

ANÁLISE DE SOLUÇÕES DE CONFLITOS PELO USO DA ÁGUA NO SETOR
AGRÍCOLA ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE PROGRAMAÇÃO LINEAR

Augusto César Vieira Getirana

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

Prof. José Paulo Soares de Azevedo, Ph.D.

Prof. Paulo Canedo de Magalhães, Ph.D.

Prof. Theophilo Benedicto Ottoni Filho, Ph.D.

Prof^a Fernanda da Serra Costa, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
JUNHO DE 2005

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

GETIRANA, AUGUSTO CÉSAR VIEIRA

Análise de Soluções de Conflitos pelo
Uso da Água no Setor Agrícola Através de
Técnicas de Programação Linear [Rio de
Janeiro] 2005

vi, 140 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Civil, 2005)

Tese - Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Gestão de Recursos Hídricos
2. Irrigação
3. Campos dos Goytacazes
4. Otimização
5. Programação Linear

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE DE SOLUÇÕES DE CONFLITOS PELO USO DA ÁGUA NO SETOR AGRÍCOLA ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE PROGRAMAÇÃO LINEAR

Augusto César Vieira Getirana

Junho/2005

Orientadores: José Paulo Soares de Azevedo
Paulo Canedo de Magalhães

Programa: Engenharia Civil

Neste trabalho, realizou-se uma análise de propostas para a resolução de conflitos pelo uso da água entre usuários do setor agrícola. O estudo de caso trata do canal Coqueiros, integrante de uma complexa rede de irrigação e drenagem localizada na Baixada Campista, no Norte Fluminense, construída gradualmente pelo extinto DNOS ao longo de mais de trinta anos, entre as décadas de 40 e 70. Para isso, um modelo matemático em programação linear foi aplicado para obter resultados ótimos na utilização dos recursos hídricos disponíveis. Os cenários analisados foram propostos com base em previsões da demanda hídrica dos usuários do canal. Os resultados foram submetidos a uma análise econômica de forma que seja possível extrapolar a metodologia para a implementação de soluções efetivas em todo o restante da rede de canais.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ANALYSIS OF SOLUTIONS TO AGRICULTURAL WATER USE CONFLICTS
APPLYING LINEAR PROGRAMMING TECHNIQUES

Augusto César Vieira Getirana

June/2005

Advisors: José Paulo Soares de Azevedo

Paulo Canedo de Magalhães

Department: Civil Engineering

This work presents an analysis of proposals for solving water use conflicts among irrigators. The case study deals with Coqueiros canal, a component of a complex irrigation and drainage canal network situated at Baixada Campista, in Northeastern Rio de Janeiro, built between the 40's and 70's by DNOS, an extinct governmental department. A linear program model was applied to obtain optimal results in available water allocation. The analyzed scenarios were purposed based on water demand previsions of the irrigators. Results were submitted to an economical analysis and some conclusions have been drawn. That can be useful for the effective solutions.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é resultado de mais de um ano de desenvolvimento de idéias e busca por informações e recursos os quais a muitos me fazem dever agradecimentos pela ajuda e incentivo.

Aos meus pais, Valmir e Rosimar, em primeiro lugar, pelo apoio em minha escolha em seguir adiante com este mestrado.

À minha querida Leila, compreensível durante todos estes meses de minha ausência, dedicado ao desenvolvimento deste trabalho.

Em seguida, aos meus orientadores José Paulo Soares de Azevedo e Paulo Canedo de Magalhães pelas boas idéias durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Paulo Carneiro, companheiro de laboratório, pela apresentação dos conflitos pelo uso dos recursos hídricos existentes na Baixada Campista e as conversas construtivas com relação ao tema.

Ao engenheiro Oscar Navia, pelas diversas informações, conversas e explicações no que concerne aos problemas agronômicos e hidráulicos da região estudada, sem os quais seria impossível desenvolver o assunto estudado.

Aos professores e funcionários da UFRRJ/Campus Leonel Miranda e à equipe da TECNORTE pelas preciosas informações concedidas.

Aos amigos e companheiros de laboratório Elder e Paulo Marcelo pelas inúmeras conversas e discussões construtivas durante nossa convivência.

À estagiária Camilla Silva Motta dos Santos pela sua colaboração nos trabalhos de georreferenciamento.

Ao Professor Adilson Xavier e seu aluno de doutorado Elivelton Bueno do Programa de Engenharia de Sistemas da COPPE pela ajuda com as técnicas computacionais utilizadas neste trabalho.

Aos alunos, funcionários e professores da Área de Recursos Hídricos da COPPE.

Aos professores do Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente da Escola Politécnica pelos conhecimentos recebidos e pela agradável convivência.

Ao professor Theophilo Benedicto Ottoni Filho pelos conhecimentos e informações fornecidos ao longo dos anos não somente na graduação, mas também no desenvolvimento desta pesquisa.

A CAPES pela bolsa concedida.

E finalmente, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a finalização desta obra.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	3
1.1. Caracterização da região	4
1.2. A metodologia.....	5
1.3. Objetivos.....	6
1.4. Estruturação dos capítulos	8
2. A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL..	10
2.1. Breve histórico	10
2.2. Delimitações geográficas da bacia	12
2.3. Demanda de água	13
2.4. Balanço hídrico (oferta x demanda).....	15
2.5. Conflitos pelo uso da água	15
2.6. Sistema de gestão de recursos hídricos	18
3. O USO DA ÁGUA NA AGRICULTURA.....	19
3.1. A agricultura irrigada	19
3.2. Definição de alguns conceitos	24
4. MODELOS MATEMÁTICOS NA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS	37
4.1. A pesquisa operacional e a análise de sistemas de recursos hídricos	37
4.2. Métodos comumente empregados.....	38
4.3. Otimização de sistemas de irrigação.....	44
5. METODOLOGIA PROPOSTA	48
5.1. Introdução aos problemas de programação linear em recursos hídricos	50

5.2. <i>Representação matemática dos aspectos físicos, agronômicos e financeiros considerados</i>	57
5.3. <i>Modelo proposto</i>	66
6. ESTUDO DE CASO.....	71
6.1. O passado e a situação atual	71
6.2. Caracterização da região	76
6.3. Aplicação da metodologia e Construção de Cenários	97
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES	101
7.2. <i>Alocação de recursos hídricos por otimização da renda líquida global</i>	104
7.3. <i>Mercado de água</i>	107
7.4. <i>Análise de impactos causados pela variação do preço da água após as intervenções de regularização do canal</i>	110
8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	115
8.1. <i>Sobre o modelo</i>	116
8.2. <i>Sobre os resultados</i>	117
8.3. <i>Recomendações</i>	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
ANEXOS	134
<i>Tabelas</i>	134
<i>Figuras</i>	140

1. INTRODUÇÃO

A disputa por um bem ocorre a partir do momento em que este passa a ser escasso ou insuficiente para o suprimento da necessidade de todos. Isto se aplica a qualquer recurso disponível em nosso planeta, particularmente à água.

