que as atividades do turismo no Nordeste representavam em 2006 cerca de 6,4% do total da renda do trabalho e 5,8% do total das ocupações geradas na economia da região, estando o primeiro percentual acima e o segundo abaixo daqueles verificados para o país como um todo. A partir de uma decomposição do Índice de Gini para desigualdade regional da renda do trabalho per capita, os autores mostram que a dinâmica da renda do trabalho das atividades econômicas do turismo contribuiu com cerca de 8% para a diminuição deste indicador entre 2002 e 2006.

Em um estudo sobre o turismo no município de Canindé de São Francisco, Oliveira e Teixeira (2005) verificaram que todos os gestores das empresas particulares pesquisadas afirmam que os turistas são seus maiores clientes e 38% das ações desenvolvidas concentram-se em realizar um bom atendimento e divulgação/publicidade. De acordo com a pesquisa: apenas a empresa de médio porte do município afirma participar de workshops, feiras, eventos e realizar visitas às agências e operadoras em todo o território nacional; as empresas turísticas do município de Canindé, geram 103 empregos diretos e formais; o valor monetário pago aos 67 empregados no segmento Hospedagem corresponde a R\$ 23.640,00 e a média da faixa salarial é de 1,47 salário mínimo; já o segmento Alimentação emprega 14 pessoas, paga o montante de R\$ 3.840,00 e a média da faixa salarial corresponde a 1,14 salário mínimo; o segmento Agência de Turismo paga aos 20 colaboradores, R\$ 6.984,00 e a média da faixa salarial corresponde a 1,46 salário mínimo; o segmento de artesanato é o que menos contribui na geração de salários e empregos formais, tendo em vista que emprega apenas duas pessoas e paga o equivalente a um salário mínimo, que perfaz o total de R\$ 480,00. Sendo assim, segundo os autores, o valor monetário total pago pelas empresas particulares pesquisadas em Canindé corresponde a R\$ 34.944,00 e a média salarial para todas as empresas encontra-se na faixa de 1 a 1,47 salário mínimo.

Para o Brasil no ano de 2005, as Atividades Características do Turismo – ACT geraram um total de R\$ 131,755 milhões de valor adicionado (valor que a atividade agrega aos bens e serviços consumidos no seu processo produtivo. É a contribuição ao produto interno bruto pelas diversas atividades econômicas, obtida pela diferença entre o valor de produção e o consumo intermediário absorvido por essas atividades - *Sistema de Contas Nacionais*). Constituindo-se, predominantemente, como atividades prestadoras de serviços, sua participação no total do valor adicionado gerado pelo setor de serviços foi de 11,00%. Na comparação com a economia brasileira como um todo, o valor adicionado gerado pelas ACT representou 7,15% do total (IBGE, 2008).

O aumento espontâneo ou planejado de fluxos turísticos pode dinamizar as economias locais e regionais pelas demandas que os turistas trazem consigo (demandas por hospedagem e alimentação, entre outras), multiplicando infra-estruturas, gerando postos de trabalho, fazendo o dinheiro circular (Cruz, 2006).

Segundo Moraes, Arcanjo e Rocha (2006), as águas da bacia do São Francisco têm sido prioritariamente utilizadas para usos convencionais, tais como geração de energia elétrica e irrigação. Apesar das possibilidades oferecidas por seus vários reservatórios, são incipientes as atividades turísticas nesta região. E, de acordo com a ANA (2005), o turismo, pela natureza de suas atividades e pela dinâmica de crescimento nos últimos dez anos, é um dos segmentos da economia que pode atender de forma completa e de maneira rápida a vários desafios existentes, como por exemplo, gerar empregos e divisas proporcionando a inclusão social.

De grande, porém incipiente potencial, o turismo carece de definição de política e estratégia de uso racional dos lagos dos reservatórios como meio de ofertar lazer de baixo custo à sociedade. Desta forma, destaca-se “uso racional” e “baixo custo”, pois para que estes se concretizem é preciso levar em consideração as influências que lazer e recreação geram no recurso natural em questão, a água.

Conforme apresentado no Caderno de Recursos Hídricos da ANA (2005), os terminais hidroviários de turismo assim como as marinas de águas interiores podem abranger além das instalações na água e para apoio em terra, toda uma infra-estrutura envolvendo estabelecimentos como: hotéis, restaurantes, clubes, lojas, condomínios residenciais, equipamentos de lazer, instalações sócio-esportivas, parques e toda a interface das atividades náuticas de lazer e

recreação com a comunidade local. Estas organizações de recreação e lazer no entorno de reservatórios são responsáveis por inúmeras transformações nas margens, que se por um lado trazem determinados benefícios econômicos, por outro podem tornar mais intenso o comprometimento da qualidade da água do lago ou reservatório, tendo em vista que os poluentes podem ser levados à água pelo escoamento superficial das áreas das marinas, terminais ou das próprias embarcações, ou ainda por derramamentos e descargas de efluentes e resíduos gerados em terra ou a bordo.

De um modo geral, as abordagens de planejamento das atividades antrópicas e do uso dos recursos naturais, baseadas em modelos clássicos, têm falhado por dissociarem as questões sócio-econômicas dos aspectos ambientais inerentes. Falta, nesse caso, o conhecimento das dinâmicas ambiental e sócio-econômica e do conflito que porventura exista entre as metas de desenvolvimento socioeconômico e a capacidade de suporte dos ecossistemas (Pires e Santos, 1995). Uma das principais consequências ambientais das atividades antrópicas em e no entorno de reservatórios é a eutrofização, descrita em detalhes na próxima seção.

3.2 EUTROFIZAÇÃO⁷

A eutrofização é o crescimento excessivo das plantas aquáticas, tanto planctônicas⁸ quanto aderidas⁹, a níveis tais que sejam considerados como causadores de interferências com os usos desejáveis do corpo d'água (Thomann e Mueller, 1987 *apud* Von Sperling, 1996). Segundo Odum (2004), quando o homem faz aumentar a erosão do solo ou introduz quantidades de matéria orgânica (esgotos urbanos, esgotos industriais) em proporções não assimiláveis, a rápida acumulação desses materiais pode levar à destruição do sistema. A expressão *eutroficação cultural* (= enriquecimento cultural) tornou-se muito comum para traduzir a poluição orgânica resultante da atividade humana. O principal fator de estímulo a esse processo é um nível excessivo de nutrientes no corpo d'água, principalmente nitrogênio e fósforo.

O fósforo na água apresenta-se principalmente nas seguintes três formas: ortofosfatos; polifosfatos e fósforo orgânico. Desses, os ortofosfatos são diretamente disponíveis para o metabolismo biológico sem necessidade de conversões a formas mais simples. As principais

⁷ Esta seção está baseada no Capítulo 3 (p.151-166) do livro Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos, Von Sperling (1996).

⁸ Incluem o fitoplâncton microscópico, plantas flutuantes e certos tipos de plantas, como as algas cianofíceas, que podem flutuar na superfície e mover com a corrente superficial.

fontes de ortofosfatos na água são o solo, detergentes, fertilizantes, despejos industriais e esgotos domésticos.

O nível de eutrofização está usualmente associado ao uso e ocupação do solo predominante na bacia hidrográfica. A ocupação ocorre de diversas formas e apresenta impactos distintos sobre o corpo d'água, conforme segue:

a) Ocupação por matas e florestas

Um lago situado em uma bacia de drenagem ocupada por matas e florestas apresenta usualmente uma baixa produtividade, isto é, há pouca atividade biológica de produção (síntese) no mesmo. Mesmo nestas condições naturais e de ausência de interferência humana, o lago tende a reter sólidos que se sedimentam, constituindo uma camada de lodo no fundo. Com os fenômenos de decomposição do material sedimentado, há um certo aumento, ainda incipiente, do nível de nutrientes na massa líquida. Em decorrência, há uma progressiva elevação na população de plantas aquáticas na massa líquida e, em consequência, de outros organismos situados em níveis superiores na cadeia alimentar (cadeia trófica).

Na bacia hidrográfica, a maior parte dos nutrientes é retida dentro de um ciclo quase fechado. As plantas, ao morrerem e caírem no solo, sofrem decomposição, liberando nutrientes. Numa região de matas e florestas, a capacidade de infiltração da água de chuva no solo é elevada. Em consequência, os nutrientes lixiviam pelo solo, onde são absorvidos pelas raízes das plantas, voltando a fazer parte da sua composição, e fechando, desta forma, o ciclo. O aporte de nutrientes ao corpo d'água é reduzido.

Pode-se considerar que o corpo d'água apresente ainda um nível trófico bem incipiente.

b) Ocupação por agricultura

A retirada da vegetação natural da bacia para ocupação por agricultura representa, usualmente, uma etapa intermediária no processo de deterioração de um corpo d'água. Os vegetais plantados na bacia são retirados para consumo humano, muito possivelmente fora da própria bacia hidrográfica. Com isto, há uma retirada, não compensada naturalmente, de nutrientes, causando uma quebra no ciclo interno dos mesmos. Para compensar esta retirada, e para tornar a agricultura mais intensiva, são adicionados artificialmente, fertilizantes, isto é, produtos com elevados teores dos nutrientes nitrogênio e fósforo. Os agricultores, visando

⁹ incluem as plantas aquáticas enraizadas de diversos tamanhos e as plantas microscópicas aderidas.

garantir uma produção elevada, adicionam quantidades elevadas de nitrogênio e fósforo, freqüentemente superiores à própria capacidade de assimilação dos vegetais.

A substituição das matas por vegetais agricultáveis pode causar também uma redução da capacidade de infiltração no solo. Assim, os nutrientes, já adicionados em excesso, tendem a escoar superficialmente pelo terreno, até atingir, eventualmente, o lago ou represa.

O aumento do teor de nutrientes no corpo d'água causa um certo aumento do número de algas e, em consequência, dos outros organismos, situados em degraus superiores da cadeia alimentar, culminando com os peixes. Esta elevação relativa da produtividade do corpo d'água pode ser até bem-vinda, dependendo dos usos previstos para o mesmo. O balanço entre os aspectos positivos e negativos dependerá, em grande parte, da capacidade de assimilação de nutrientes do corpo d'água.

c) Ocupação urbana

Caso se substitua a área agricultável da bacia hidrográfica por ocupação urbana, uma série de consequências irá ocorrer, desta vez em taxa bem mais rápida.

- Assoreamento. A implantação de loteamentos implica em movimentos de terra para as construções. A urbanização reduz também a capacidade de infiltração das águas no terreno. As partículas de solo tendem, em consequência, a seguir pelos fundos de vale, até atingir o lago ou represa. Aí, tendem a sedimentar, devido às baixíssimas velocidades de escoamento horizontal. A sedimentação das partículas de solo causa o assoreamento, reduzindo o volume útil do corpo d'água, e servindo de meio suporte para o crescimento de vegetais fixos de maiores dimensões (macrófitas) próximos às margens. Estes vegetais causam uma evidente deterioração no aspecto visual do corpo d'água.
- Drenagem pluvial urbana. A drenagem urbana transporta uma carga muito maior de nutrientes que os demais tipos de ocupação da bacia. Este aporte de nutrientes contribui para uma elevação no teor de algas na represa.
- Esgotos. O maior fator de deterioração está, no entanto, associado aos esgotos oriundos das atividades urbanas. Os esgotos contêm nitrogênio e fósforo, presentes também em resíduos dos passeios de catamarã no lago de Xingó, como nas fezes e urina, nos restos de alimentos, nos detergentes e outros subprodutos das atividades humanas. A contribuição de nitrogênio e fósforo através dos esgotos é bem superior à contribuição originada pela drenagem urbana.

Há, portanto, uma grande elevação do aporte de nitrogênio e fósforo ao lago ou represa, trazendo, em decorrência, uma elevação nas populações de algas e outras plantas. Dependendo da capacidade de assimilação do corpo d'água, a população de algas poderá atingir valores bastante elevados, trazendo uma série de problemas, como detalhado mais adiante. Em um período de elevada insolação (energia luminosa para a fotossíntese), as algas poderão atingir superpopulações, constituindo uma camada superficial, similar a um caldo verde. Esta camada superficial impede a penetração da energia luminosa nas camadas inferiores do corpo d'água, causando a morte das algas situadas nestas regiões. A morte destas algas traz, em si, uma série de outros problemas. Estes eventos de superpopulação de algas são denominados floração das águas.

Diante do exposto acima e relacionando-o com características da atividade recreacional estudada (passeios de catamarã e banhos no lago de Xingó) infere-se que o esgoto doméstico, resultante da ocupação urbana, é o mais diretamente relacionado à referida atividade.

Os principais efeitos indesejáveis da eutrofização (Arceivala, 1981; Thomann e Mueller, 1987; Von Sperling, 1994 *apud* Von Sperling 1996) relacionados à diminuição do uso da água para recreação, balneabilidade e redução na atração turística são:

- freqüentes florações das águas;
- crescimento excessivo da vegetação;
- distúrbios com mosquitos e insetos;
- eventuais maus odores;
- eventuais mortandades de peixes.

De acordo com Odum (2004), lagos eutróficos (ricos em alimento) são menos fundos e têm uma maior produtividade primária (velocidade a que a energia da radiação é armazenada pela atividade fotossintética ou quimiossintética de organismos produtores – principalmente plantas verdes – na forma de substâncias orgânicas susceptíveis de utilização como matéria alimentar). Nesses lagos a vegetação litoral é mais abundante, as populações de plâncton mais densas, e as florações planctônicas são características. Devido ao alto teor de matéria orgânica, a estagnação do lago em tempo quente e seco pode ser suficiente para eliminar os peixes de água fria.

A eutrofização também possui efeitos indesejáveis relacionados aos outros usos, uma vez que a água fica imprópria para o abastecimento humano, em razão da presença de secreções tóxicas de certas algas, podendo causar efeitos crônicos e agudos na saúde humana, como em Caruaru/PE em fevereiro de 1996, quando 86% dos pacientes de hemodiálise tiveram crise de

hepatite aguda e 50 pacientes faleceram. Além disso, eleva substancialmente os custos de tratamento da água. O aumento na quantidade de ferro na forma solúvel, resultante do processo eutrófico, pode enferrujar as turbinas, prejudicando a geração de energia elétrica. O aumento na mortandade de peixes e modificações na qualidade e quantidade de peixes de valor comercial afetaria a pesca e a criação de peixes em tanques-rede seriam graves conseqüências da eutrofização para a população da região.

Sendo assim, a preocupação com a qualidade da água do lago de Xingó é relevante para os seus múltiplos usos, inclusive para o desenvolvimento do turismo.

3.3 ASPECTOS ECONÔMICOS DA ÁGUA

A água, devido à sua natureza física, e por outras razões, é o que os economistas chamam de um recurso de “alto custo de exclusão” (Schmid, 1989 *apud* Young, 1996), implicando que direitos de propriedade exclusiva, que são a base de um mercado ou economia de troca, são relativamente difíceis e caros de estabelecer e fazer valer. Então, freqüentemente, direitos de propriedades da água são incompletos, ou mais provavelmente, ausentes (Young, 1996).