Apesar de o Brasil estar em uma situação privilegiada com relação à disponibilidade hídrica, cerca de 70% da água doce do País encontra-se na região Amazônica, enquanto os outros 30% são distribuídos para 95% da população que habitam o resto do território nacional (SETTI *et al.*, 2001). Tal situação favorece o surgimento de problemas de escassez hídrica causados, fundamentalmente, pela combinação de um crescimento populacional exagerado em grandes centros urbanos e a degradação da qualidade das águas, conseqüente dos desordenados processos de urbanização, industrialização e expansão agrícola.

No atual cenário brasileiro, desde a sanção da Lei 9.433, de 08 de janeiro de 1997, instituindo a Política Nacional de Recursos Hídricos e estabelecendo o Sistema Nacional de Recursos Hídricos, melhoras significativas com relação à gestão dos recursos hídricos têm sido apresentadas, não somente na esfera acadêmica especializada, mas também em discussões no âmbito governamental e na imprensa. Entretanto, ainda há muito a ser feito.

Em suas dimensões continentais, encontram-se no Brasil casos distintos de problemas de escassez de água, a qual é gerada pela crescente demanda pelo recurso. Entretanto, é nas regiões Nordeste e Sudeste onde eles se evidenciam mais claramente. Muitos dos casos dos conflitos em torno da água estão relacionados ao setor agrícola, responsável pelo consumo de significativa fatia do total da água usada pelo homem.

No entanto, cada caso deve ser tratado individualmente, pois, na maioria das vezes, diferentes peculiaridades relacionadas ao uso dos recursos hídricos, política, economia e sociedade podem ser encontradas, impossibilitando a aplicação das mesmas soluções em diferentes situações.

Surge, desta forma, a necessidade de que, para cada conflito, diferentes propostas para a gestão dos recursos hídricos sejam desenvolvidas, de maneira que, ao final, atinja-se um consenso através de negociações.

Propõe-se, neste trabalho, a aplicação de técnicas de otimização para o apoio na tomada de decisões em questões de conflito pelo uso da água na irrigação, a partir de cenários pré-estabelecidos cada qual com diferentes considerações levadas em relação ao caso analisado.

1.1. Caracterização da região

O estudo de caso proposto para a aplicação da metodologia é o canal Coqueiros. O corpo hídrico se localiza na Baixada Campista, na região Norte Fluminense, e integra uma rede de canais concebidos entre as décadas de 40 e 70 pelo extinto DNOS como medida definitiva para sanar os focos frequentes de doenças, drenando inúmeros lagos, lagoas e brejos que, um dia, compuseram o cenário da região.

O rio Paraíba do Sul atravessa a baixada com uma vazão disponível na foz da bacia, com 95% de permanência no tempo, de 302 m³/s. Apesar de haver água suficiente proveniente do rio para abastecer a demanda na região, os canais, que ficaram com suas estruturas comprometidas após o fim do órgão federal, em 1989, não têm capacidade de aduzir vazões suficientes que satisfaçam a todos os usos, pois em determinados trechos há a presença de, por vezes, depressões no relevo, onde se encontravam antigas lagoas, e trechos assoreados, reduzindo a área da seção do canal, prejudicando consideravelmente sua condutividade hidráulica. Além disso, as aduções na maioria das comportas de captação estão sujeitas a variações do nível de água do rio, de forma que no período de estiagem, a água pode não atingir as quotas mínimas necessárias para que a captação seja realizada.

Nos períodos de chuva (novembro a janeiro), o manejo ineficiente das comportas de controle de vazão dos canais associado ao alto índice pluviométrico causa a elevação do lençol freático, alagando grandes extensões de áreas produtivas, gerando perdas no rendimento das culturas. O mesmo acontece quando pela mesma ineficiência de controle das comportas, volumes excessivos de água são liberados para o abastecimento de usuários em determinados trechos do canal, prejudicando outros a montante com

alagamentos de terrenos que estejam situados em depressões ou próximos a trechos assoreados dos canais. Tais situações geram conflitos entre usuários, ora pela escassez de água, ora pelo seu excesso. Nos períodos de seca, quando o nível d'água no canal fica consideravelmente reduzido, alguns irrigantes constroem pequenas barragens de forma que o nível se eleve em seus pontos de captação prejudicando o abastecimento de outros irrigantes a jusante com a redução da disponibilidade de água.

As dificuldades causadas pelos problemas dos canais são de natureza hidráulica, devido às suas baixíssimas declividades e a outros problemas supracitados, as quais poderiam ser resolvidas através de intervenções estruturais como obras permanentes e manutenções constantes (dragagens e revestimento de alguns trechos dos leitos), bem como não-estruturais, como negociações e a conscientização de proprietários que se beneficiam dos recursos hídricos dos canais.

1.2. A metodologia

Defrontando-se com o quadro apresentado, surge a proposta de se desenvolver um estudo baseado em um modelo matemático que sirva de ferramenta na análise de propostas para a solução de conflitos entre usuários de recursos hídricos do setor agrícola. Para tal, devido à ausência de dados existente na região adotada para o estudo, algumas etapas para a obtenção de informações e construção de cenários para a realização da análise foram necessárias, de forma que, ao fim, o modelo pudesse ser utilizado. Neste sentido, duas metodologias são propostas: uma para a determinação aproximada de pontos potenciais de conflito e outra para a determinação das demandas de água e sua distribuição espacial na unidade hidrológica. A primeira faz uso de levantamentos batimétricos de seções transversais do canal e a consideração de algumas características das plantas propostas para o cultivo. A segunda determina usos da água na unidade hidrológica a partir de cartas de classes de aptidão de solos para a irrigação e a delimitação de micro-bacias de canais secundários e terciários.

Em seguida, passa-se para a proposta de cenários. Estes, em um total de doze, foram concebidos de forma a representar três propostas de intervenções estruturais e não-estruturais para a resolução do conflito entre irrigantes, assim como algumas tendências que práticas agrícolas podem tomar em função de diferentes projetos existentes na

região para incentivo à irrigação, além de definições de regimes de distribuição de água entre usuários, ora visando a equidade na alocação de recursos hídricos, ora com objetivo de maximizar a renda líquida gerada em todo o sistema.

O modelo aplicado após as etapas descritas é baseado, fundamentalmente, em técnicas de otimização. Existe um grande número de modelos que poderiam descrever um sistema de irrigação, entretanto, o objetivo foi escolher aquele que seria simples o suficiente para se lidar computacionalmente e complexo o bastante para representar adequadamente as interações dos diferentes atores envolvidos no sistema. Após muita reflexão sobre o problema, optou-se pela aplicação de um modelo de *Programação Linear*. A escolha de tal técnica foi baseada em sua estrutura simplificada e de fácil aplicação. O modelo corresponde a um modelo estacionário determinístico, ou seja, assume-se que os dados hidrológicos da unidade de gestão representada pelo sistema são completamente determinados e invariáveis ao longo dos anos. Portanto, tanto os dados de precipitação quanto os relacionados às demandas hídricas das culturas e a disponibilidade de água na cabeceira do canal não variam entre um mesmo mês de anos distintos, somente ao longo dos doze meses do ano. Dessa forma, o modelo define a operação anual do sistema de adução de água subdividido em doze intervalos de um mês cada. Contudo, o retorno econômico será representado pela produção agrícola de seis anos, pois algumas culturas têm suas vidas úteis nesta ordem de grandeza.

A partir deste modelo, análises são realizadas de forma a determinar as potencialidades produtivas da região estabelecer maneiras de uso dos recursos hídricos disponíveis objetivando a maximização do rendimento hídrico.

1.3. Objetivos

Propõe-se com esta metodologia o emprego de modelos de otimização por gestores de recursos hídricos atentos aos altos consumos de água do setor agrícola como ferramenta para a obtenção de propostas viáveis para a negociação de soluções para conflitos pelo uso da água e na determinação de vazões ótimas requeridas na agricultura. Desta forma, serão obtidas estimativas otimizadas dos benefícios econômicos do uso dos recursos hídricos do sistema de adução de água para a irrigação considerando diferentes cenários. Enquanto busca-se a maximização da receita líquida gerada no perímetro abastecido

pelo sistema, com a determinação de áreas ocupadas por culturas previamente selecionadas, conforme as tendências regionais, tem-se em vista, concomitantemente, uma solução que satisfaça os requerimentos relacionados aos limites físicos do sistema e uma estimativa da vazão de outorga apropriada para cada usuário dos recursos hídricos.

A otimização de diferentes cenários possibilita determinar a sensibilidade de possíveis alterações nas práticas agrícolas, viabilizando a análise de quais modificações devem ser realizadas de forma que se tornem sustentáveis as intervenções no canal estudado, necessárias para que haja o aumento da disponibilidade hídrica para usuários prejudicados com a falta do recurso.

Expõe-se também, ao final deste estudo, a utilização deste mesmo modelo matemático como uma eficiente técnica para a determinação de vazões de outorga no setor agrícola em situações de escassez de água.

Como introdução a uma discussão acadêmica, propõe-se a distribuição dos recursos hídricos de forma a atingir o maior retorno econômico por unidade volumétrica de água no sistema, efetivando compensações financeiras aos usuários que deixariam de receber água, adotando-se o chamado “Mercado de Águas”.

Para a realização da análise do sistema, doze cenários foram propostos para implementação do modelo, de forma que fossem satisfeitas algumas restrições preponderantes, além de serem fixadas suposições feitas. Em todos eles, considerou-se que a prática da irrigação passou a prevalecer na região, acarretando em demandas de grandes vazões de água dos canais. Os cenários podem ser subdivididos, basicamente, em dois grupos, os quais se distinguem pelo regime de alocação de água entre irrigantes. Em cada grupo, determinadas considerações foram adotadas com relação às formas de intervenções impostas no sistema de adução. São eles:

- dos seis primeiros cenários, quatro foram caracterizados pela carência de intervenções estruturais no canal estudado. Dois se caracterizam pela imposição de restrições de vazão em alguns trechos do canal, o que limitará a produção de alguns irrigantes. Os outros dois propõem a adução de toda a vazão disponível na cabeceira do canal, causando perdas de áreas produtivas de alguns usuários. A diferença entre os cenários de cada par é a predominância, em um, da monocultura da cana e no outro, considerou-

se uma abertura do mercado da fruticultura, havendo a prática da policultura na região. Em todos eles, admitiu-se a alocação da água captada por quotas;

- em outros dois cenários, foi considerada a realização das intervenções estruturais citadas anteriormente, necessárias para o aumento da condutividade hidráulica do canal. Os mesmos regimes de produção foram mantidos para cada um deles (monocultura e policultura). Também se admitiu a alocação por quotas;

- finalmente, outros seis cenários foram modelados, com as mesmas características dos seis primeiros, com exceção da forma como a água é alocada. Desta vez, não há quotas individuais, mas toda a água disponível nos trechos dos canais estará disponível a todos os usuários. Entretanto, não serão consideradas quotas fixas de água para os usos. O fator que regerá a alocação de água será a produtividade de cada usuário, onde o que resultar em maior retorno econômico por unidade volumétrica de água, a receberá em maior quantidade, tendo a prioridade na captação da mesma.

1.4. Estruturação dos capítulos

Este trabalho foi estruturado de forma a aclarar o tema principal abordado e tornar sua compreensão acessível a todos os interessados pelo assunto. Para isso, além desta breve introdução, esta obra é dividida em outros sete capítulos, de forma que cada assunto específico seja abordado separadamente. A seguir, segue a descrição dos capítulos integrantes do estudo:

O capítulo dois trata do quadro atual da gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, apresentando as principais diretrizes de gestão, características da bacia e alguns cenários conflitantes pelo uso da água.

Os capítulos três e quatro são dedicados a uma revisão bibliográfica dos assuntos que tangem, respectivamente, a agricultura irrigada e a análise de sistemas de recursos hídricos através de modelos de otimização e simulação. O primeiro ressalta a situação atual do uso da água na agricultura no Brasil e, em seguida, trata dos principais conceitos relacionados ao sistema água-solo-planta relevantes para este trabalho. O segundo, dividido em duas partes, aborda, primeiramente, os principais métodos de simulação e otimização aplicados na análise de sistemas de recursos hídricos e, a seguir,

apresenta aplicações de modelos de otimização na agricultura irrigada, buscando-se a maximização do rendimento da produção através da distribuição de água.

O capítulo cinco descreve a metodologia proposta, partindo-se, primeiramente, dos fundamentos da Programação Linear, sendo apresentando um exemplo simplificado da aplicação da técnica e, em seguida, a descrição das representações matemáticas dos aspectos físicos, agronômicos e financeiros considerados no trabalho.

O capítulo seis apresenta o estudo de caso na bacia do rio Paraíba do Sul, passando antes pela descrição geral da região específica e, em seguida, a aplicação da metodologia proposta.

No capítulo sete, é feita a análise dos resultados obtidos com a aplicação da metodologia e também são realizadas algumas discussões pertinentes.

Finalmente, no Capítulo oito, são apresentadas as conclusões e recomendações. Em seguida, são listadas as referências bibliográficas utilizadas na fundamentação teórica do estudo e, após, os anexos citados ao longo texto.

2. A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL

Após a breve introdução apresentada no primeiro capítulo, este é dedicado à apresentação dos principais assuntos que tangem a gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. As informações apresentadas a seguir são transcrições de textos de teses e relatórios¹ gerados pelo Laboratório de Hidrologia e Estudos de Meio Ambiente da COPPE/UFRJ e textos disponíveis na página eletrônica da Agência Nacional de Águas (ANA, 2004).

A importância política e econômica da região inserida na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul dentro do contexto nacional, tem mobilizado tanto o Governo Federal quanto a sociedade, organizações não-governamentais e setores econômicos usuários de suas águas para a recuperação desta bacia que, em decorrência da poluição causada pelo descaso ou mesmo pela falta de orientação com relação ao seu uso impróprio e descontrolado nas últimas décadas, tem registrado acelerado processo de degradação, apresentando altos índices de contaminação dos recursos hídricos.