Conforme Ramos (1996, p. 49 e 50), “a caracterização da qualidade do meio ambiente (mais especificamente a qualidade da água) como um bem público e como uma externalidade esclarece o porquê da não existência de mercado para este tipo de bem. É justamente esta caracterização que permite vislumbrar que tipos de instrumentos podem ser adotados para corrigir as falhas de mercado associadas.” Segundo o autor, os instrumentos de política ambiental que deverão ser adotados como medidas corretivas são diversos, vão desde o popular *command-and-control* até a persuasão moral, passando pela criação de mercados artificiais de certificados de emissão negociáveis. O autor diz ainda que cada instrumento apresenta suas vantagens e desvantagens, sendo que a definição do “melhor” vai depender do contexto em que é utilizado e deverá ser adotado gradualmente “para que os agentes disponham de um período de tempo suficiente para se ajustar sem choques ao novo ambiente”.

A *Capacity Building for Integrated Water Resources Management* - CAP-NET (2008) desenvolveu um manual intitulado *Economics in Sustainable Water Management*, que no capítulo 3 identifica os benefícios da água como um bem público, por apresentarem graus de não rivalidade (seu consumo por um indivíduo não reduz o potencial consumo por outros) e não-exclusão (é difícil ou muito alto o custo para excluir potenciais consumidores destes benefícios),

além de apresentar conceitos e instrumentos econômicos que devem ser utilizados na Gestão Integrada dos Recursos Hídricos. Na figura abaixo, presente no referido manual, são identificados os benefícios da água em um quadrante rivalidade-exclusão, onde se pode identificar aspectos de bens públicos desses benefícios.

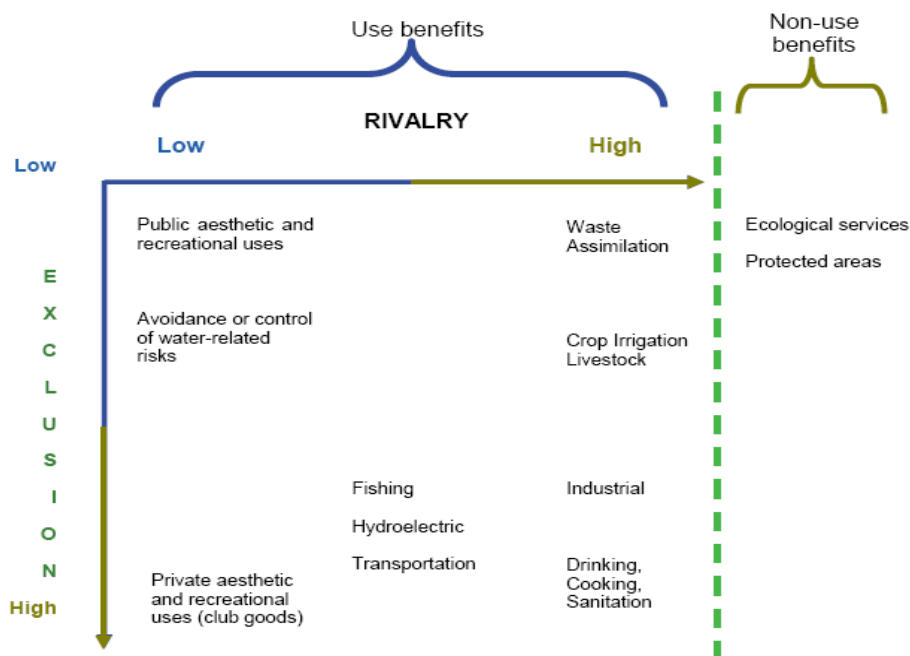


Figura 3. Localizando benefícios da água em um quadrante rivalidade-exclusão.

Fonte: *Economics in Sustainable Water Management*, CAP-NET (2008).

Young (1996) diz que “cada vez mais um importante tipo de benefício econômico da água é o seu valor para recreação. A população dos países desenvolvidos com mais frequência escolhem corpos d’água para atividades recreacionais. Em nações em desenvolvimento, conforme renda e tempo para lazer cresce, atividades de recreação que têm a água como base também cresce significativamente para seus próprios cidadãos, além de fornecer uma base para atração do comércio turístico. A qualidade da água é um importante componente em casos associados com recreação ou aproveitamento estético da água, então medir os benefícios do aumento da qualidade da água é um problema importante. Valores recreacionais e estéticos tendem a se aproximar do final do espectro bem privado-bem público. Aproveitar uma atração como um corpo d’água não necessariamente nega similar aproveitamento por outros. No entanto, o congestionamento em locais especiais, como uma cachoeira, pode adversamente afetar o aproveitamento total do recurso”.

3.4 A GESTÃO INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS (GIRH)

De acordo com o manual da CAP-NET (2008), a utilização de instrumentos econômicos e financeiros é cada vez mais importante para a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos (GIRH) porque: enquanto a água está se tornando escassa, o seu valor econômico está aumentando e a utilização dos instrumentos econômicos para dividir seu uso ou consumo por setores ou grupos concorrentes se torna mais importante para a sociedade; instrumentos econômicos e financeiros podem ser usados para alcançar objetivos da GIRH e de diferentes formas, é importante considerar que *trade-offs* estão envolvidos em termos de eficiência, equidade e sustentabilidade e; instrumentos econômicos adequados tendem a enviar sinais aos produtores e consumidores sobre a crescente escassez de água.

A GIRH pode ser definida como um processo sistemático para o desenvolvimento sustentável, alocação e monitoramento do uso dos recursos hídricos no contexto de objetivos social, econômico e ambiental (CAP-NET, 2006). A base da GIRH é que há uma variedade de usos dos recursos hídricos que são interdependentes. A incapacidade de reconhecer essa interdependência associada a falta de regulamentação dos usos pode levar a consequências negativas do desperdício da água e no longo prazo à insustentabilidade dos recursos hídricos.

Na Conferência Internacional sobre Água e Ambiente (Dublin, Irlanda, 1992), quatro princípios fundamentais da água foram definidos e se tornaram a pedra angular da subsequente reforma do setor hídrico. Tais princípios são:

1. Água é um recurso finito e vulnerável, essencial para a manutenção da vida, do desenvolvimento e do meio-ambiente;
2. O desenvolvimento da gestão da água deve ser baseado em uma abordagem de participação, envolvendo usuários, planejadores e políticos de todos os níveis;
3. A mulher desenvolve uma participação central na provisão, administração e preservação da água;
4. A água tem um valor econômico em todos os seus usos concorrentes e deve ser reconhecida como um bem econômico assim como um bem social.

Com a perspectiva da GIRH, os objetivos da gestão da água são maximizar o bem estar econômico e social de uma forma equitativa, sem danos à sustentabilidade ambiental.

Segundo o manual da CAP-NET (2008), instrumentos econômicos podem ser usados para promover um elevado nível de eficiência na alocação da água entre os múltiplos usuários e

setores. Preços são frequentemente usados como um mecanismo para conseguir eficiência na alocação da água e para evitar desperdício. Se a provisão da água tem um preço abaixo do seu custo econômico, não há incentivo para sua conservação. Como um resultado do sub-preço, a água não é usada eficientemente dentro e entre os vários setores.

A modelagem econômico-hidrológica integrada é uma experiência de GIRH e, segundo Cai *et al.* (2000) tem como principal vantagem a habilidade de refletir as inter-relações entre os componentes hidrológicos, agronômicos e econômicos e para explorar as conseqüências econômicas e ambientais de várias escolhas políticas. Todos os componentes do modelo são incorporados em um único modelo consistente, que é resolvido na sua totalidade por uma simples, mas eficaz abordagem de decomposição.

Modelos Econômico-Hidrológicos Integrados (Moraes, 2003 e Cai *et al.*, 2000) maximizam o benefício social da água de uma bacia hidrográfica, respeitando os limites de disponibilidade hídrica e qualidade dos corpos d'água. O benefício social é a agregação das funções benefício de todos os usuários em uma única função que ao ser maximizada, sujeita a várias restrições, determinará uma alocação ótima de água entre os usos, contribuindo dessa forma para o melhor planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos desta região e possibilitando seu desenvolvimento sustentável.

Rosegrant *et al.* (2000) em seu artigo apresenta um modelo econômico-hidrológico integrado responsável pela interação entre alocação de água, escolha de insumo do agricultor, produtividade da agricultura, demanda não-agricultura por água e degradação do recurso visando estimar os ganhos sociais e econômicos a partir da melhoria na alocação e uso eficiente da água. O modelo foi aplicado na bacia do rio Maipo no Chile. Os benefícios econômicos do uso da água foram avaliados para diferentes instrumentos de gestão de demanda, incluindo mercados de negociação de direitos da água, baseado em produção e funções benefício referentes a água para os setores agrícola e industrial urbano.

Moraes *et al.* (2006) apresentaram a aplicação de um modelo econômico-hidrológico integrado para gestão de recursos hídricos na bacia do rio Pirapama, em Pernambuco. Modelo este que 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. A alocação ótima é 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.

A necessidade de mensurar os benefícios econômicos dos usos do lago de Xingó e associá-los aos impactos de carga orgânica resultantes se deve a preocupação com a manutenção da qualidade da água, de forma a prolongar esses benefícios. Para isto, na presente dissertação é estimada a função benefício líquido do uso para recreação/lazer/turismo do referido lago. Essa função poderá ser aplicada diretamente para calcular reduções de benefícios desse uso ou os custos sociais diante de limitações impostas pelo governo, por exemplo, para manutenção da qualidade da água, resultantes de uma possível política ambiental. Ainda, poderá ser utilizada como parte de um modelo econômico-hidrológico integrado, que ao invés de alocar água, como nos modelos acima citados, alocaria cargas de fósforo entre os usos, de forma a maximizar o benefício de todos os usuários, representativo do benefício social.

Diante do exposto neste capítulo, o problema proposto acima se mostra importante devido à necessidade das seguintes considerações: a existência de múltiplos usos do lago de Xingó e, em especial, o desenvolvimento do seu uso turístico, traz benefícios econômicos para a região, mas também pode comprometer a qualidade da água; o conseqüente processo de eutrofização, que pode ser desencadeado pelo uso descontrolado do reservatório, resultante da externalidade negativa de diversos usos, dentre eles a carga de fósforo aportada pelos passeios de catamarã e pela estação de banho na área denominada Paraíso do Talhado, que pode prejudicar todos os usuários; os aspectos de bem público da água, o que dificulta o controle tanto quantitativo quanto qualitativo do seu uso; e a Gestão Integrada de Recursos Hídricos como forma de buscar um melhor uso desses recursos levando em conta os aspectos econômicos e ambientais associados.

Tal resultado pode subsidiar decisões e políticas públicas que realmente implementem uma GIRH.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 VALORAÇÃO ECONÔMICA DO MEIO AMBIENTE E MÉTODO DO CUSTO DE OPORTUNIDADE¹⁰

O valor econômico ou o custo de oportunidade dos recursos ambientais normalmente não é observado no mercado por intermédio do sistema de preços, mas, no entanto, como os demais bens e serviços presentes no mercado, seu valor econômico deriva de seus atributos, com a peculiaridade de que estes atributos podem ou não estar associados a um uso.

Assim, o valor econômico dos recursos ambientais (VERA) pode ser desagregado em valor de uso (VU) e valor de não-uso (VNU), este último também aparece na literatura como valor de existência (VE).

Valores de uso, por sua vez, podem ser decompostos em:

Valor de uso direto (VUD) – valor que os indivíduos atribuem a um recurso ambiental pelo fato de que dele se utilizam diretamente, por exemplo, na forma de extração, de visitação, ou outra atividade de produção ou consumo direto;

Valor de uso indireto (VUI) – valor que os indivíduos atribuem a um recurso ambiental quando o benefício do seu uso deriva de funções ecossistêmicas, como, por exemplo, a contenção de erosão e reprodução de espécies marinhas pela conservação de florestas de mangue;

Valor de opção (VO) – valor que o indivíduo atribui em preservar recursos que podem estar ameaçados, para usos direto e indireto no futuro próximo.

Já o valor de não-uso (VNU) ou valor de existência (VE) é o valor que está dissociado do uso (embora represente consumo ambiental) e deriva de uma posição moral, cultural, ética ou altruística em relação aos direitos de existência de outras espécies que não a humana ou de outras riquezas naturais, mesmo que estas não representem uso atual ou futuro para ninguém.

Esses valores podem ser estimados pelos métodos de valoração econômica do meio ambiente, que são capazes de captar as distintas parcelas de valor econômico do recurso ambiental citadas acima. Todavia, cada método apresentará limitações nesta cobertura de valores.

Os métodos de valoração são assim classificados: métodos da função de produção e métodos da função de demanda.

¹⁰ Esta seção está baseada no Capítulo *Valoração Ambiental* (p. 11-22) do livro *Economia Ambiental*, MOTTA, R. S. da (2006).

Métodos da função de produção – métodos da produtividade marginal e de mercados de bens substitutos (reposição, gastos defensivos ou custos evitados, custos de controle e custo de oportunidade).

Permitem observar o valor do recurso ambiental em razão de sua contribuição como insumo ou fator de produção de um produto qualquer, ou seja, permite o cálculo do valor de sua contribuição em determinada atividade econômica. Se o recurso ambiental é um insumo ou um substituto de um bem ou serviço privado, estes métodos utilizam-se de preços de mercado deste bem ou serviço privado para estimar o valor econômico do recurso ambiental. Assim, os benefícios ou custos ambientais das variações de disponibilidade destes recursos ambientais para a sociedade podem ser estimados.

Com base nos preços destes recursos privados, geralmente admitindo que não se alteram diante destas variações, estimam-se indiretamente os valores econômicos (preços-sombra) dos recursos ambientais cuja variação de disponibilidade está sendo analisada. O benefício (ou custo) da variação da disponibilidade do recurso ambiental é dado pelo produto da quantidade variada do recurso vezes o seu valor econômico estimado.

Métodos da função de demanda – métodos de mercado de bens complementares (preços hedônicos e do custo de viagem) e método da valoração de contingente.

Estes métodos assumem que a variação da disponibilidade do recurso ambiental altera a disposição a pagar ou aceitar dos agentes econômicos em relação àquele recurso ou seu bem privado complementar. Assim, estes métodos estimam diretamente os valores econômicos (preços-sombra) com base em funções de demanda para estes recursos derivadas de mercados de bens ou serviços privados complementares ao recurso ambiental ou mercados hipotéticos construídos especificamente para o recurso ambiental em análise.

Utilizando-se de funções de demanda, estes métodos permitem captar as medidas de disposição a pagar (ou aceitar) dos indivíduos relativas às variações de disponibilidade do recurso ambiental. Com base nestas medidas, estimam-se as variações do nível de bem-estar pelo excesso de satisfação que o consumidor obtém quando paga um preço (ou nada paga) pelo recurso abaixo do que estaria disposto a pagar. Estas variações são chamadas de variações do excedente do consumidor em face das variações de disponibilidade do recurso ambiental. O excedente do consumidor é, então, medido pela área abaixo da curva de demanda e acima da linha de preço. Assim, o benefício (ou custo) da variação de disponibilidade do recurso ambiental será dado pela

variação do excedente do consumidor, medida pela função de demanda estimada para este recurso.

Na presente pesquisa é proposta uma metodologia usando programação matemática que permite calcular o custo de oportunidade da qualidade da água para o empresário beneficiado pelo uso do lago de Xingó para o turismo, pois embora desejável do ponto de vista ambiental, a preservação gera um custo social e econômico. Como afirmam Maia *et al.* (2004), toda conservação traz consigo um custo de oportunidade das atividades econômicas que poderiam estar sendo desenvolvidas na área de proteção, portanto, as perdas econômicas da população em virtude das restrições de uso dos recursos ambientais.