2.1. Breve histórico

Várias foram as tentativas de implementação da gestão integrada na bacia do Paraíba do Sul. A partir do final da década de 1930, desde as iniciativas paulistas de aproveitamento integrado dos recursos hídricos (Serviço de Melhoramentos do Vale do Paraíba e, em seguida, Serviço do Vale do Paraíba), de inspiração americana do *Tennessee Valley Authority* (TVA), até a constituição do CEEIVAP (Comitê Executivo de Estudos Integrados da Bacia do Paraíba do Sul), em 1979, a última no âmbito do Comitê Especial de Estudos Integrados de Bacias Hidrográficas (CEEIBH), uma iniciativa conjunta do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) e Secretaria Nacional de Meio Ambiente (SEMA).

¹ THOMAS (2002) e relatórios gerados no Projeto Gestão dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (LABHID, 2001; 2002a; 2002b).

O CEEIVAP foi responsável pela execução de vários estudos, os Projetos Gerenciais, que propunham a implementação de ações multi-setoriais destinadas à recuperação e ao gerenciamento da bacia. Entretanto, sua função era meramente consultiva e tinha a finalidade de sugerir às autoridades federais e estaduais medidas para a efetiva recuperação e proteção dos recursos naturais, objetivando harmonizar o desenvolvimento econômico na bacia. Apesar da importante contribuição do Comitê na identificação e proposição de ações para a recuperação da bacia, foi insuficiente o apoio governamental para a implementação das medidas propostas.

Após a criação da Cooperação França-Brasil para a bacia do rio Paraíba do Sul, em 1992, um amplo trabalho de atualização, aquisição e sistematização de dados relacionados aos recursos hídricos da bacia, sobretudo relativos à qualidade da água e atividade industrial, foi realizado.

No ano de 1996, o governo Federal celebrou convênios com os Estados do Rio de Janeiro, Minas Gerais e São Paulo, visando à elaboração de programas de investimentos para a recuperação ambiental da bacia. Dentre eles se destacam o Projeto de Qualidade das Águas e Controle da Poluição Hídrica (PQA) e o Projeto Preparatório. Este último, executado pelo Laboratório de Hidrologia da COPPE/UFRJ, teve como objetivo principal elaborar o Projeto Inicial, visando a implantação da gestão dos recursos hídricos na bacia, mediante a execução de parte das intervenções propostas no PQA.

Ainda em 1996, no dia 22 de março, o Presidente da República instituiu, pelo Decreto nº 1.842, o novo Comitê para Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (CEIVAP), instalado no dia 18 de dezembro do ano seguinte.

Com a implementação da Lei 9.433/97 e a instalação da ANA, a Agência Nacional de Águas, em 2000, o processo de implementação de gestão dos recursos hídricos na bacia adquiriu nova dinâmica, com destaque para a implementação da cobrança dos recursos hídricos, aprovada pelo CEIVAP, a criação da Agência de Bacia e o lançamento do programa Nacional de Despoluição de Bacias Hidrográficas.

Dentre seus principais afluentes, vale destacar os rios Jaguari, Paraíbuna, Pirapetinga, Pomba e Muriaé, situados na margem esquerda, e os rios Bananal, Pirai, Piabanha e Dois Rios, na margem esquerda.

Por apresentar características físicas distintas ao longo de seu percurso, o rio Paraíba do Sul pode ser dividido em quatro trechos:

Curso superior, o qual estende-se desde a nascente até a cidade de Guararema (SP), com uma extensão de 317km;

Curso médio superior, localizado entre Guararema e Cachoeira Paulista (SP), numa extensão de 208km;

Curso médio inferior, partindo de Cachoeira Paulista e chegando em São Fidélis (RJ), com 480km e;

Curso inferior, que se inicia em São Fidélis e termina em sua foz, atravessando a Baixada Campista, em uma extensa planície litorânea, com um comprimento de 95km.

2.3. Demanda de água

Os principais usos da água hoje verificados no rio Paraíba do Sul referem-se ao abastecimento de água, à diluição de despejos domésticos, industriais e agrícolas, à irrigação e à geração de energia elétrica. Entretanto, o uso dos recursos hídricos mais significativo da bacia, em termos de quantidade, é a transposição para a bacia do rio Guandu e em termos de qualidade, o lançamento de esgotos domésticos. A Tabela 2.1 apresenta estimativas das vazões utilizadas por cada setor usuário na bacia, enquanto a Tabela 2.2 apresenta os 10 maiores usuários de água da bacia para captação, englobando apenas os setores de saneamento, uso industrial e a transposição².

² Para os setores de saneamento e industrial foi possível desagregar a demanda por usuário, porém para o setor agrícola isto não foi possível devido à insuficiência de dados.

Tabela 2.1 - Demandas hídricas na bacia do rio Paraíba do Sul, segundo estimativas do Plano de Recursos Hídricos (LABHID, 2002a).

Usuários	Qcap (m ³ /s)	Qcon (m ³ /s)	DBOrem (t/dia) ³
Saneamento	18,62	3,68	240
Uso Industrial	13,65	6,19	40
Uso agrícola e pecuário	53,18	32,01	0
Transposição	até 180 ⁴	até 180	0

Fonte: Sistema de Informações de Recursos Hídricos da bacia do rio Paraíba do Sul/COPPE-UFRJ.

Ao analisarmos a Tabela 2.1, é fácil constatar que o setor agropecuário ocupa a posição de segundo maior consumidor dos recursos hídricos da bacia. No entanto, a atual política de gestão da bacia ainda não contempla a cobrança pelo uso da água no setor, estando o processo ainda na fase de cadastramento de usuários e concessão de outorgas de direito de uso de recursos hídricos.

Tabela 2.2 - Dez maiores usuários de captação de água da bacia do rio Paraíba do Sul.

N	Usuário	Sector	Vazão captada (m ³ /s)
1	Sistema Light	Transposição	Até 180
2	Companhia Siderúrgica Nacional	Uso Industrial	8,7
3	Usina Santa Cruz S.A.	Uso Industrial	1,39
4	Juiz de Fora	Saneamento	1,26
5	São José dos Campos	Saneamento	1,11
6	Votorantim Celulose e Papel S.A.	Uso Industrial	0,86
7	Campos dos Goytacazes	Saneamento	0,75
8	Volta Redonda	Saneamento	0,66
9	Taubaté	Saneamento	0,52
10	Barra Mansa	Saneamento	0,52

Fonte: Sistema de Informações de Recursos Hídricos da bacia do rio Paraíba do Sul/COPPE-UFRJ.

Além disso, o cadastro de irrigantes na bacia ainda é precário. Isso se deve à carência de informação que ainda assola a grande maioria das propriedades rurais onde prevalece, muitas das vezes, a agricultura familiar. Essa dificuldade em registrar os pequenos usos de água no setor agrícola por irrigante faz com que, apesar de ser o setor que mais usa

³ Observa-se que, atualmente, o único parâmetro de qualidade da água utilizado é o de DBO, igualmente presente na equação da cobrança pelo uso da água adotado pelo CEIVAP. Entretanto, no caso do setor agrícola, o índice de salinidade da água é fator primordial na determinação de sua qualidade, definindo a viabilidade de sua utilização e a quantidade aplicada nas culturas.

⁴ A vazão captada pela transposição pode ir até 180 m³/s, sendo 160m³/s no rio Paraíba do Sul e 20 m³/s no rio Pirai. Determina-se o valor exato da captação no rio Paraíba do Sul em função da restrição a jusante do ponto de captação, que é de 90 m³/s em condições hidrológicas normais e de 71 m³/s em condições críticas.

os recursos hídricos da bacia, não apresenta nenhum usuário entre os mais significativos na Tabela 2.2

Desta maneira, faz-se necessário montar “*um amplo cadastro de usos da água na agropecuária e permitir a inclusão no sistema de gestão da bacia do maior número possível de usuários, atribuindo-se o uso da água na bacia hidrográfica da forma o mais ampla possível*” (ANA, 2004).

2.4. Balanço hídrico (oferta x demanda)

De acordo com o Plano de Recursos Hídricos da bacia do rio Paraíba do Sul, com relação ao uso quantitativo, não há, a princípio, problemas de escassez, pois a vazão disponível na foz da bacia com 95% de permanência no tempo, 302 m³/s (LABHID, 2002a), supera o total das vazões consumidas, 222 m³/s. Entretanto, esta comparação é bastante simplista e não garante que não haja escassez em pontos isolados da bacia, o que, de fato, ocorre e será apresentado na seção a seguir.

2.5. Conflitos pelo uso da água

Nem sempre, a competição pelos recursos hídricos é, de fato, uma situação de conflito entre usuários de água. A ocorrência de comprometimento de um determinado uso do recurso hídrico por um outro uso distinto não implica, necessariamente, conflito entre usuários. Tais situações podem caracterizar-se pelo fato de que uma forma de uso pode comprometer outra sem que haja disputa explícita entre os componentes beneficiários. Estas são definidas como conflitos potenciais e existem em grande número nas bacias em decorrência do uso desordenado dos recursos hídricos. Entretanto, devido ao construto social existente entre atores, muitos dos conflitos potenciais não alcançarão situações de conflito real. Suas conseqüências dependerão de uma série de fatores, dentre os quais vale destaque os diferentes níveis de “saída e voz” - definidos por HIRSCHMAN (1996, *apud* LABHID, 2002a). Os fatores “saída” e “voz” correspondem, respectivamente, a simples saída ou mudança de ambiente para outro que venha a trazer mais benefícios que o primeiro ou, por outro lado, a permanência de ambos os atores componentes do ato conflituoso servindo-se da “voz” no ato de

reclamar ou de organizar-se para reclamar ou protestar, com a intenção de obter diretamente a recuperação da qualidade que foi prejudicada.

Além de definir o tipo de relação entre usuários competitivos, é também necessário determinar em que esfera ela ocorre, seja pelo uso da água ou de outras situações de comprometimento ambiental, já que uma situação de impacto ambiental *“pode ser solucionada sem que haja a necessidade de acordo entre as partes envolvidas ou que uma das partes tenha que abrir mão de alguma vantagem comparativa”* (LABHID, 2002a).

No entanto, podem ocorrer casos em que os conflitos pelo uso do recurso hídrico não se mostrem de maneira explícita, não apresentando uma dimensão social, ou seja, quando o conflito está restrito a um número reduzido de atores, havendo dificuldades em identificá-los e caracterizá-los. No caso dos conflitos em torno da água em Campos dos Goytacazes, tema principal deste trabalho, CARNEIRO (2004) desempenhou minuciosa investigação por fatos e atores, realizando uma busca de informações desde relatos históricos até entrevistas com grandes latifundiários, presidentes de sindicatos, representantes de órgãos públicos e pescadores locais.

A solução de conflitos requer, de modo geral, a organização da gestão do sistema hídrico sob um enfoque coletivo, inibindo soluções individuais que impliquem danos a outros usuários.

De maneira que haja o uso ordenado das reservas de água doce do País, estabelecendo mecanismos de gerenciamento da oferta e demanda e reduzindo as chances do surgimento de conflitos potenciais ou a conversão destes para conflitos reais, foram asseguradas pela Política Nacional de Recursos Hídricos três premissas básicas: descentralização do sistema de gestão; arbitragem em situações de conflito de interesses decorrentes de concorrência entre usos múltiplos na bacia hidrográfica e; redução da tensão entre a quantidade e degradação da qualidade da água.

A Política Nacional de Recursos Hídricos apresenta mudanças quanto à gestão de um bem público (a água, no caso), das quais pode-se destacar a descentralização da gestão, que deixa de estar ligada exclusivamente ao poder público para uma responsabilidade mista, compartilhada entre representantes (atores) de instituições privadas na nova jurisdição política constituída pelos comitês de bacia hidrográfica.

No entanto, de acordo com LABHID (2002a), *“a simples existência de um comitê não implica solução às situações de conflito nem assegura que haja melhor equidade na utilização de bens públicos”*. Ainda na mesma referência, é destacado que, para que ocorra a anulação de situações de conflito e haja a garantia da gestão compartilhada do bem comum, torna-se indispensável o desenvolvimento de mecanismos permanentes de participação e negociação no âmbito dos comitês entre setores usuários. Aliadas a estas estruturas institucionais, técnicas computacionais de suporte à decisão são de grande importância e devem ser aplicadas a tais problemas de forma que facilite a obtenção de soluções de consenso de todos os envolvidos.

Na bacia do rio Paraíba do Sul, os conflitos pelo uso da água ocorrem, basicamente, em decorrência de duas razões: por formas de uso que comprometem a disponibilidade hídrica para outros usos/usuários e formas de uso que degradam a qualidade da água, comprometendo outros usos e a saúde pública. Na verdade, essa divisão é, principalmente de caráter metodológico, tendo em vista que essas duas categorias de conflito dificilmente serão encontradas isoladamente nos casos concretos que surgirão. Entretanto, uma terceira razão não tão comumente abordada, com ocorrência em algumas localidades brasileiras, abrangendo um número reduzido de usos e sem muita expressão econômica, pode incrementar esta lista de fatores, correspondendo ao excesso de água em localidades agrícolas, comuns em propriedades de vazanteiros estabelecidos nas margens de reservatórios controlados pelo homem. Tais conflitos, causados por eventuais excessos de água são comuns nos canais de Campos dos Goytacazes, quando o controle das comportas não é realizado de maneira adequada nos períodos de chuva, podendo causar grandes prejuízos aos proprietários rurais que cercam os corpos hídricos.

Apesar de a bacia do rio Paraíba do Sul ser uma das que possui maior quantidade de dados e informações disponíveis no País, os conflitos presentes em torno de suas águas ainda são pouco conhecidos, muitas vezes camuflados pelos próprios usuários na intenção de não chamar a atenção do poder público. Entretanto, outros exemplos explícitos de conflito podem ser citados: (1) conflitos decorrentes da transposição das vazões do rio Paraíba do Sul para o Sistema Light (bacias dos rios Paraíba do Sul e Pirai); (2) conflitos decorrentes da contaminação de mananciais de abastecimento por defensivos agrícolas (ribeirão Guaratinguetá); (3) conflitos entre irrigantes devido à

ausência de gerenciamento dos recursos hídricos (bacias dos rios Piagui e Pirapitingui) e; (4) conflito entre irrigantes e outros usuários da água (ribeirão da Serragem).