Segundo Motta (1997), o custo de oportunidade mensura as perdas de renda nas restrições da produção e consumo de bens e serviços privados devido às ações para conservar ou preservar os recursos ambientais. Este método simplesmente indica o custo econômico de oportunidade para manter o fluxo do recurso ambiental, isto é, a renda sacrificada pelos usuários para manter o recurso ambiental no seu nível atual. Por conseguinte, este custo é amplamente utilizado para estimar a renda sacrificada em termos de atividades econômicas restringidas pelas atividades de proteção ambiental. Motta (1997) ainda destaca que o custo de oportunidade não valora diretamente o recurso ambiental, mas, sim, o custo de mantê-lo.

No caso do lago de Xingó com exploração turística (recreacional), como será proposto no modelo apresentado no Capítulo 5, o custo de oportunidade de sua preservação, ou seja, o custo da qualidade da água, será obtido através da perda dos benefícios (lucros) máximos (simula-se o comportamento racional do empresário maximizando seus lucros) que o empresário responsável pelos passeios de catamarã terá devido à restrição de poluição imposta.

4.2 A PESQUISA OPERACIONAL¹¹ E A PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

Os métodos de busca do ótimo são conhecidos como *Técnicas de Programação Matemática* e são geralmente estudadas, apesar de serem usadas em vários ramos da Matemática Aplicada e da Estatística, como parte da *Pesquisa Operacional*.

A *Pesquisa Operacional*, termo que poderia facilmente ser substituído por *Análise de Decisão*, já que a ênfase na tomada de decisões é central a todas as aplicações de Pesquisa Operacional, doravante PO, pode ser definido como uma abordagem científica na resolução de problemas da administração executiva. A PO está interessada na aplicação de métodos e técnicas científicas, nos problemas de tomadas de decisão, através do estabelecimento da solução ótima. Assim, ao invés de se contentar em meramente melhorar o “status quo”, o objetivo é identificar dentro do possível o melhor curso de ação. Essa busca pela otimalidade é um tema muito importante em PO.

A partir desta idéia abrangente sobre PO é fácil concordar com a assertiva de que as técnicas quantitativas ou os métodos matemáticos de PO – dentre eles temos as chamadas *Técnicas de Programação Matemática* – representam uma parte significativa do estudo da PO. Na realidade, os métodos matemáticos de PO compreendem a principal parte do que se sabe hoje sobre PO, apesar de isto não implicar que a análise matemática represente o esforço total requerido em PO.

O diagrama da Figura 4 apresenta a relação dos métodos matemáticos de PO agrupados em áreas a seguir definidas.

As *Técnicas de Programação Matemática* são úteis para encontrar o máximo e/ou o mínimo de funções de várias variáveis em geral sob um conjunto pré-estabelecido de restrições.

As *Técnicas de Processos Estocásticos* podem ser usadas para analisar problemas que são descritos por um conjunto de variáveis aleatórias, tendo distribuições de probabilidade conhecidas.

Os *Métodos Estatísticos* habilitam-nos a analisar os dados experimentais e construir modelos empíricos para obter a representação mais acurada da situação física.

¹¹ As informações sobre Pesquisa Operacional apresentadas no início desta seção, até o final desta página, foram retiradas da apostila da profa. Márcia Guedes Alcoforado, UFPE.

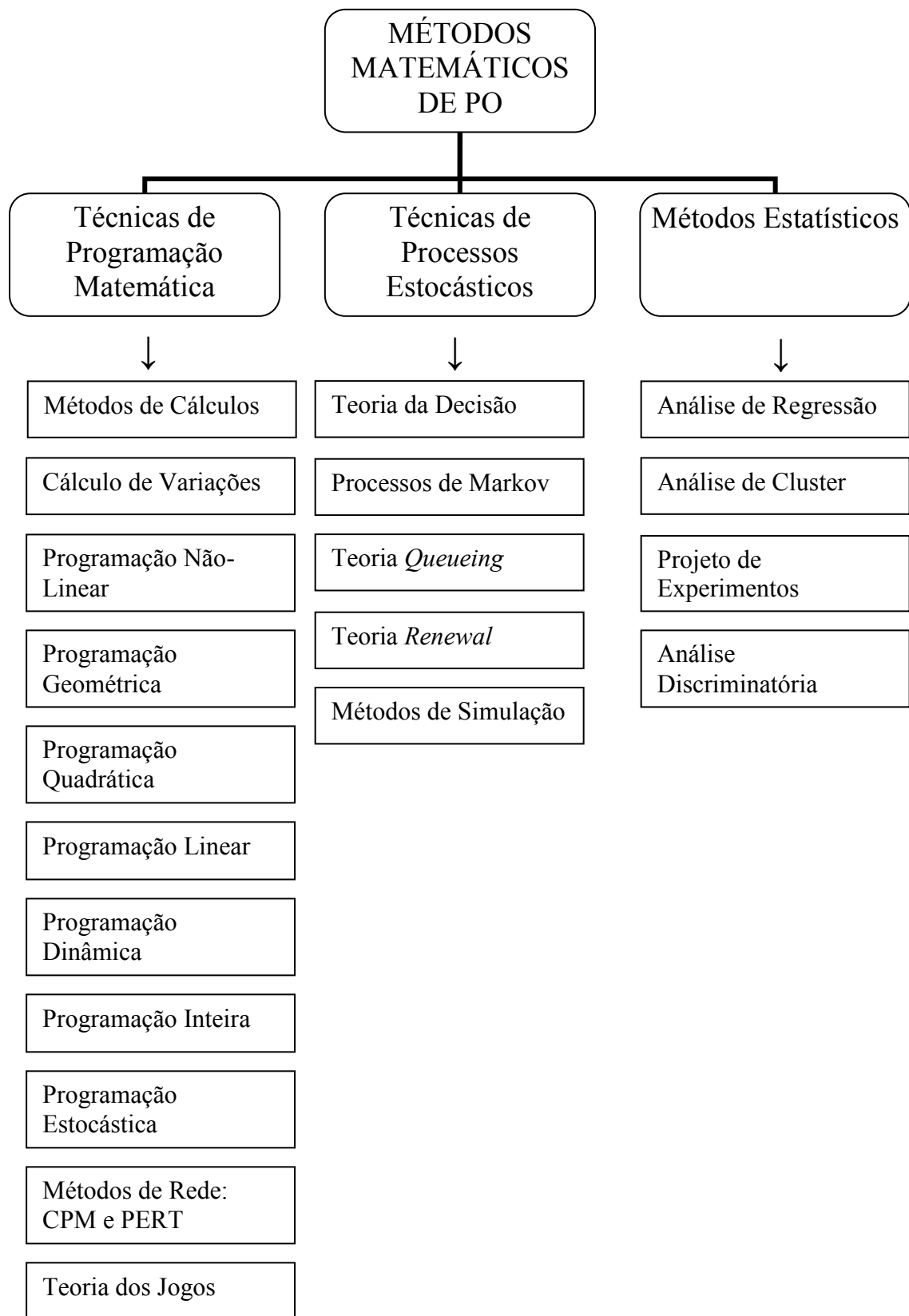


Figura 4. Relação dos Métodos Matemáticos de PO.
Fonte: RAO (1979).

Para o desenvolvimento deste estudo foi utilizada a Pesquisa Operacional, uma ciência (em virtude das técnicas matemáticas que incorpora) que objetiva fornecer ferramentas quantitativas ao processo de tomada de decisões. A PO tomou grande impulso durante a Segunda Guerra Mundial, quando um grupo de cientistas foi convocado na Inglaterra para estudar problemas de estratégia e de tática associados com a defesa do país. O objetivo era decidir sobre a utilização mais eficaz de recursos militares limitados (Lisboa, 2002).

Segundo o Lisboa (2002), com o fim da guerra, a utilização de técnicas de pesquisa operacional atraiu o interesse de diversas outras áreas. A natureza dos problemas encontrados é bastante abrangente e complexa, exigindo portanto uma abordagem que permita reconhecer os múltiplos aspectos envolvidos. Uma característica importante da pesquisa operacional é que facilita o processo de análise e de decisão é a utilização de modelos. Eles permitem a experimentação da solução proposta. Isto significa que uma decisão pode ser mais bem avaliada e testada antes de ser efetivamente implementada. A economia obtida e a experiência adquirida pela experimentação justificam a utilização da Pesquisa Operacional.

Entre os tipos de problemas em que a Pesquisa Operacional pode ser utilizada para ajudar no processo de decisão, encontram-se: problemas de otimização de recursos, de localização, de roteirização, de carteiras de investimento, de alocação de pessoas, problemas de previsão e planejamento, dentre outros.

Taha (2008) apresenta as principais fases de implementação da Pesquisa Operacional conforme segue:

- Definição do problema – envolve definir o escopo do problema sob investigação.
- Construção do modelo – implica uma tentativa de traduzir a definição do problema em relações matemáticas.
- Solução do modelo – se baseia na utilização de algoritmos de otimização bem-definidos. Um aspecto importante desta fase é a análise de sensibilidade, que trata de obter informações adicionais sobre o comportamento da solução ótima quando o modelo passa por algumas mudanças de parâmetros.
- Validação do modelo – verifica se o modelo proposto faz ou não o que deveria fazer, pode ser através da comparação dos resultados com dados históricos disponíveis, por exemplo.

- Implementação da solução – envolve a tradução dos resultados em instruções operacionais inteligíveis que serão emitidas para as pessoas que administrarão o sistema recomendado.

De acordo com o autor, em Pesquisa Operacional, não há uma única técnica para resolver todos os modelos matemáticos que podem surgir na prática. Em vez disso, o tipo e a complexidade do modelo matemático é que determinam a natureza do método de solução. A técnica mais utilizada é a programação linear, que é aplicada a modelos cujas funções objetivo e restrições são lineares. Outras técnicas são a programação inteira (na qual as variáveis assumem valores inteiros), a programação dinâmica (na qual o modelo original pode ser decomposto em subproblemas mais fáceis de tratar), a otimização em redes (na qual o problema pode ser modelado como uma rede) e a programação não linear (na qual as funções do modelo são não lineares).

Problemas de programação inteira, como o que será estudado mais adiante, são problemas de programação matemática em que uma ou mais variáveis de decisão são representadas apenas por valores inteiros. Lachtermacher (2007) destaca que esses problemas podem apresentar dois tipos básicos: programação inteira total (todas as variáveis de decisão são do tipo inteiro) e programação inteira mista (apenas uma parte das variáveis são do tipo inteiro, enquanto outras são do tipo real).

Programação não-linear, uma classificação baseada na natureza das equações envolvidas, é o caso mais geral de problemas de otimização, segundo Conto (2006). Pode ser representado como segue:

$$\begin{aligned}
 P_{NL} : \text{Maximize } & f(x) \\
 \text{Sujeito a: } & g(x) \leq 0 \\
 & x \in \mathbb{R}^n
 \end{aligned} \tag{1}$$

Onde, $f(x)$ e/ou $g(x)$ são não lineares e não precisam necessariamente ser contínuas. Não existe uma forma geral para resolver problemas desta natureza, devendo-se analisar cada caso em busca de um algoritmo eficiente, quando existir.

Programação não-linear inteira mista, é uma subclasse dos problemas e representa a união das duas últimas apresentadas acima. Nela existem variáveis de decisão contínuas e

inteiras, além de equações (função objetivo e restrições) não-lineares e lineares (não necessariamente precisa apresentar esta última).

Uma peculiaridade da maior parte das técnicas de Pesquisa Operacional destacada por Taha (2008) é que as soluções não são obtidas em formas fechadas (semelhante a fórmulas). Em vez disso, são determinadas por algoritmos, que fornecem regras de cálculo fixas que são aplicadas repetidas vezes ao problema, sendo que em cada repetição (denominada iteração) a solução fica mais próxima de se tornar ótima.

4.3 A OTIMIZAÇÃO¹² NA GESTÃO DE ÁGUAS

Otimização é o ato de obter o melhor resultado sob dadas circunstâncias. Matematicamente, isto significa encontrar o valor mínimo ou máximo de uma função de n variáveis, digamos $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, onde n pode ser qualquer inteiro maior que zero. Esta função tem algum significado real, que no presente trabalho será a função lucro da empresa responsável pelos passeios de catamarã pelo lago de Xingó. A função pode ser irrestrita ou estar sujeita a certas restrições nas variáveis da função.

O objetivo último das decisões que serão tomadas a partir da resolução dos problemas de otimização é por um lado minimizar o esforço requerido e ao mesmo tempo maximizar o benefício desejado, que neste caso será o lucro. Desde que o esforço requerido ou o benefício desejado em qualquer situação prática possa ser expresso como uma função de certas variáveis de decisão, otimização pode ser definida como o processo de descobrir as condições que fazem o valor de uma função mínimo ou máximo.

Um problema de otimização pode ser estabelecido como segue:

Encontrar

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)' = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

Tal que minimize (ou maximize) $f(X)$ sujeito às restrições:

¹² Os conceitos de otimização descritos nesta seção foram baseados no Capítulo 1 – Otimização estática ou técnicas de programação matemática da apostila da profa. Márcia Guedes Alcoforado, UFPE.

- $l_i(X) = 0, i = 1, 2, \dots, m$
- $g_j(X) \leq 0, j = m+1, m+2, \dots, p$

onde:

X – vetor n -dimensional chamado de vetor de escolha ou vetor de decisão,

$f(X)$ – função-objetivo

$l_i(X)$ – restrições de igualdade

$g_j(X)$ – restrições de desigualdade

A função-objetivo nada mais é do que a representação do critério de otimização escolhido, expresso como uma função das variáveis de escolha ou decisão.

Na maioria dos problemas econômicos, as variáveis de decisão não podem ser escolhidas arbitrariamente, tendo em vista que a Economia estuda a alocação dos recursos escassos e escassez implica restrições, como $l_i(X)$ e $g_j(X)$ apresentadas acima. Quando as restrições de desigualdade são de tal forma que tratá-las como restrições de igualdade produz o mesmo resultado, ou mesma solução, diz-se que as restrições são ativas, isto é, altera o valor ótimo da variável de escolha e a restrição mantém-se como uma igualdade no valor ótimo de x , caso contrário elas são denominadas inativas.

Encontram-se na literatura diversas aplicações relacionadas à gestão de águas, que utilizam programação matemática, outros ainda incluem a preocupação com a qualidade desse recurso em suas análises.

Paz *et al.* (2002) buscaram o manejo adequado de um sistema de irrigação que deverá ser capaz de propiciar ao agricultor o uso eficiente da água, para aumentar a produtividade das culturas, reduzir os custos de produção e, conseqüentemente, maximizar o retorno dos investimentos. Técnicas eficientes de aplicação de água constituem condições essenciais para o desenvolvimento agrícola sustentado, baseado na economia do recurso hídrico e na preservação ambiental. Eles estudaram a redução da receita líquida decorrente da aplicação deficiente ou excessiva de água, a influência da uniformidade de distribuição de água sobre a lâmina ótima econômica que maximiza a receita líquida e prever a operação otimizada de sistemas de irrigação por aspersão. Como resultados tiveram que a operação ótima dos sistemas de irrigação baseada nas estratégias de otimização econômica para maximização da receita líquida, proporciona níveis adequados de eficiência de aplicação, eficiência de armazenamento e área adequadamente irrigada. A uniformidade de distribuição, o custo da água e o valor pago pelo produto, são fatores

determinantes para a otimização de sistemas de irrigação, quando o objetivo é a maximização da receita líquida e a economia do recurso hídrico.

Brandão (2004) estabelece uma função objetivo com a finalidade de maximizar a receita bruta anual possível de ser auferida no sistema de reservatórios do São Francisco, considerando a irrigação e a geração de energia hidrelétrica. Sendo assim, foram estabelecidos três cenários e 4 alternativas de composição de valores unitários da receita bruta e verificou-se que, para a quase totalidade das situações analisadas, a otimização econômica implica em se adotar como vazão para irrigação o valor máximo admitido para esse uso no estudo. Apenas em uma das situações, em que foi diminuída pela metade a receita bruta por hectare irrigado e triplicada a da unidade de energia, é que apareceu um *trade-off* entre esses dois usos, caso contrário, do ponto de vista macroeconômico, vale a pena atender as demandas para irrigação na bacia, mesmo que haja algum prejuízo para a geração hidrelétrica.

Bandeira e Mendes (2006) apresentam um trabalho que tem por objetivo elaborar uma metodologia de planejamento da exploração do carvão mineral em bacias hidrográficas que busca a produção ótima do minério com a internalização dos custos de tratamento do efluente gerado e que, desse modo, evite a incidência de prejuízos em terceiros. O modelo de otimização proposto trata da maximização do valor presente líquido (VPL) da atividade de exploração de carvão mineral sob a consideração do despejo de efluentes em uma bacia hidrográfica, por meio de uma restrição imposta pelo meio ambiente. Como resultado, verificou-se que a restrição de concentração máxima dos metais imposta faz com que a produção tenha de ser reduzida em períodos de menor disponibilidade hídrica nos cursos d'água. O modelo apresentado torna possível concluir que, desde que haja o preparo necessário, pode-se aliar uma atividade lucrativa à proteção do meio ambiente. Tal conclusão é corroborada pelo valor positivo obtido pelo modelo para a função-objetivo.

Santos (2007) desenvolveu um modelo de otimização para o estudo da operação integrada de sistemas de reservatórios e perímetros irrigados, além de outros usos da água, objetivando a alocação ótima dos recursos hídricos entre os múltiplos usos e o estabelecimento de políticas operacionais via uma análise multiobjetivo. O modelo foi aplicado a um sistema constituído de dois reservatórios, Catolé II e Poço Redondo, ligados em série na bacia do Rio Piancó. O comportamento do sistema foi analisado para cinco objetivos (estabelecidos para o atendimento do abastecimento humano, vazão ecológica, volume meta, receita líquida e mão-de-obra oriunda

da atividade agrícola) e três cenários hidroclimáticos (seco, normal, chuvoso) para os períodos de um e cinco anos. Os resultados mostraram a eficiência do modelo em análise multiobjetivo e na seleção de regras operativas para a alocação da água atendendo as demandas, os objetivos estabelecidos e as restrições físicas estabelecidas.

Dantas Neto (1994) apresentou, em sua tese de doutorado, um trabalho sobre modelos de programação linear que teve como objetivo desenvolver e comparar dois sistemas de equações matemáticas baseados na resposta das culturas a água. Para tal, empregou-se a formulação padrão da programação linear, utilizando dois modelos, um considera a lâmina de água fixa e o outro as lâminas de água alternativas. A função objetivo utilizada neste trabalho foi a maximização da receita líquida de projeto e as restrições utilizadas foram as limitações de área, água e produção das culturas.

Moraes, Sampaio e Cirilo (2006) apresentam a aplicação de um modelo econômico-hidrológico integrado para gestão de recursos hídricos, na bacia do rio Pirapama, Pernambuco, que 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. Restrições de qualidade da água foram introduzidas no modelo final, tendo como consequência a redução substancial dos benefícios líquidos totais, principalmente aqueles relacionados ao uso industrial e a fertirrigação. Com essas restrições o modelo considera 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.

Segundo Envirowise (1997), reduções de 20% no consumo de água e geração de efluentes são atingidas, com pouco ou nenhum custo, em empresas que nunca tiveram iniciativas para economizar água e, reduções de até 40% ou mais, podem ser atingidas através de projetos com taxas de retorno de até dois anos. A minimização do consumo de água refletirá, entre outros aspectos, em menor capacidade de bombeamento de água e efluentes, menor consumo de produtos químicos no tratamento de água, possibilidade de aumentar a produção sem aumento do suprimento de água.

Babel *et al.* (2005) consideraram aspectos sócio-econômicos, ambientais e técnicos no desenvolvimento de um modelo para auxiliar tomadores de decisão na alocação ótima da água

armazenada em reservatórios entre diferentes usuários. As funções objetivo utilizadas no trabalho citado consistem em maximizar a satisfação e maximizar os benefícios econômicos pelos setores usuários, e podem ser otimizadas individualmente ou em conjunto, quando os dois objetivos são convertidos em um único antes de ser submetido ao método de otimização baseado em programação linear. A etapa de negociação da alocação é indiretamente considerada no modelo na medida em que o método de otimização apenas é acionado nos casos em que a oferta de água a ser alocada seja superior à demanda mínima aceitável por cada usuário. No caso em que é inferior, a alocação passa a ser baseada ou em critérios de igualdade, ou considerando os usos mais urgentes, ou ainda considerando prioridades definidas pelos próprios usuários.

Neste trabalho a otimização simulará o comportamento racional do empresário e mostrará os lucros obtidos diante das restrições de sua infra-estrutura e de possíveis restrições de poluição das águas do lago. Uma vez obtidos estes benefícios pode-se mensurar a redução dos mesmos diante de diversas possíveis restrições de qualidade. Dessa forma mensura-se o custo de oportunidade da qualidade da água do reservatório.

5. METODOLOGIA

Nesta seção será apresentada a metodologia utilizada, a formulação do problema, com a descrição da atividade econômica que será analisada, além das hipóteses assumidas, serão definidas a função-objetivo, as variáveis de decisão e as restrições do modelo a ser otimizado. Em seguida, será descrita a forma como os resultados do problema de otimização serão utilizados para construir uma forma funcional que represente os resultados através de uma função benefício líquido.

5.1 ASPECTOS DO PROBLEMA

No presente estudo é analisado o benefício da água do lago de Xingó resultante do seu uso para a recreação, o lazer, através da oferta de passeios de catamarã e escuna pelo lago, em meio às belezas dos cânions do São Francisco, até o Paraíso do Talhado, onde a empresa, monopolista, estabeleceu uma estação de banho para os visitantes. O benefício em questão é o lucro diário auferido pela empresa, que atende em média, por ano, 80.000 pessoas.

O lucro que uma empresa recebe, π , de um modo geral, pode ser expresso como:

$$\pi(y) = r(y) - c(y) \quad (3)$$

Onde o primeiro termo é a receita, e o segundo é o custo.

Estes valores: receita, custo e conseqüente lucro são dependentes do nível de produção, neste caso de serviço a ser prestado, ou melhor, de visitantes a serem atendidos, de forma a maximizar este lucro.

A condição de ótimo desse problema é direta, obtida ao satisfazer a condição de primeira ordem: na escolha ótima da produção, a receita marginal tem de ser igual ao custo marginal. Este será o único ponto em que a empresa não tem incentivo para mudar a produção.

A mesma condição $RMg=CMg$ tem de valer para a empresa competitiva; nesse caso, a receita marginal é igual ao preço, e a condição reduz-se a que o preço seja igual ao custo marginal. No caso de um monopolista, o termo da receita marginal é um pouco mais complicado. Se o monopolista decidir aumentar o seu produto em Δy , há dois efeitos nos lucros. Primeiro ele venderá uma parcela maior de sua produção e obterá com isso uma receita $p\Delta y$. Mas, em segundo lugar, o preço diminuirá em Δp e o monopolista obterá esse preço menor em toda a produção que está sendo vendida. Assim, o efeito total nas receitas de se alterar a produção em Δy será

$$\Delta r = p\Delta y + y\Delta p \quad (4)$$

Mais adiante será maximizado o lucro da empresa prestadora do serviço de passeio pelo lago em duas situações, sem restrição de carga máxima de fósforo que pode ser despejada no lago por dia por esse uso e com essa restrição, que será utilizada como forma a garantir a qualidade da água.

A carga de fósforo foi a variável de medida da qualidade da água escolhida em virtude desta ser a principal componente do processo de eutrofização, conforme apresentado na seção 4, e por ser uma externalidade negativa resultante dos vários usos do lago.

Utiliza-se aqui a definição de Hartwick e Olewiler (1986) apud Ramos (1996): uma externalidade existe quando as duas condições a seguir são satisfeitas:

1. a utilidade de um agente i (ou sua relação de produção) é função de variáveis cujos valores são escolhidos por outros agentes j , sem levar em consideração as preferências de i ;
2. o agente i não tem controle direto sobre as variáveis escolhidas por j , devido ao fato de que estas variáveis não têm valor de troca explícito. Não existe mercado para as variáveis que entram na função objetivo de i . Em outros termos, existe uma interdependência tecnológica entre os agentes que persiste porque nenhum mecanismo de mercado é capaz de avaliar preços para estas variáveis interdependentes. Esta interdependência pode ser benéfica ou não: no primeiro caso diz-se que a externalidade é positiva, no segundo caso ela é dita negativa.

Em virtude dos múltiplos usos do reservatório e da forma como são realizados, provavelmente será necessária, num futuro próximo, uma definição de limites das cargas de fósforo geradas por eles para garantir que o lago não se torne eutrofizado, o que poderá afetar de forma negativa os diversos usos.

Diante dessa possibilidade, supomos que é imposto um limite de carga de fósforo para o empresário e, então, verificamos como a imposição desse limite, e de suas variações, afeta o seu benefício líquido, ou seja, o lucro. Assim, a função benefício líquido diante de diversos aportes de fósforo, resultantes das alterações na restrição de qualidade da água, será dada pelo máximo lucro que o empresário pode obter diante das limitações de quantidade de carga orgânica (oriunda do fósforo) impostas à atividade. Como há uma relação entre a carga orgânica aportada, a quantidade de pessoas atendidas e as concentrações de fósforo associadas, a função benefício líquido também pode ser construída, tendo como variável dependente qualquer uma delas.

A partir dos valores ótimos obtidos, devidamente relacionados às variáveis dependentes, pode-se a partir de hipóteses acerca da forma funcional esperada, encontrar parâmetros que

melhor aproximem os pontos e identificar as funções benefício, através de uma minimização dos erros ao quadrado, no mesmo *software* de otimização.

Os diversos pontos ótimos resultantes serão utilizados para a estimação por Mínimos Quadrados Ordinários da função benefício líquido que relaciona o lucro com a carga de fósforo, de forma a verificar como o empresário será afetado caso haja essa restrição.

5.2 O MODELO

O problema formulado é o que simula o comportamento racional do empresário, procurando maximizar o seu lucro, escolhendo qual barco usar, quantas viagens cada barco deverá fazer até a estação de banho e qual a taxa de ocupação deles por dia, dadas as restrições de quantidade máxima de pessoas que podem ser atendidas por dia, quantidade de viagens por barco e por dia e, no modelo que considera a carga de fósforo (gP/dia), o limite de fósforo imposto.

Baseada nas informações adquiridas através da visita *in loco* foram estabelecidas as seguintes hipóteses para a construção do modelo:

- A empresa possui quatro embarcações disponíveis para o passeio, 3 catamarãs e 1 escuna, cada uma com sua capacidade máxima de pessoas a serem atendidas;
- Duas embarcações não podem sair ao mesmo tempo, uma vez que há apenas um lugar para atracar;
- Cada viagem tem duração média de 3 horas, uma hora para ir, uma para voltar e uma para o banho;
- Cada embarcação pode fazer até 2 viagens por dia, em virtude do tempo de duração das viagens e do tempo necessário para manutenção do barco antes/após cada viagem;
- No máximo, são feitas quatro viagens por dia até a estação de banho, tendo em vista a duração das viagens e que estas têm que ser feitas enquanto o dia está claro;
- Não serão considerados os custos fixos, por estes não serem afetados diretamente pela restrição de carga de fósforo;
- Os custos variáveis da empresa são dados em função da taxa de ocupação dos barcos e por viagem.

5.2.1 Problema de Maximização

As variáveis de decisão definirão para o empresário: como deve ser a alocação dos visitantes, qual transporte disponível ele deverá utilizar, quantas viagens de cada transporte devem ser feitas no dia e quantas pessoas devem estar em cada uma das embarcações, de forma a maximizar o seu lucro. Esta será a função objetivo do problema, que está sujeita a algumas restrições, conforme a formulação matemática a seguir:

$$\text{Max } \pi = p \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^2 k_i x_{ij} y_{ij} - \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^2 w_i x_{ij} - \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^2 c_i y_{ij} - \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^2 s_i x_{ij} \quad (5)$$

sujeito a:

$$\text{Restrição de quantidade de viagens por embarcação:} \quad \sum_{j=1}^2 y_{ij} \leq 2 \quad (6)$$

$$\text{Restrição de quantidade de viagens por dia:} \quad \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^2 y_{ij} \leq 4 \quad (7)$$

$$\text{Restrição de quantidade de pessoas:} \quad \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^2 k_i x_{ij} y_{ij} \leq Q \quad (8)$$

$$\text{Restrição de qualidade da água:} \quad t \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^2 k_i x_{ij} y_{ij} \leq P \quad (9)$$

$$\text{Variável positiva:} \quad 0 \leq x_{ij} \leq 1 \quad (10)$$

$$\text{Variável binária:} \quad y_{ij} = (0,1) \quad (11)$$

onde:

- *variáveis de decisão (endógenas):*

x_{ij} = indica a taxa de ocupação (%) da embarcação i na viagem j ;

y_{ij} = determina se a embarcação i fez a viagem j , sendo assim uma variável binária que tem valor 1(hum) quando a embarcação realiza a viagem e 0(zero) caso contrário;

- *variáveis exógenas:*

p – preço médio recebido por visitante por passeio (R\$);

k_i – capacidade máxima de pessoas na embarcação i (pessoas);

w_i – custo de manutenção por taxa de ocupação da embarcação (R\$);

c_i – custo da viagem por embarcação (R\$);

s_i – imposto sobre serviço por embarcação com capacidade máxima atendida (R\$);

Q – quantidade máxima de pessoas atendidas por dia (pessoas);

t – carga de fósforo por visitante (gP/visit.);

P – carga máxima de fósforo (gP/dia).

O problema de otimização apresentado pode ser classificado como: restrito; de otimização estática (quanto à natureza das variáveis de escolha); de programação inteira mista (quanto aos valores permissíveis das variáveis de escolha, em que apenas uma parte das variáveis são do tipo inteiro, y_{ij} , enquanto outras são do tipo real, x_{ij}) e; determinística (quanto à natureza das variáveis).

Os valores das constantes referentes à capacidade máxima de pessoas por embarcação (k_i) – 250, 190, 130 e 60 respectivamente - e a quantidade total de pessoas que podem ser atendidas por dia (Q), 880 pessoas, foram fornecidos pela empresa. O preço médio recebido por visitante (p) foi estimado ponderando o preço que a empresa recebe por visitante de acordo com a forma como ele chegou até a empresa, segundo informações obtidas, se por agências de viagens A (45%), agências de viagens B (20%), agência de viagem C (15%), direto na recepção (15%) ou cortesia (5%), conforme fórmula a seguir:

$$p = (0,45 \times 30,00) + (0,20 \times 27,00) + (0,15 \times 36,00) + (0,15 \times 38,00) + (0,05 \times 0,00) = 30,00 \quad (12)$$

A carga de fósforo (t) por visitante foi estimada a partir de Von Sperling (1996, p.160), utilizando informações de contribuições unitárias de fósforo típicas de esgotos domésticos, que é de 1,0 kgP/hab.ano. Esse valor foi transformado em 2,739 gP/hab.dia após sua divisão por 365 dias e este, por sua vez, foi dividido em 24 horas e em seguida multiplicado por 3 horas, que é o tempo de duração de um passeio, chegando-se assim ao valor de 0,342 gP/visitante, por passeio.