2.6. Sistema de gestão de recursos hídricos

O Sistema de Gestão de Recursos Hídricos da bacia do rio Paraíba do Sul é extremamente complexo e compreende uma série de órgãos gestores (São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro) e organismos de bacia e sub-bacia⁵. Dentro desse sistema, vale destacar o Comitê para Integração da Bacia do rio Paraíba do Sul (CEIVAP) e sua Agência de Bacia.

Com relação aos instrumentos de gestão, alguns já foram definidos como o plano de recursos hídricos, o enquadramento e a cobrança, enquanto a outorga está em fase de implementação com o primeiro lote já concedido, além do sistema de informações que está em desenvolvimento e deverá, possivelmente, estar concluído até o final de 2005.

⁵ Para conhecer esse sistema em detalhes, ver o Plano de Recursos Hídricos da bacia do rio Paraíba do Sul (LABHID, 2002a).

3. O USO DA ÁGUA NA AGRICULTURA

A água na agricultura, em seu estado fundamental, provém, basicamente, da precipitação que traz umidade ao solo para as plantas e abastece os lençóis freáticos. Entretanto, quando a necessidade hídrica das plantas é superior ao volume de água disponibilizado pela chuva, podem ocorrer quedas no rendimento das plantações causadas pelo déficit hídrico e, até mesmo, perdas de safra. Para reduzir, ou mesmo anular o risco de eventuais perdas econômicas causadas pelas incertezas hidrológicas, é necessário que a demanda hídrica das plantas seja suprida por outras fontes de água que não a chuva.

Este capítulo é reservado para retratar a agricultura irrigada no Brasil, apresentando algumas comparações com tendências mundiais, além de apresentar algumas definições relevantes para o bom entendimento do assunto abordado no decorrer deste trabalho. No final da primeira parte do capítulo, será possível observar a importância do gerenciamento dos recursos hídricos neste setor e do planejamento racional na distribuição de água em sistemas de irrigação, evitando conflitos potenciais.

3.1. A agricultura irrigada

Responsável por cerca de 70% do consumo da água doce no mundo, a irrigação na agricultura é o setor que tem a maior fatia do total de água utilizada pelo homem. Entretanto, conforme BRITO *et al.* (2002), cerca de 97% do volume destinado às plantas é perdido para a atmosfera através da evapotranspiração das culturas, de forma que, de 3 a 5% apenas de toda a água usada para a irrigação é efetivamente retida pelas plantas.

Com uma superfície de, aproximadamente, 1,51 bilhão de hectares de área total cultivada no mundo, 17,7% corresponde à agricultura irrigada (267,7 milhões de hectares), sendo esta fração responsável por 40% do total das colheitas agrícolas (FAO, 1998 *apud* CHRISTOFIDIS, 2001).

CHRISTOFIDIS (2001) apresentou o resultado de um levantamento realizado em 1998, onde, dos 47.900.000 de hectares cultivados no Brasil, apenas 2.765.000 hectares são irrigados, correspondendo a um percentual de 5,8% da área total cultivada, apesar de o País disponibilizar de uma área com infra-estrutura para irrigação e drenagem da ordem de 3.169.000 hectares. Porém, na mesma obra, estimou-se que a área irrigada brasileira em efetiva produção, no final de 1999, estivesse em torno de 2.950.230 hectares. Tais números põem o País com um dos piores indicadores de relação área irrigada/cultivada dentre os países com mais de um milhão de hectares irrigados.

SANTOS (1998 *apud* BRITO *et al.*, 2002) diz que, apesar do pequeno percentual da área irrigada no Brasil, esta contribui com 16% da produção agrícola e representa 35% do valor total da produção.

Estima-se também que a agricultura irrigada no País utiliza, aproximadamente, 61% do total da água utilizada pelo homem, em comparação com os 18% utilizados no setor industrial e 21% no setor doméstico (CHRISTOFIDIS, 1999). No mundo, a divisão é na ordem de 70,1%, 20,0% e 9,9%, respectivamente (SHIRKLOMANOV, 1997 *apud* SETTI *et al.*, 2001).

Na opinião de BERNARDO (1989), para que o Brasil alcance condições ideais na agricultura irrigada, a fração da superfície produtiva sob irrigação em relação ao total da área cultivada deve ficar entre 15 a 20%.

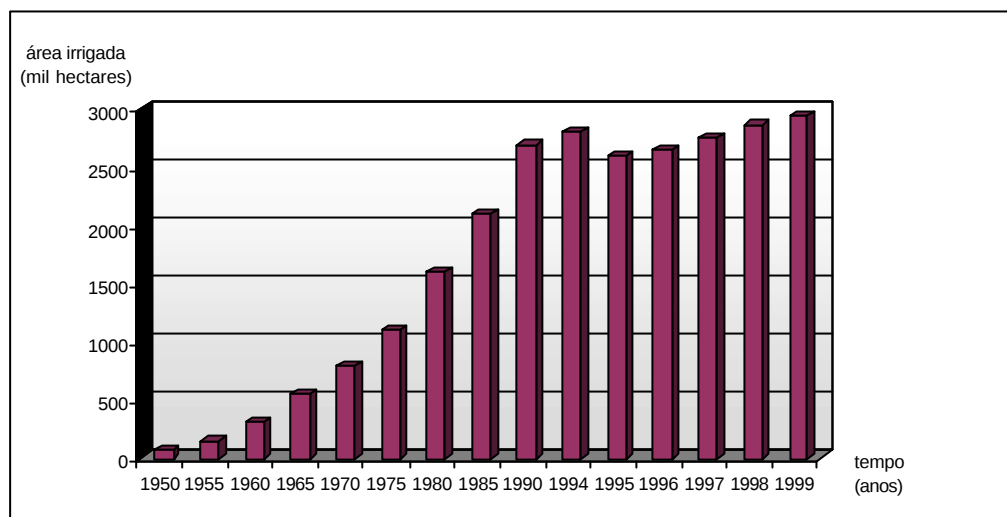
Tabela 3.1 - Evolução das áreas irrigadas no mundo e na América do Sul (mil hectares): período de 1975 a 1997.

Região	Área irrigada (mil hectares)						
	1975	1980	1985	1991	1995	1996	1997
Mundo	189.245	210.975	225.399	242.207	260.083	264.117	267.727
América do Sul	6.320	7.202	7.949	8.640	9.841	9.852	9.902

Fonte: CHRISTOFIDIS (2001).

A Figura 3.1 apresenta o crescimento da área irrigada no Brasil até 1999. Observa-se que até meados da década de 90, houve uma crescente expansão da mesma. No entanto, a partir de 1995, a área de terras irrigadas caiu, resultado do fim da vida útil de muitos sistemas de irrigação, segundo CHRISTOFIDIS (2001), causados pela “*degradação dos solos e as indefinições das políticas econômica e agrícola, que afetaram a decisão de*

muitos irrigantes, quanto a efetuar o plantio e efetiva produção”. Analogamente, a Tabela 3.1 mostra a evolução da área irrigada no mundo e na América do Sul.