Em relação aos custos, a alíquota do ISS é de 5% sobre o valor recebido por visitante e é assumido que para todos é emitida nota fiscal. A constante s_i representa o valor pago referente a esse imposto quando a embarcação está com 100% da sua capacidade, uma vez que a variável que será multiplicada por ela é a taxa de ocupação e não a quantidade exata de pessoas, o que daria o mesmo resultado da multiplicação do valor do ISS, por visitante, pela quantidade de pessoas atendidas. A constante w_i , custo de manutenção por taxa de ocupação da embarcação, é composta pelas despesas com limpeza e manutenção mecânica do barco, a primeira foi obtida para o dia e a segunda foi transformada para o dia, a partir do valor médio mensal dividido pelos

dias do mês em que são realizados passeios, em média 25 dias por mês. O parâmetro c_i , custo da viagem por embarcação, foi estimado com base em informações fornecidas pela empresa sobre combustível, telefone, tripulação (contratados) e guia de turismo (prestador de serviço), além dos impostos, alimentação e transporte dos funcionários.

A carga máxima de fósforo, P (gP/dia), varia entre 370 e 4, sendo os primeiros valores considerados como se não tivesse restrição, uma vez que eles são superiores à carga associada ao número máximo de pessoas (Q).

A seguir estão os valores das variáveis exógenas utilizadas na otimização, que variam por embarcação.

Tabela 4. Variáveis exógenas utilizadas.

<i>Embarcação</i>	k_i (pessoas)	w_i (R\$)	c_i (R\$)	s_i (R\$)
1	250	200	630	375
2	190	173	581	285
3	130	145	467	195
4	60	120	278	90

Fonte: Elaboração do próprio autor a partir de dados da empresa.

Para solução do problema foi utilizado o GAMS (*General Algebraic Modelling System*), um *software*, desenvolvido na década de 80, para a solução de problemas de programação matemática. O *software* facilita a análise e a entrada de dados, e se constitui numa linguagem de programação de alto nível pela qual é possível a resolução de problemas de larga e reduzidas escalas. Permite que alterações no modelo sejam feitas de maneira simples e segura, impede que sejam estabelecidas relações algébricas ambíguas além de possibilitar que a descrição do modelo seja independente do algoritmo de resolução (Brooke *et al.*, 1998).

O modelo apresenta uma solução ótima com 7 equações e 5 variáveis genéricas, 10 equações e 19 variáveis geradas no modelo específico e 8 variáveis discretas.

A partir dos pontos obtidos resultantes da otimização do benefício líquido do empresário para diferentes limites de carga de fósforo, procurou-se identificar uma tendência, ou forma funcional da função benefício líquido, relacionando o lucro com o limite da carga de fósforo. Assim, essa função permitirá a observação de quanto o benefício pode ser reduzido caso exista a imposição de limites de carga para o uso do lago para a atividade econômica em questão.

Este valor pode ser visto como o custo da qualidade da água, ou o custo de oportunidade para o empresário que explora os catamarãs, obtido a partir de otimizações para diferentes limites de carga de fósforo, uma vez que para cada limite será calculado quanto o empresário deixa de lucrar (custo) comparando-se o seu lucro com a restrição imposta ou sem restrição.

Com os pontos (lucro, carga de fósforo) encontrados no GAMS, como resultado das otimizações, e a partir de hipóteses de formas funcionais, procurou-se encontrar os parâmetros que minimizassem a diferença entre os valores encontrados e a associada forma funcional hipotetizada, que será a função benefício líquido.

Diante da restrição de quantidade de pessoas (equação 8) e do valor limite dessa restrição, 880 pessoas, observa-se que quando a carga de fósforo limite imposta pela restrição de qualidade da água (equação 9), P , é maior do que a carga gerada pela quantidade máxima de pessoas atendidas por dia há uma saturação, isto é, o lucro será o mesmo, independente do limite P , tornando essa última restrição inativa. Assim, são estimadas várias formas funcionais, listadas a seguir:

$$\text{Linear:} \quad L_i = a_0 + a_1 P_i \quad (13)$$

$$\text{Lin-log:} \quad L_i = a_0 + a_1 \ln(P_i) \quad (14)$$

$$\text{Log-lin:} \quad \ln(L_i) = a_0 + a_1 P_i \quad (15)$$

$$\text{Log-log:} \quad \ln(L_i) = a_0 + a_1 \ln(P_i) \quad (16)$$

$$\text{Polinomial}^{13}: \quad L_i = a_n P_i^n + a_{n-1} P_i^{n-1} + a_{n-2} P_i^{n-2} + \dots + a_1 P_i^1 + a_0 \quad (17)$$

Onde:

L_i – lucro do empresário para carga de fósforo por visitante (R\$/dia);

P_i – carga de fósforo (gP/dia).

¹³ Para diversos graus, a partir de grau 2, uma vez que a função linear (9) é uma polinomial de grau 1.

Os dados utilizados foram dados gerados pela solução do problema de otimização que maximiza o benefício líquido (lucro) do empresário do setor em estudo variando-se o limite de carga de fósforo imposto ao setor, problema este apresentado na seção 5.2.1.

A minimização dos erros ao quadrado foi realizada através do programa em GAMS (Apêndice A) que encontrou os parâmetros ótimos das formas funcionais hipotetizadas, linear, lin-log, log-lin, log-log e polinomiais (equações 13 a 17).

6. RESULTADOS

É utilizado o procedimento de solução disponível no *software* GAMS MINLP (*Mixed Integer Nonlinear Programming* – Programação não-linear inteira mista) para resolução do problema de maximização do lucro do empresário, tendo em vista que temos um problema de programação inteira mista, que uma vez que a variável de decisão y é inteira e a x não. No caso em questão, a função objetivo (o primeiro termo da equação 5) e as restrições de quantidade de pessoas (equação 8) e de qualidade da água (9) são equações não-lineares.

O problema de maximização proposto foi resolvido primeiramente sem a restrição de qualidade da água e em seguida 39 vezes, cada uma com um limite de carga de fósforo (P) diferente, variando de 300 gP/dia a 4 gP/dia. Desta forma foram obtidas as 33 observações a seguir, ordenadas na sequência de diminuição do limite (ou aumento da restrição), das quais foram utilizados mais adiante os dados lucro e carga de fósforo para a estimação da função benefício líquido. O algoritmo do GAMS é apresentado no Apêndice B.

Tabela 5. Maximização do lucro para diferentes restrições de qualidade da água.

<i>n</i>	<i>Limite da Carga de fósforo (gP/dia)</i>	<i>Pessoas atendidas</i>	<i>Lucro (R\$)</i>	<i>Custo social amplo</i>	<i>Carga de fósforo (gP/dia)</i>	<i>Embarcações utilizadas</i>	<i>Viagens no dia</i>	<i>Redução no lucro* (R\$)</i>
1	370	880	21912,00	0,00	300,96	1 e 2	4	-
2	360	880	21912,00	0,00	300,96	1 e 2	4	-
3	350	880	21912,00	0,00	300,96	1 e 2	4	-
4	340	880	21912,00	0,00	300,96	1 e 2	4	-
5	330	880	21912,00	0,00	300,96	1 e 2	4	-
6	320	880	21912,00	0,00	300,96	1 e 2	4	-
7	310	880	21912,00	0,00	300,96	1 e 2	4	-
8	300	877	21834,56	77,44	299,93	1 e 2	4	-77,44
9	290	847	21027,85	884,15	289,67	1 e 2	4	-806,71
10	280	818	20221,14	1690,86	279,76	1 e 2	4	-806,71
11	270	789	19414,43	2497,57	269,84	1 e 2	4	-806,71
12	260	760	18607,72	3304,28	259,92	1 e 2	4	-806,71
13	250	730	17801,01	4110,99	249,66	1 e 2	4	-806,71
14	240	701	17284,49	4627,51	239,74	1, 2 e 4	4	-516,52
15	230	672	16768,59	5143,41	229,82	1 e 2	3	-515,90

Continua

n	Limite da Carga de fósforo (gP/dia)	Pessoas atendidas	Lucro (R\$)	Custo social amplo*	Carga de fósforo (gP/dia)	Embarcações utilizadas	Viagens no dia	Redução no lucro** (R\$)
16	220	643	15961,88	5950,12	219,91	1 e 2	3	-806,71
17	210	614	15155,17	6756,83	209,99	1 e 2	3	-806,71
18	200	584	14348,46	7563,54	199,73	1 e 2	3	-806,71
19	190	555	13541,75	8370,25	189,81	1 e 2	3	-806,71
20	180	526	13009,37	8902,63	179,89	1 e 4	3	-532,38
21	170	497	12509,01	9402,99	169,97	1	2	-500,36
22	160	467	11699,06	10212,94	159,71	1	2	-809,94
23	150	438	10917,28	10994,72	149,80	1 e 2	2	-781,79
24	140	409	10110,57	11801,43	139,88	1 e 2	2	-806,71
25	130	380	9303,86	12608,14	129,96	1 e 2	2	-806,71
26	120	350	8497,15	13414,85	119,70	1 e 2	2	-806,71
27	110	321	7690,44	14221,56	109,78	1 e 2	2	-806,71
28	100	292	6883,73	15028,27	99,86	1 e 2	2	-806,71
29	90	263	6365,68	15546,32	89,95	1 e 4	2	-518,05
30	80	233	5849,53	16062,47	79,69	1	1	-516,15
31	70	204	5039,59	16872,41	69,77	1	1	-809,94
32	60	175	4229,65	17682,35	59,85	1	1	-809,94
33	50	146	3419,71	18492,29	49,93	1	1	-809,94
34	40	116	2609,77	19302,23	39,67	1	1	-809,94
35	30	87	1799,83	20112,18	29,75	1	1	-809,94
36	20	58	1271,71	20640,29	19,84	4	1	-528,12
37	10	29	496,85	21415,15	9,92	4	1	-774,85
38	5	14	109,43	21802,57	4,79	4	1	-387,43
39	4	11	31,94	21880,06	3,76	4	1	-77,49

* Ou custo da qualidade da água;

** Redução no lucro em relação ao limite de carga de fósforo anterior, também entendido como custo social, apenas o ponto de referência é diferente.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Como se esperava, com o aumento da restrição de qualidade da água, ou melhor, redução na carga de fósforo por dia que é permitida ao empresário, o lucro dele é reduzido. A quantidade ótima de pessoas é sempre aquela que leva a um valor mais próximo da carga de fósforo emitida à carga de fósforo permitida pela restrição (não é exatamente no limite porque quantidade de pessoas é um número inteiro, sendo assim a restrição de qualidade da água é ativa). Essa restrição será inativa apenas quando o limite imposto ao setor for maior do que ele consegue aportar quando atende à sua capacidade máxima de visitantes, 880 pessoas por dia. Sendo assim, a relação entre o benefício líquido do empresário e a carga de fósforo emitida é positiva até o ponto em que a restrição passa a ser inativa, como pode ser observado na figura a seguir.

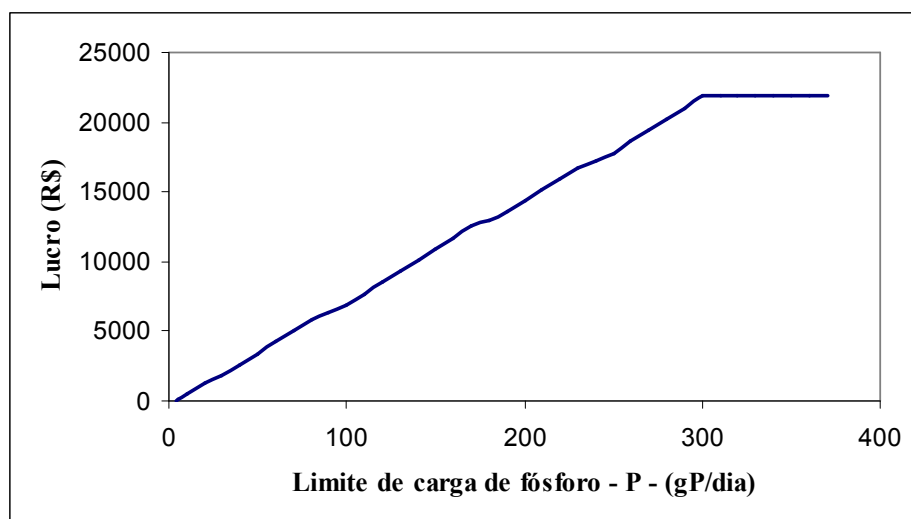


Figura 5. Lucro x Limite de Fósforo (P)

Fonte: Elaborada pela própria autora.

A embarcação 1, que tem capacidade para atender a 250 pessoas, é a mais utilizada, aparecendo em 35 das 39 otimizações, provavelmente em virtude dos seus custos de manutenção (w_i) e por viagem (c_i) não serem muito superiores aos custos das demais embarcações, tal situação é verificada na análise de sensibilidade apresentada mais adiante. A segunda embarcação que realiza mais viagens é a 2, que atende até 190 pessoas. A embarcação 3 (capacidade de até 130 pessoas) não foi utilizada em nenhuma otimização. Segundo informações obtidas *in loco*, essa foi a primeira embarcação da empresa, e nos últimos dois anos foram adquiridas as maiores embarcações, com capacidade de 190 e 250 pessoas, respectivamente.

Confrontando a quantidade de pessoas atendidas com a demanda diária pelo passeio nos diversos períodos do ano é observado a partir de qual valor limite da carga de fósforo imposta (P) o empresário será afetado pela restrição de qualidade da água. Segundo informações obtidas, no mês de janeiro, de maior demanda, o fluxo médio por dia é de 548 visitantes, sendo assim a restrição passaria a ser ativa a partir da carga limite de 180 gP/dia. Os outros meses de maior visitação são fevereiro, julho e dezembro, com uma média de 292 visitantes/dia, tendo a referida restrição como ativa a partir do limite de 90 gP/dia. Os meses de maio e agosto são os de menor procura pelo passeio, tendo uma média diária de 148 visitantes e sendo assim a restrição passaria a ser ativa a partir do limite de 50 gP/dia. Nos demais meses a média de visitação diária é de 190 pessoas e, dessa forma, a restrição se torna ativa a partir de 60 gP/dia.

A última coluna da tabela, redução no lucro, apresenta a variação no lucro em relação à restrição anterior, que é sempre um valor negativo devido à seqüência utilizada, e está representada graficamente a seguir. Observam-se trechos de constância nessa variação, os quais abrangem as observações em que são utilizados os mesmos barcos (como pode ser verificado na tabela 5). Estes valores podem ser vistos como os custos sociais internalizados pelo agente, caso ele tenha que limitar seus aportes de fósforo. Na Figura 6 pode ser observado o comportamento desses custos conforme o limite de carga de fósforo imposto ao empresário aumenta, ou seja, conforme a restrição diminui.

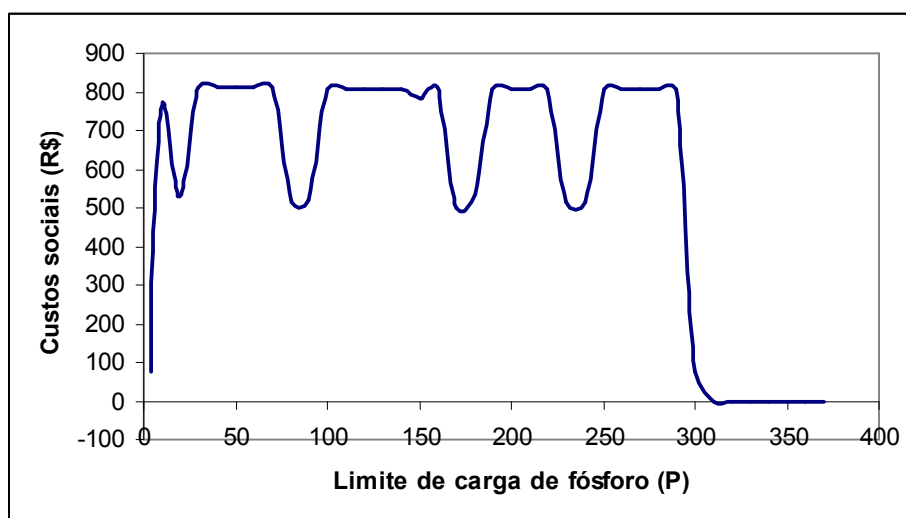


Figura 6. Custos sociais internalizados pelo agente.

Fonte: Elaborada pela própria autora.

Na Figura 7, a seguir, que relaciona os custos sociais com o lucro, é possível observar que os custos sociais internalizados pelo empresário a partir da imposição da restrição de carga de fósforo, em relação à restrição anterior (redução no lucro), concentram-se na faixa dos R\$ 800,00 (oitocentos reais).

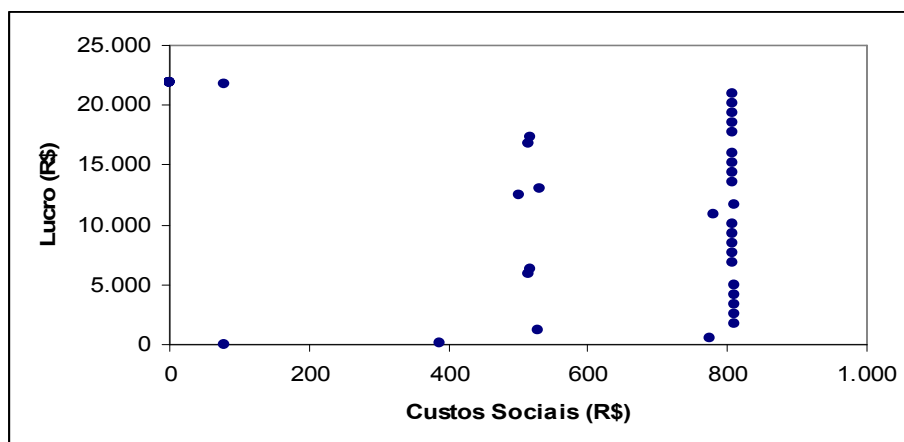


Figura 7. Lucro x Custos sociais internalizados (redução no lucro).

Fonte: Elaborada pela própria autora.

Na Tabela 5 são apresentados também os custos sociais na forma ampla, ou custo da qualidade da água, quando a redução no lucro é comparada com o lucro do ponto em que não havia restrição, no caso R\$ 21.912,00, isto é, quanto o empresário deixa de ganhar para preservar a qualidade da água. A relação desses custos com a restrição de fósforo é apresentada na Figura 8, que atende às expectativas de que quanto maior a restrição (ou seja, menor a carga de fósforo permitida para o uso) maior o custo da qualidade do recurso ambiental. O platô a partir de 300 g/P demonstra que a restrição está inativa, isso ocorre em virtude da restrição de quantidade de pessoas estar ativa, isto, na capacidade máxima de pessoas que a empresa pode atender por dia. Esse ponto de saturação poderá mudar se a empresa aumentar a sua capacidade.

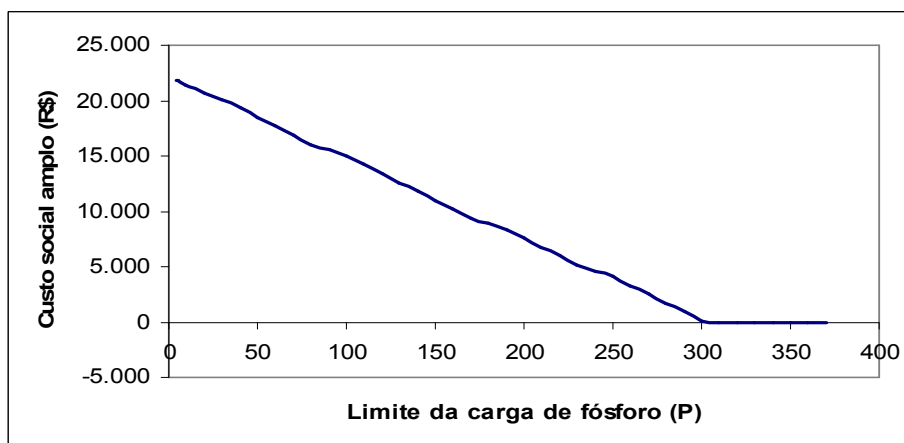


Figura 8. Custo social amplo (custo da qualidade da água) x limite da carga de fósforo.

Fonte: Elaborada pela própria autora.

É preciso atentar para o fato de que o custo da qualidade da água apresentado na Tabela 5 é por dia e é para o uso recreacional do lago de Xingó para os passeios de catamarã de uma empresa que apresente a capacidade e as características técnicas apresentadas na seção 5.2.

6.1 A FUNÇÃO BENEFÍCIO LÍQUIDO

A partir dos dados gerados pelo processo de otimização do problema de maximização descrito na seção 9.2.1 foram gerados os dados da tabela 5, dos quais o lucro (R\$) e o limite da carga de fósforo (gP/dia) são usados para obter os parâmetros da função benefício líquido minimizando a soma dos erros ao quadrado, usando otimização no GAMS (conforme Apêndice A). Tendo em vista que a partir do limite de 301 gP/dia a restrição de qualidade de fósforo se torna inativa, diante da hipótese assumida de que a empresa tem capacidade para atender no máximo até 880 pessoas por dia, a função benefício líquido não é linear e, portanto, foram testadas diversas formas funcionais.

Buscou-se a função cujos parâmetros permitiam uma maior aproximação dos dados estimados com os dados originais, resultantes do problema de maximização do lucro do empresário. Foram estimadas funções nos formatos apresentados na seção 5.2.1, linear, lin-log, log-lin, log-log e polinomial, equações 13 a 17 respectivamente, tendo sido testada essa última até o grau 5. A partir dos parâmetros encontrados para essas funções (Apêndice C) foi construída a Figura 9, verificando graficamente qual função se aproximava mais dos dados observados, ótimos resultantes da maximização do lucro.

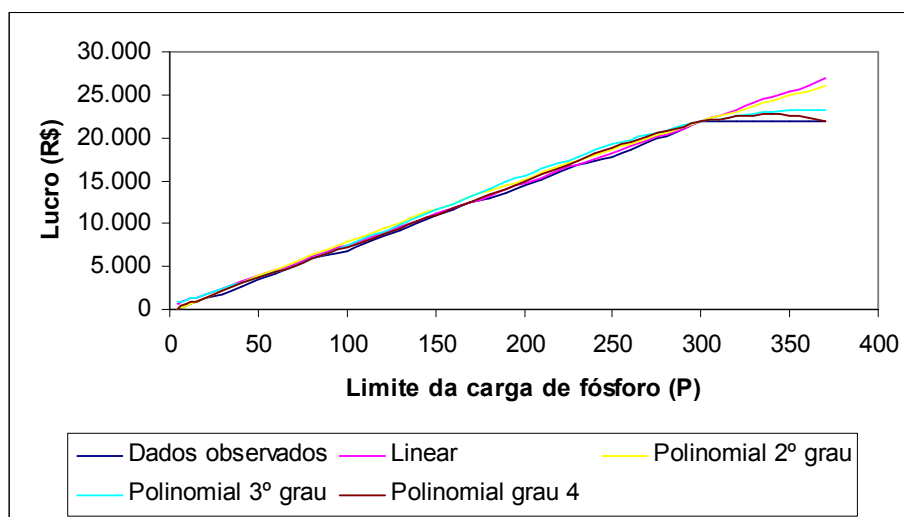


Figura 9. Função benefício líquido: dados observados x formas funcionais.

Fonte: Elaborada pela própria autora.

Foram descartadas as formas funcionais lin-log, log-lin e log-log, por destoarem muito da curva dos dados observados. Diante da Figura acima, da verificação da soma dos quadrados dos resíduos, buscando-se a que minimizava os erros, e das hipóteses assumidas no problema a função que melhor explica o comportamento do lucro (benefício líquido) do setor em função da imposição de limites da carga de fósforo (variações na restrição de qualidade da água) é a função polinomial de grau 4, apresentada nas equações 18 e 19 a seguir:

$$L_i = a_4 P_i^4 + a_3 P_i^3 + a_2 P_i^2 + a_1 P_i^1 + a_0 \quad (18)$$

Onde, substituindo os coeficientes a_n , temos:

$$L_i = -0,00000328P_i^4 + 0,00183304P_i^3 - 0,31736819P_i^2 + 92,62524474P_i^1 - 333,600 \quad (19)$$

Com a equação 19, função benefício líquido estimada, foi desenhada a Figura 10, para verificação do ajuste da função aos dados de lucro gerados a partir do valor da restrição no problema de maximização do lucro do empresário. É importante destacar que para valores de limite da carga de fósforo (P), da restrição de qualidade da água, maiores do que 300 gP/dia a função não é recomendada, devido à saturação da atividade, conforme a capacidade máxima atual de visitantes que a empresa é capaz de atender por dia.

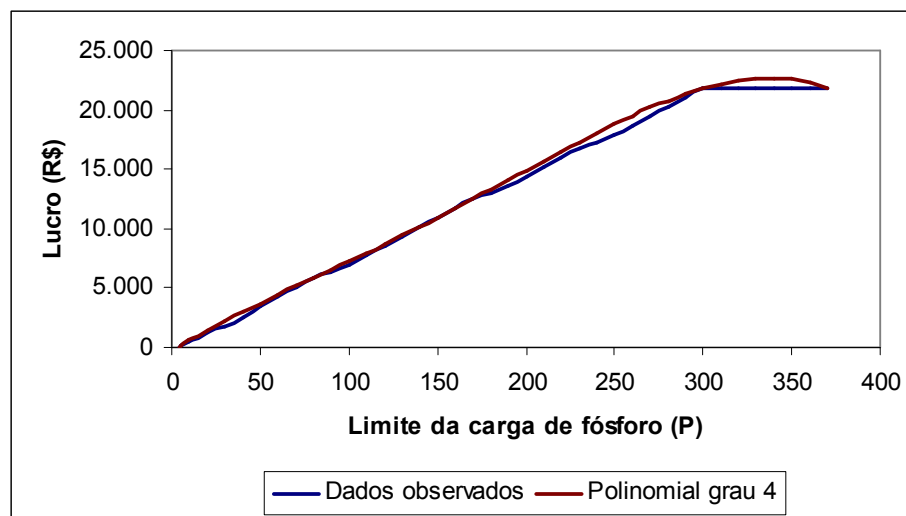


Figura 10. Função benefício líquido: dados observados x função polinomial de grau 4.

Fonte: Elaborada pela própria autora.

6.2 A FUNÇÃO CUSTO SOCIAL AMPLO

Para analisar a relação do custo social amplo (ou custo da qualidade da água), isto é, da redução do lucro da atividade dos diversos limites da carga de fósforo impostos em relação à situação sem restrição de qualidade da água, com os vários limites é estimada a função custo social amplo.

Esta função possibilitará ao formulador de políticas analisar previamente o custo da qualidade da água, o custo que o empresário do setor em estudo irá incorrer de acordo com as prováveis restrições de qualidade da água. Ela criará uma alternativa para o modelo econômico-hidrológico integrado proposto inicialmente, ao invés de tentar maximizar o benefício social do uso da bacia ele poderá minimizar o custo social, representado pelo somatório dos custos sociais dos múltiplos usos do reservatório.

A Figura 8, apresentada no início deste capítulo, mostra que a relação entre o custo social amplo e o limite da carga de fósforo imposta apresenta uma relação negativa, ou seja, quanto maior a carga de fósforo que o empresário pode aportar no lago menor é o seu custo social. Essa Figura ainda se apresenta um formato muito semelhante ao da Figura 5, que relaciona o lucro (benefício) com o limite da carga de fósforo incidente sobre o setor, a diferença está que há uma relação positiva nessa última relação, enquanto na do custo social amplo a relação é negativa entre as variáveis.

Diante dessa semelhança foram testadas formas funcionais polinomiais e, novamente, a polinomial de grau 4 apresentou melhor ajuste aos dados. A função custo social amplo é:

$$CS_i = 0,00000211P_i^4 - 0,00113874P_i^3 + 0,20275541P_i^2 - 86,1401P_i^1 + 22542,94 \quad (20)$$

Confirmando a inversão da relação do limite da carga de fósforo com o benefício líquido e com o custo social amplo, observada graficamente, os parâmetros estimados das funções benefício líquido (equação 19) e custo social amplo (equação 20) apresentam sinais contrários nos respectivos parâmetros.

Na Figura 11 pode ser verificado o ajustamento dessa função aos dados originais. Sugerimos a não utilização desta para valores de carga de fósforo acima de 300 gP/dia, o atual ponto de saturação da empresa, como já citado anteriormente.

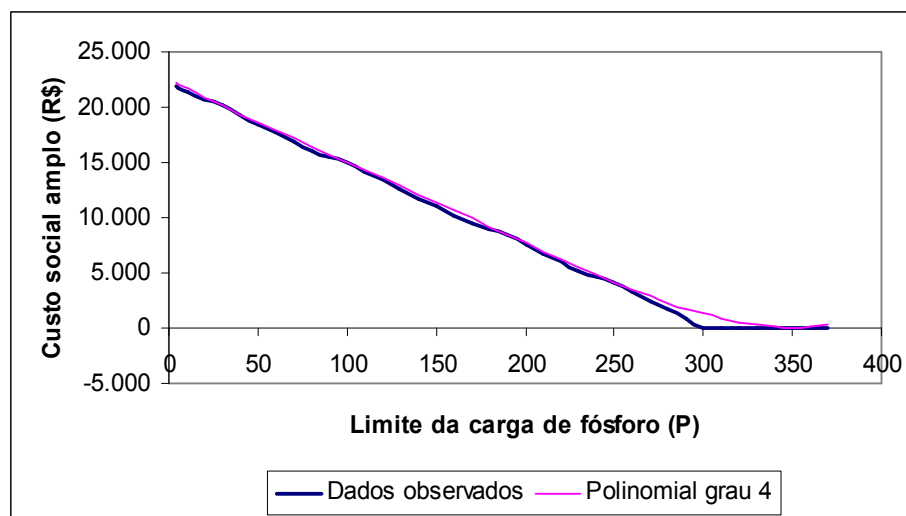


Figura 11. Ajuste da função custo social amplo em relação aos dados originais.
Fonte: Elaborada pela própria autora.