Fonte: CHRISTOFIDIS (2001).

Figura 3.1 – Evolução das áreas irrigadas no Brasil.

BERNARDO (1989) apresenta uma classificação que divide em três classes o desenvolvimento da irrigação no Brasil:

1ª fase (a partir de 1878) – Construção de barragens e açudes, mas com poucos sistemas de irrigação.

Criação de comissões específicas para tratar da seca do Nordeste, devido às situações de calamidade as quais foram responsáveis pela construção de mais de 200 grandes reservatórios de água públicos e milhares de pequenos reservatórios particulares na região.

2ª fase – (após 1962) – Argumentação sobre a necessidade de irrigação e a construção de projetos públicos de irrigação.

Uma fase em que se falou muito sobre a necessidade de aumentar a área irrigada no país e de minimizar o problema da seca no Nordeste com o desenvolvimento da irrigação, apesar de muito pouco ter sido feito.

3ª fase (a partir de 1975) – Início significativo da irrigação no País.

Passa a haver um acelerado acréscimo no número de técnicos com bom treinamento em irrigação e drenagem.

Apesar do grande volume de água necessário para a prática da agricultura irrigada, para MEIRELLES (2000), é indiscutível que a grande vantagem da agricultura irrigada consiste na elevação da produtividade da terra, não só no seu sentido usual - kg/(ha.safra) -, mas no sentido de que um hectare de terra é capaz de gerar mais produto por ano - kg/(ha.ano) -, em comparação às culturas de sequeiro. A Tabela 3.2 apresenta uma comparação entre o rendimento de algumas culturas produzidas em sequeiro e sob irrigação. Observa-se que, em algumas situações, o rendimento aumenta em até quase quatro vezes comparado a produções sem irrigação.

Tabela 3.2 – Exemplos da interferência da irrigação na produtividade de algumas culturas no Brasil.

Cultura	Sequeiro	Irigada
Arroz de sequeiro	1,0 a 2,0 ton/ha	4,0 ton/ha
Batata	8,0 a 12,0 ton/ha	15,0 a 20,0 ton/ha
Cana-de-açúcar	60,0 ton/ha	120,0 ton/ha
Laranja	2,0 a 4,0 caixa/planta	10,0 a 15,0 caixa/planta
Melão	10,0 a 13,0 ton/ha	25,0 ton/ha
Milho	2,0 a 3,0 ton/ha	4,0 a 6,0 ton/ha
Tomate	50 caixas/ha	108 caixas/ha

Fonte: VIEIRA (1986).

Outro aspecto positivo a respeito da introdução da agricultura irrigada é que esta passa a estimular, na medida do possível, a substituição do trabalhador temporário pelo permanente, tendo em vista que a irrigação permite ao agricultor desenvolver sua atividade durante o ano todo, demandando mão-de-obra quase que constantemente, o que a difere da agricultura de sequeiro, que concentra a demanda num período muito curto do ano (época de chuvas). Além disso, essa prática gera estabilidade no processo produtivo, tornando-o mais independente das condições climatológicas, o que favorece a propriedade agrícola, ao permitir um fluxo de renda mais bem distribuído ao longo do ano e um melhor planejamento das atividades produtivas (MEIRELLES, 2000). Porém, SECKLER (1970, *apud* SOLTANI-MOHAMMADI, 1972) afirma que, *‘a quantidade de gerenciamento necessário para alcançar uma dada meta de produção varia na proporção inversa da qualidade de mão-de-obra empregada e direta da quantidade de*

mão-de-obra empregada”, salientando que deve haver o aumento na qualidade de mão-de-obra em uma lavoura para que se acompanhe a melhoria do rendimento das culturas sob irrigação, o que pode acarretar maiores custos na produção.

Apesar de todas as vantagens apresentadas pela irrigação, esta ainda é uma prática que demanda muita água e, ao haver má utilização dos recursos requeridos, as perdas tornam-se enormes⁶. No caso de países em desenvolvimento, a aplicação da água em sistemas de irrigação é, com grande frequência, ineficiente. Tomando o Brasil como exemplo, cerca de 60% da área total irrigada no território nacional utiliza irrigação por superfície. Tal método apresenta uma eficiência de aplicação de água que varia entre 50% e 80%, estando a média em 60% (DOOREMBOS e PRUITT, 1974). Conforme dados de 1999 apresentados por CHRISTOFIDIS (2001), a região brasileira que retém o maior percentual deste método é o Sul, onde dos 1.217.545 ha de terras irrigadas, 1.103.755 ha são por superfície, correspondendo a 91% do território irrigado da região. Portanto, conclui-se que a simples adoção de técnicas de irrigação para o aumento da produtividade não é suficiente. Em regiões onde há escassez de água ou sua aquisição é custosa, torna-se necessário a adoção de métodos mais eficientes no uso, de forma que haja água suficiente para os múltiplos usos, espacial e temporalmente, desde que a planta se adapte ao método de irrigação.

As Tabelas 3.3 e 3.4 apresentam, respectivamente, as áreas irrigadas e as demandas anuais de água para a irrigação de cada região do país.

Tabela 3.3 – Áreas irrigadas pelos diferentes métodos de irrigação em 1999.

Região	Área irrigada por método (ha)				
	Superfície	Aspersão convencional	Pivô central	Localizada	Total
Sudeste	238.009	246.135	354.580	80.278	919.002
Sul	1.103.755	57.295	23.443	33.052	1.217.545
Centro-Oeste	59.630	41.756	98.853	12.271	212.510
Nordeste	166.719	177.070	84.577	84.457	512.823
Norte	82.330	3.250	390	2.110	88.350

Fonte: CHRISTOFIDIS (2001).

Nota-se, portanto, que a irrigação é uma prática necessária na agricultura, trazendo incrementos na produtividade das culturas e no rendimento do agricultor. Porém, junto

⁶ Entende-se por “perdas” como qualquer recurso – água, por exemplo – que seja captado para o sistema e não seja utilizado no processo produtivo.

com o crescimento da área irrigada, torna-se necessário o desenvolvimento de planos que otimizem o uso dos recursos hídricos ainda disponíveis e cada vez mais escassos, visto que, no planejamento do aproveitamento dos recursos hídricos deve-se considerar os usos múltiplos da água.

Tabela 3.4 – Demanda de água para a irrigação no Brasil por regiões em 1998.

Região	Água derivada dos mananciais (10 ³ m ³ /ano)	Água consumida pelos cultivos (10 ³ m ³ /ano)	Eficiência de Irrigação (%)
Sudeste	9.487.233	6.223.402	65,6
Sul	13.696.405	8.521.624	62,2
Centro-Oeste	1.602.183	492.667	30,7
Nordeste	8.114.586	5.340.146	65,8
Norte	836.900	461.320	55,1

Fonte: CHRISTOFIDIS (1999).

A seguir, para um melhor entendimento da metodologia adotada para o aproveitamento de recursos hídricos na irrigação, objeto deste trabalho, serão definidos alguns conceitos básicos empregados no decorrer da dissertação.