6.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Foi procedida a análise de sensibilidade do modelo a alterações nos custos das embarcações. Inicialmente foram feitas modificações nos coeficientes dos custos da embarcação 1, passando w_1 a R\$ 300,00 e c_1 a R\$ 800,00, o que representa um aumento de 50% nos seus custos de manutenção e de 27% no seu custo por viagem, respectivamente.

Os resultados das otimizações com as novas constantes estão expressos na Tabela 6, onde se observa que não há alteração na quantidade de pessoas atendidas a cada novo limite de fósforo imposto, o que era esperado. Ainda, houve uma pequena redução na utilização da embarcação 1, que deixa de realizar viagens a partir da restrição de 70 gP/dia, enquanto nos resultados anteriores apenas a partir da restrição de 20 gP/dia isso acontecia. Novamente a embarcação 3 não é utilizada.

Tabela 6. Maximização do lucro para diferentes restrições de qualidade da água com novos parâmetros dos custos da embarcação 1.

<i>n</i>	<i>Limite da carga de fósforo (gP/dia)</i>	<i>Pessoas atendidas</i>	<i>Lucro (R\$)</i>	<i>Custo social amplo</i>	<i>Carga De fósforo (gP/dia)</i>	<i>Embarcações utilizadas</i>	<i>Viagens no dia</i>	<i>Redução no lucro* (R\$)</i>
1	370	880	21372,00	0,00	300,96	1 e 2	4	-
2	360	880	21372,00	0,00	300,96	1 e 2	4	-
3	350	880	21372,00	0,00	300,96	1 e 2	4	-
4	340	880	21372,00	0,00	300,96	1 e 2	4	-
5	330	880	21372,00	0,00	300,96	1 e 2	4	-
6	320	880	21372,00	0,00	300,96	1 e 2	4	-
7	310	880	21372,00	0,00	300,96	1 e 2	4	-
8	300	877	21295,37	76,63	299,93	1 e 2	4	-76,63
9	290	847	20497,12	874,88	289,67	1 e 2	4	-798,24
10	280	818	19698,88	1673,12	279,76	1 e 2	4	-798,25
11	270	789	18900,63	2471,37	269,84	1 e 2	4	-798,24
12	260	760	18102,39	3269,61	259,92	1 e 2	4	-798,25
13	250	730	17304,14	4067,86	249,66	1 e 2	4	-798,25
14	240	701	16744,49	4627,51	239,74	1, 2 e 4	4	-559,65
15	230	672	16233,65	5138,35	229,82	1 e 2	3	-510,84
16	220	643	15435,40	5936,60	219,91	1 e 2	3	-798,24
17	210	614	14637,16	6734,84	209,99	1 e 2	3	-798,25
18	200	584	13838,91	7533,09	199,73	1 e 2	3	-798,25
19	190	555	13040,67	8331,33	189,81	1 e 2	3	-798,25
20	180	526	12469,37	8902,63	179,89	1 e 4	3	-571,30
21	170	497	11444,18	9927,83	169,97	1 e 2	3	-1025,19
22	160	467	11171,93	10200,07	159,71	1	2	-272,24
23	150	438	10373,68	10998,32	149,80	1	2	-798,25
24	140	409	9849,44	11522,56	139,88	1 e 2	2	-524,24
25	130	380	9051,19	12320,81	129,96	1 e 2	2	-798,25
26	120	350	8252,95	13119,05	119,70	1 e 2	2	-798,25
27	110	321	7454,70	13917,30	109,78	1 e 2	2	-798,25
28	100	292	6656,46	14715,54	99,86	1 e 2	2	-798,25
29	90	263	6095,68	15276,32	89,95	1 e 4	2	-560,77
30	80	233	5585,97	15786,04	79,69	1	1	-509,72
31	70	204	4771,98	16600,02	69,77	2 e 4	2	-813,99
32	60	175	4259,26	17112,74	59,85	2	1	-512,72
33	50	146	3452,55	17919,45	49,93	2	1	-806,71
34	40	116	2645,84	18726,16	39,67	2	1	-806,71
35	30	87	1839,13	19532,87	29,75	2	1	-806,71
36	20	58	1271,71	20100,29	19,84	4	1	-567,42
37	10	29	496,85	20875,15	9,92	4	1	-774,85
38	5	14	109,43	21262,57	4,79	4	1	-387,43
39	4	11	31,94	21340,06	3,76	4	1	-77,49

* Redução no lucro em relação ao limite de carga de fósforo anterior, também entendido como custo social, apenas o ponto de referência é diferente.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura abaixo o lucro após a variação dos parâmetros é comparado com o lucro do modelo inicial, havendo uma redução significativa até a restrição de 70 gP/dia, destacando-se o ponto em que a restrição é de 170 gP/dia, que na situação inicial se faziam 2 viagens com a embarcação 1 e agora são realizadas duas viagens com ela e uma com a embarcação 2.

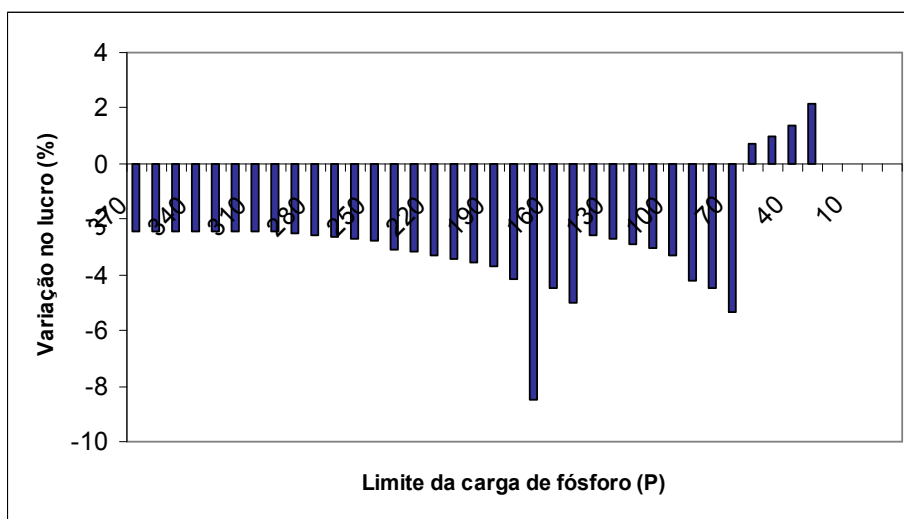


Figura 12. Variação percentual no lucro da análise de sensibilidade em relação ao lucro do modelo com os parâmetros iniciais.

Fonte: Elaborada pela própria autora.

Além disso, a partir da observação da variação percentual no lucro da análise de sensibilidade em relação ao lucro do problema inicial fica evidente que mesmo com alterações tão significativas nos custos da embarcação 1 não há alterações significativas no lucro, o que mostra a robustez do modelo a erros na estimação daqueles custos. A variação percentual no lucro vai de -8,51% a 2,18%, tendo como variação média -2,53%.

Destaca-se ainda que nas restrições de 60 a 30 gP/dia o lucro é maior com os novos parâmetros, uma vez que a embarcação 1 utilizada inicialmente é substituída pela 2 quando são utilizados os novos parâmetros. Ainda, não há diferença no lucro do empresário a partir do limite de 20 gP/dia, o que é explicado pelo fato da embarcação não realizar viagens nessa faixa de limites nas duas situações.

Na Figura a seguir é apresentado o comportamento do custo da qualidade da água (ou social) conforme diminui a carga de fósforo permitida ao empresário nas duas situações, com os parâmetros iniciais e com eles alterados para a análise de sensibilidade. O comportamento nas duas situações é muito semelhante, evidenciando-se apenas quando o limite imposto é de 170

gP/dia, novamente, o custo social é expressivamente maior com os novos parâmetros. Nota-se, ainda, que na maioria dos limites o custo social internalizado pelo empresário, conforme diminui a carga de fósforo permitida (ou, aumenta a restrição), é maior com os parâmetros iniciais.

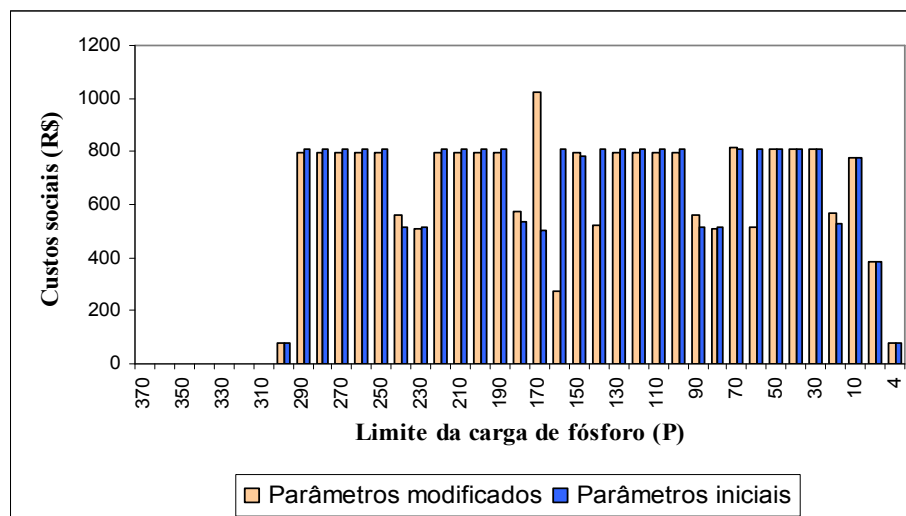


Figura 13. Comparação dos custos sociais entre o modelo com os parâmetros iniciais e o da análise de sensibilidade.

Fonte: Elaborada pela própria autora.

Comparando-se o custo da qualidade da água, redução no lucro após a imposição do limite da carga de fósforo em relação ao lucro sem restrição ou com restrição inativa, do modelo com aumento nos parâmetros dos custos da embarcação 1 com o do modelo inicial nota-se uma redução desses na maioria dos limites de fósforo, como é possível observar na Figura 14. Observa-se, mais uma vez, que na restrição de 170 gP por dia há um comportamento diferente do lucro em relação às demais variações na restrição de qualidade da água.

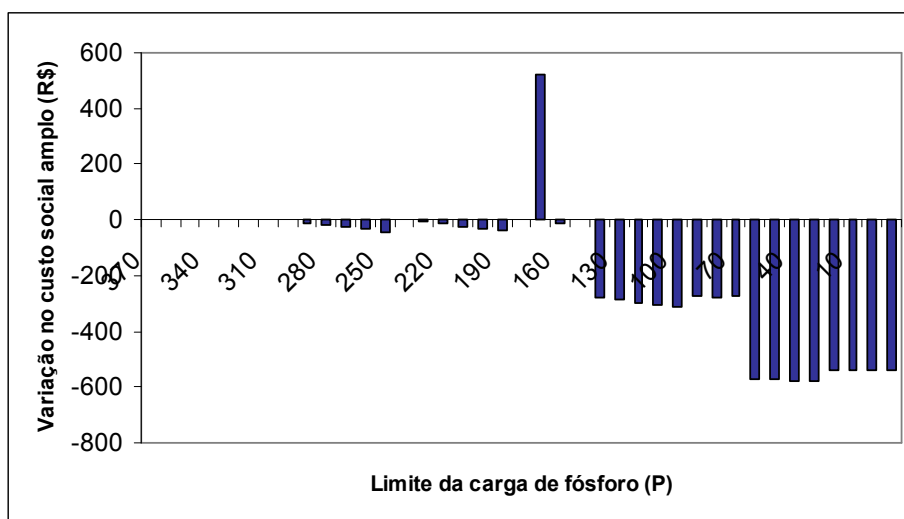


Figura 14. Variação no custo social amplo do modelo com alteração nos parâmetros em relação ao modelo inicial.

Fonte: Elaborada pela própria autora.

Os resultados mostram que mesmo diante de alterações expressivas nos custos da embarcação 1, os valores ótimos não se alteram significativamente, o que mostra a robustez do modelo, a pequenas variações nessas variáveis exógenas.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso da água para o lazer, como é o caso do desenvolvimento do turismo no lago de Xingó, é identificado como bem público por causa da sua não-rivalidade, o que, somado à externalidade resultante, emissão de carga orgânica, gera falhas de mercado, que impedem a obtenção da eficiência para este tipo de bem. Face aos múltiplos usos do reservatório e o possível conflito entre eles se mostra importante a sua gestão de forma a preservá-lo para permitir que os seus benefícios também sejam garantidos às gerações futuras.

Segundo Young (1996), nas nações em desenvolvimento as atividades de turismo e lazer ligadas à água estão se tornando mais importante para os seus próprios cidadãos, isso em virtude do desenvolvimento econômico e social que essas atividades propiciam.

Para se obter a função benefício líquido, do empresário que explora o lago como atrativo turístico, relacionada à carga de fósforo emitida pelo seu uso primeiramente foi maximizado o seu lucro (benefício líquido) diante da restrição de qualidade da água que poderá ser imposta no futuro como instrumento de implementação da gestão integrada dos recursos hídricos do lago de Xingó. Diversos limites de carga de fósforo foram impostos a essa restrição, resultando em pontos de lucro e carga emitida, utilizados em seguida para estimação de uma função benefício, que poderá ser usada para mensurar os custos sociais, custos de preservação da água, e apoiar políticas ambientais, definidas por Motta (2006) como ações governamentais que intervêm na esfera econômica para atingir objetivos que os agentes econômicos não conseguem obter atuando livremente.

No que se refere ao problema de otimização, maximização do benefício líquido do empresário, a restrição de qualidade da água se apresentou sempre ativa e a cada diminuição na carga de fósforo permitida o lucro também era reduzido, evidenciando a relação positiva entre essas variáveis na função benefício estimada. Caso no futuro seja imposto ao empresário um limite de carga de fósforo através da função apresentada poderá ser identificado qual será o seu retorno máximo.

Diante da dificuldade de obtenção dos dados sobre custos da empresa foi feita uma análise de sensibilidade dos resultados alterando-se o custo da embarcação mais utilizada, o que não alterou de forma significativa os lucros ótimos.

Um estudo semelhante pode ser feito para os múltiplos usos do lago de Xingó, de forma a mensurar benefícios e custos sociais associados a uma preocupação maior com a questão ambiental. A partir das referidas funções, pode-se construir um modelo econômico-hidrológico integrado que identifique as diversas cotas de lançamento de cargas por usuário, de forma a otimizar o benefício social, atendendo às restrições de qualidade, e, portanto, evitando a tragédia do uso comum.

REFERÊNCIAS

ANA – Agência Nacional de Águas. **O Turismo e o Lazer e sua Interface com o Setor de Recursos Hídricos**, Caderno de Recursos Hídricos, Ministério do Meio Ambiente, Brasília-DF, 2005.

ANA – Agência Nacional de Águas. **Monitoramento dos Reservatórios do Rio São Francisco**, Brasília-DF, 2006.

ANA/GEF/PNUMA/OEA. **Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco – PBHSF (2004-2013)**, Outubro 2004, Brasília-DF.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução nº 87**, de 22/03/2001.

BABEL, M. S.; GUPTA, A. D. & NAYAK, D. K. (2005). **A model for optimal allocation of water competing demands**. Water Resources Management, Volume19, 693 – 712.

BANDEIRA, A. P. F. **Custos Ambientais na Análise de Viabilidade Econômica de Projetos de Mineração: Aplicação em Área Carbonífera do Estado de Santa Catarina**, UFRGS, Porto Alegre, 2006. Dissertação.

BANDEIRA, A. P. F.; MENDES, C. A. B. **Metodologia de Otimização da Exploração Econômica de Carvão Mineral em Bacias Hidrográficas**, XXVI ENEGEP, Fortaleza, 2006.

BARBOSA, J. D.; MELO, R. O. L. (Colaboração Lício Valério Lima Vieira e Mary Nadja Lima Santos). **Cenários de Turismo, Comércio e Serviços dos municípios de Canindé de São Francisco e Poço Redondo - Sergipe**. Aracaju: UFS, 2000. Relatório Técnico – Científico.

BRANDÃO, J. L. B. **Modelo para Operação de Sistemas de Reservatórios com Usos Múltiplos**, USP, São Paulo, 2004. Tese de doutoramento.

BROOKE, A., KENDRIC, D., MEERAN, A., RAMAN, R. **GAMS: A User's Guide**. GAMS Development Corporation, 1998.

CAI, X.; MCKINNEY, D. C.; LASDON, L. S. **Solving large nonconvex water resources management models using generalized benders decomposition**. Operations Research, 2000.

CAP-NET, Capacity Building for Integrated Water Resources Managemen. **Tutorial on Basic Principles of Integrated Water Resources Management**, 2006.

CAP-NET, Capacity Building for Integrated Water Resources Managemen. **Economics in Sustainable Water Management**, 2008.

CONTO, A. M. **Alocação de Gás de Injeção em Poços de Petróleo sob Restrições de Precedência: Linearização por Partes e Programação Inteira**, UFSC, Florianópolis, 2006. Dissertação.

CRUZ, Rita de Cássia Ariza da (2006). **Planejamento governamental do turismo: convergências e contradições na produção do espaço**, En publicación: América Latina: cidade, campo e turismo. Amalia Inés Geraiges de Lemos, Mónica Arroyo, María Laura Silveira. CLACSO, Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales, São Paulo.

DANTAS NETO, J. (1994). **Modelos de Decisão para Otimização do Padrão de cultivo, em Áreas Irrigadas, Baseados nas Funções de Resposta das Culturas à Água**. Botucatu: UNESP. 125p. Tese de Doutorado.

ENVIROWISE, United Kingdom. **Environmental Good Practice Guide: Cost-Effective Water Saving Devices and Practices – GG67**, 1997. Disponível em www.envirowise.gov.uk Acesso em: 20/01/2009.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **“Perfil dos Municípios Brasileiros – Meio Ambiente 2002”**. Coordenação de População e Indicadores Sociais, Rio de Janeiro, 2005.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **“Cidades”**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em 19/05/2009.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **“Economia do Turismo: uma perspectiva macroeconômica 2000-2005”**. Coordenação de Contas Nacionais, Rio de Janeiro, 2008.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa Operacional na Tomada de Decisões: Modelagem em Excel**, 3ª edição, Rio de Janeiro, Elsevier, 2007.

LISBOA, E. F. A. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro, 2002. Apostila. Disponível em www.ericolisboa.eng.br. Acesso em 10/02/2009.

MAIA, G. M., ROMEIRO, A. R. e REYDON, B. P. **Valoração de recursos ambientais – metodologias e recomendações**. Texto para Discussão, IE/UNICAMP n. 116, março de 2004.

MORAES, M. M. G. A. **Otimização Estática ou Técnicas de Programação Matemática**. Apostila, UFPE.

MORAES, M. M. G. A. **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 de doutoramento, UFPE, Julho de 2003.

MORAES, Márcia M. G. Alcoforado de, ARCANJO, Karlos, ROCHA, Sérgio Parente Vieira da (2006). **Apoio a Decisão em Conflitos entre os Diversos Usos em Reservatórios e o Setor de Geração de Energia Utilizando Modelo Econômico-Hidrológico Integrado: Identificação da Operação Ótima do Complexo de Paulo Afonso e Xingó na Bacia do São Francisco**, Anais do VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Gravatá-PE.

MORAES, Márcia M. G. Alcoforado de, SAMPAIO, Yoni, CIRILO, José Almir (2006). **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**, Revista Economia, v. 7, n. 2, p. 331-364, maio-agosto 2006, Brasília-DF.

MORENO, S. L. R., FERREIRA, S. L. **Relatório de vistoria técnica nº 01/2002 – Expedição Américo Vespúcio – Rio São Francisco**. Ministério do Meio Ambiente, IBAMA, Fevereiro, 2002.

MOTTA, R. S.da. **Manual para valoração econômica de recursos ambientais**. IPEA/MMA/PNUD/CNPq, Rio de Janeiro, 1997.

MOTTA, R. S.da. **Economia ambiental**. Editora FGV, Rio de Janeiro, 2006.

ODUM, Eugene P. **Fundamentos de Ecologia**. 7ª Edição. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa. 2004.

OLIVEIRA, D. F. de A., TEIXEIRA, R. M. **Contribuição Socioeconômica do Setor Privado na Atividade Turística: o Caso de Canindé de São Francisco – SE.** Revista Turismo – Visão e Ação, vol. 7, n. 2, p. 291-310, maio/ago. 2005.

PAZ, V. P. S.; FRIZZONE, J. A.; BOTREL, T. A.; FOLEGATTI, M. V. **Otimização do uso da água em sistemas de irrigação por aspersão.** Rev. bras. eng. agríc. Ambient. [online]. 2002, v. 6, n. 3, pp. 404-408. ISSN 1415-4366.

PINDYCK, Robert S.; RUBINFELD, Daniel L. **Microeconomia.** 5ª. Edição. São Paulo, Prentice-Hall. 2002.

PIRES, J.S.R. e SANTOS, J.E (1995). **Bacias Hidrográficas - Integração entre meio ambiente e desenvolvimento,** Ciência Hoje, v. 19, n. 110, p. 40-45, Rio de Janeiro.

PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento). **Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil,** 2000. Disponível em: <<http://www.pnud.org.br/idh>>. Acesso em 20/05/2009.

RAMOS, Francisco de Sousa. **Qualidade do Meio-Ambiente e Falhas de Mercado,** Análise Econômica, ano 14, p. 39-51, Março/Setembro 1996.

RAO, S. S. **Optimization: Theory and Applications.** Wiley Eastern Limited, New Delhi, India, third ed., 1979.

ROSEGRANT, M.W.; RINGLER, C.; MCKINNEY, D.C.; CAI, X.; KELLER, A.; DONOSO, G. **Integrated Economic-Hydrologic Water Modeling at the basin scale: The Maipo River Basin,** Agricultural Economics, p.33-46, 2000.

SANTOS, V. S. **Um modelo de otimização multiobjetivo para análise de sistemas de recursos hídricos,** Campina Grande, 2007. Dissertação.

SOUZA, Poema Isis Andrade de, SILVEIRA NETO, Raul da Mota. **Turismo no Nordeste: Afinal, Qual é a Importância da Atividade para a Região?,** Anais do XIII Encontro Regional de Economia, Fortaleza-CE, 2008.

TAHA, H. A. Tradução Arlete Simille Marques, revisão técnica Rodrigo Arnaldo Scarpel. **Pesquisa Operacional,** 8ª edição, São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2008.

VILAS BOAS, C. L. **Modelo Multicritério de Apoio à Decisão Aplicado ao Uso Múltiplo de Reservatórios: Estudo da Barragem do Ribeirão João Leite**, UnB, Brasília, 2006. Dissertação.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**, 2ª edição, Belo Horizonte, UFMG, 1996.

YOUNG, Robert A. **Measuring the economic benefits for water investments and policies**, World Bank technical paper, nº 338, 1996. Disponível em: http://www-wds.worldbank.org/servlet/WDSCContentServer/WDSP/IB/1996/09/01/000009265_3961219095200/Rendered/INDEX/multi_page.txt. Acesso em: 17/10/2008.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Minimização dos erros ao quadrado para estimação da função benefício líquido

Sets

dados para diferentes limites da carga de fosforo imposta ao empresario

/

d1,d2,d3,d4,d5,d6,d7,d8,d9,d10,d11,d12,d13,d14,d15,d16,d17,d18,d19,d20,d21,d22,d23,d24,d25
,d26,d27,d28,d29,d30,d31,d32,d33,d34,d35,d36,d37,d38,d39/

;

parameter

fosforo(dados) limite de carga de fosforo P da restricao de qualidade da agua

/

d1	370,
d2	360,
d3	350,
d4	340,
d5	330,
d6	320,
d7	310,
d8	300,
d9	290,
d10	280,
d11	270,
d12	260,
d13	250,
d14	240,
d15	230,
d16	220,
d17	210,
d18	200,
d19	190,
d20	180,
d21	170,
d22	160,
d23	150,
d24	140,
d25	130,
d26	120,
d27	110,
d28	100,
d29	90,
d30	80,
d31	70,

d32	60,
d33	50,
d34	40,
d35	30,
d36	20,
d37	10,
d38	5,
d39	4

/

lucro(dados) lucro do empresario para cada limite da restricao de qualidade da agua -
 resultado a orimizacão da maximizacao do lucro

/

d1	21912.00,
d2	21912.00,
d3	21912.00,
d4	21912.00,
d5	21912.00,
d6	21912.00,
d7	21912.00,
d8	21834.56,
d9	21027.85,
d10	20221.14,
d11	19414.43,
d12	18607.72,
d13	17801.01,
d14	17284.49,
d15	16768.59,
d16	15961.88,
d17	15155.17,
d18	14348.46,
d19	13541.75,
d20	13009.37,
d21	12509.01,
d22	11699.06,
d23	10917.28,
d24	10110.57,
d25	9303.86,
d26	8497.15,
d27	7690.44,
d28	6883.73,
d29	6365.68,
d30	5849.53,
d31	5039.59,
d32	4229.65,
d33	3419.71,
d34	2609.77,

```

d35    1799.83,
d36    1271.71,
d37    496.85,
d38    109.43,
d39    31.94

```

```

/

```

```

solu_x
solu_y
solu_z
solu_w
solu_k

```

```

;

```

```

variable

```

```

    OBJfunc,x,y,z,w,k

```

```

;

```

```

Positive variables

```

```

    erro(dados)    diferenca entre os valores estimados e os dados observados

```

```

;

```

```

equation

```

```

    Eq_OBJfunc    equação para minimização dos erros ao quadrado

```

```

    Eq_erro(dados) funcao polinomial de grau 4

```

```

;

```

```

    Eq_erro(dados)..
(k*(power(fosforo(dados),4))+x*(power(fosforo(dados),3))+w*(power(fosforo(dados),2))+z*fosf
oro(dados) + y) - lucro(dados);

```

```

    Eq_OBJfunc.. OBJfunc =e= sum(dados, (power(erro(dados),2)));

```

```

MODEL Flucro /ALL /;

```

```

option nlp = CONOPT3;

```

```

option sysout = on;

```

```

solve Flucro using NLP minimizing OBJfunc;

```

```

solu_x= x.l; solu_y= y.l; solu_z= z.l; solu_w= w.l; solu_k= k.l;

```

```

option decimals = 8; display solu_x, solu_y, solu_z, solu_w, solu_k;

```

APÊNDICE B

Maximização do lucro (benefício líquido) do empresário

Sets

embarcacoes

/b1, b2, b3, b4/

viagem

/v1,v2/

;

parameter

custo_viagem(barco) custo por viagem - engloba combustivel - telefone - funcionarios -
guia - impostos trabalhistas - alimentacao e transporte dos funcionarios

/b1 630

b2 581

b3 467

b4 278

/

manutencao(barco) manutenção por viagem - engloba materiais de limpeza - funcionarios
da limpeza - servicos de manutencao das embarcacoes

/ b1 200

b2 173

b3 145

b4 120

/

capacidade(barco) quantidade maxima de pessoas que a embarcacao pode transportar por
viagem

/b1 250

b2 190

b3 130

b4 60

/

iss(barco) 5% do preco pago por cada visitante - valor iss se barco 100% pois a variavel
relacionada e a taxa de ocupacao do barco

/ b1 375

b2 285

b3 195
b4 90
/

qtd_pessoas capacidade maxima atual de pessoas que a empresa pode atender por dia

/880/

preco preco medio recebido pela empresa por cada visitante

/30/

taxa gP por visitantante por passeio - carga de fosforo

/0.342/

fosforo gP maxima permitida por dia - restricao da qualidade da agua

/300/

variable

OBJfunc lucro

;

positive variables

x(barco,viagem) taxa ocupacao por barco por viagem

poluicao gP gerada no dia

pessoas_atendidas quantidade de pessoas atendidas no dia

;

binary variables

y(barco,viagem) 1 se a embarcacao faz a viagem e 0 se nao;

equation

Eq_OBJfunc funcao lucro

Eq_r1 restricao de quantidade de viagens por dia

Eq_r2 restricao de quantidade de pessoas

Eq_r3(barco) restricao de quantidade de viagens por embarcacao por dia

Eq_r4 restricao de qualidade da agua

Eq_poluicao

Eq_pessoas_atendidas

;

x.l(barco,viagem)=1;

x.up(barco,viagem)=1;

```
x.lo(barco,viagem)=0;
```

```
*
Eq_OBJfunc..      OBJfunc      =e=      (preco*
sum(barco,sum(viagem,capacidade(barco)*x(barco,viagem)*y(barco,viagem)))) - sum(barco,
manutencao(barco)*sum(viagem,x(barco,viagem)))-
sum(barco,custo_viagem(barco)*sum(viagem,y(barco,viagem)));
Eq_OBJfunc..      OBJfunc      =e=      (preco*
sum(barco,sum(viagem,capacidade(barco)*x(barco,viagem)*y(barco,viagem)))) - sum(barco,
manutencao(barco)*sum(viagem,x(barco,viagem)))-
sum(barco,custo_viagem(barco)*sum(viagem,y(barco,viagem)))- sum(barco,
iss(barco)*sum(viagem,x(barco,viagem)));
Eq_r1.. sum(barco,sum(viagem, Y(barco,viagem))) =l= 4;
Eq_r2.. sum(barco,capacidade(barco)* sum(viagem,x(barco,viagem)*y(barco,viagem))) =l=
qtd_pessoas;
Eq_r3(barco)..sum(viagem,y(barco,viagem))=l=2;
Eq_r4.. sum(barco,sum(viagem,capacidade(barco)*x(barco,viagem)*y(barco,viagem))) *
taxa =l= fosforo;
Eq_poluicao..poluicao =e=
sum(barco,sum(viagem,capacidade(barco)*x(barco,viagem)*y(barco,viagem))) * taxa;
Eq_pessoas_atendidas..pessoas_atendidas
=e=sum(barco,sum(viagem,capacidade(barco)*x(barco,viagem)*y(barco,viagem)));
```

```
MODEL Cpira3 /ALL /;
*option nlp = CONOPT3;
option sysout = on;
solve Cpira3 using MINLP maximizing OBJfunc;
```

APÊNDICE C

Formas funcionais estimadas para a função benefício líquido e apresentadas na Figura 9 e descartadas.

Linear:
$$L_i = 314,06 + 71,735P_i$$

Polinomial de 2º grau:
$$L_i = -0,03742598P_i^2 + 85,03499657P_i - 307,601$$

Polinomial de 3º grau:
$$L_i = -0,00055980P_i^3 + 0,23947104P_i^2 + 49,05955921P_i + 678,7657$$