3.2. Definição de alguns conceitos

3.2.1. Clima

O clima é um dos fatores mais importantes na determinação do volume de água requerido pelas culturas. Portanto, para o prosseguimento de um projeto de irrigação, nos casos em que não houver medições da demanda hídrica das culturas diretamente em campo, utilizando lisímetros, por exemplo, levantamentos de dados climatológicos devem ser realizados para que se possa estimar o valor aproximado da quantidade de água que a planta requer (DOOREMBOS e PRUIT, 1974).

O consumo de água do conjunto solo-planta, ou seja, a necessidade hídrica da cultura, corresponde à quantidade de água que passa para a atmosfera a partir deste conjunto por transpiração e evaporação, sendo a primeira realizada pelas plantas e a segunda, pelo solo. Em uma cultura bem sucedida, a taxa de transpiração pode ser muito superior à taxa de evaporação, porém, as duas taxas são de importância, já que representam a quantidade total de água perdida para a atmosfera. Nomeia-se evapotranspiração (*ET*) a

soma destas duas taxas a qual define a necessidade hídrica da cultura (DOOREMBOS e KASSAM, 1979).

De acordo com GOODRICH (1956), a evapotranspiração – ou uso consuntivo de água – corresponde ao volume total de água evaporado devido ao crescimento vegetativo em uma dada área, incluindo a evaporação da água de chuva ou aplicada artificialmente, em qualquer tempo específico. CHOW (1964) caracteriza o fenômeno como “a evaporação da superfície de água, solo, neve, vegetal e qualquer outra somada à transpiração vegetal”.

Segundo BERNARDO (1995), os métodos adotados para a determinação da evapotranspiração podem ser divididos em diretos e indiretos. Os métodos diretos são realizados com a utilização de lisímetros que são parcelas experimentais de campo, onde são utilizados o controle de umidade do solo e métodos de balanço hídrico. Porém, por apresentarem elevados custos, sua utilização tem estado restrita a instituições de pesquisa. Os métodos indiretos se baseiam em fórmulas empíricas para a estimativa da evapotranspiração, utilizando dados climatológicos disponíveis.

O clima no local onde as plantas são cultivadas é regulado por dois sistemas físicos distintos: de transferência energética (radiação solar, temperatura e período de exposição ao sol – comprimento do dia) e transferência aerodinâmica (velocidade do vento e umidade relativa do ar). Ambos influenciam na evapotranspiração das culturas.

3.2.1.1. Evapotranspiração da cultura de referência

O conhecimento da evapotranspiração é essencial para um bom planejamento e dimensionamento e manejo dos recursos hídricos em um sistema de irrigação.

Pode-se definir evapotranspiração da cultura de referência (ET_o), ou simplesmente evapotranspiração de referência, como sendo a quantidade de água evapotranspirada em uma unidade de tempo e de área (lâmina d'água, representada, na maioria das vezes, em milímetros), por uma gramínea (grama batatais) de baixo porte e de altura uniforme (entre 8 e 15 cm), verde, em ativo crescimento e sem deficiência de água, cobrindo totalmente o solo. Esta gramínea é considerada como a cultura de referência dentre as outras culturas na definição da demanda hídrica.

Várias fórmulas, mais ou menos empíricas, para a obtenção da ET_o são utilizadas, cada qual mais ou menos apropriada a uma determinada condição climática. No entanto, a popularização de alguns desses métodos fez com que o uso de tais fórmulas fossem realizados em condições climáticas e agronômicas muito diversas daquelas em que foram inicialmente concebidas. Apesar de a adaptação destas fórmulas a novas condições climáticas ser um trabalho difícil e oneroso, aplicações de tais métodos inalterados em etapas preliminares e de planejamento de projetos de irrigação são freqüentes.

DOOREMBOS e PRUITT (1974) apresentam quatro dos métodos mais freqüentemente adotados para a determinação da taxa de evapotranspiração de referência: (1) Penman modificado; (2) Radiação; (3) Tanque Classe A e; (4) Blaney-Criddle. De acordo com os autores, os métodos de Penman e da Radiação proporcionam ótimos resultados para períodos de, pelo menos, 10 dias, enquanto que, em segundo lugar, segue o método do Tanque Classe A. Uma técnica freqüentemente utilizada na determinação do método que melhor se aplica às condições climáticas de uma região estudada é a comparação dos resultados obtidos a partir de algumas fórmulas conhecidas com os valores obtidos em campo, com lisímetros. MENDONÇA *et al.* (2002) aplicaram tal metodologia na determinação da ET_o no município de Campos dos Goytacazes obtendo resultados satisfatórios.

3.2.1.2. Coeficiente de cultura

A ET_o retrata os efeitos do clima sobre a cultura de referência. No entanto, para se medir os efeitos das características da cultura sobre suas necessidades hídricas, adota-se um coeficiente de cultura (k_c) que relaciona a ET_o com a evapotranspiração potencial de uma determinada cultura (ET_p).

A determinação do k_c é empírica, realizada a partir de correlações experimentais entre a ET_p e ET_o . Influenciam nos valores de k_c as características físicas da cultura, o momento do plantio ou da semeadura, as fases do desenvolvimento da cultura e a duração do período vegetativo (DOOREMBOS e PRUITT, 1974). Características climáticas da região também afetam no valor do coeficiente da cultura.

3.2.1.3. Evapotranspiração potencial

Desde que THORNTHWAITE (1948) concluiu que a umidade do solo pode afetar a evapotranspiração, foi sugerido pelo mesmo o termo Evapotranspiração Potencial (*ETp*) para definir a evapotranspiração que ocorreria caso a o teor de água no solo fosse mantido sempre em quantidades adequadas ao máximo desenvolvimento vegetal, assumindo também a inexistência de outras condições adversas, como doenças e baixa fertilidade do solo. Estas taxas de evapotranspiração são alcançadas somente quando as culturas estão sujeitas a condições ótimas de disponibilidade de água no solo, ou seja, em momento algum a planta passará por estresses hídricos.

De acordo com KLAR (1991), pode-se definir *ETp* como a perda de água de uma cultura saudável qualquer sem qualquer restrição de água ao longo do desenvolvimento da planta. Estes valores podem ser estimados através de métodos diretos, a partir das técnicas citadas acima, ou indiretos, a partir da *ETo*. De acordo com OTTONI FILHO (1988), os sistemas de irrigação devem ser projetados para garantir as evapotranspirações potenciais das culturas, mesmo em situações de limitações hídricas dos mananciais.

3.2.1.4. Precipitação e precipitação efetiva

Do total da precipitação (*PP*) que ocorre em um determinado instante, parte volta a evaporar antes mesmo de chegar ao solo, outra fica retida na cobertura vegetal, um percentual esco superficialmente (*runoff*) e parte infiltra no solo, na qual uma fração fica retida na zona radicular (*Zr*) e outra, percola além do alcance das raízes, contribuindo para o lençol freático.

A efetividade da chuva se dá em várias esferas, variando sempre com o campo de aplicação. A definição de chuva efetiva no projeto de um reservatório, por exemplo, difere-se do conceito de chuva efetiva para a contribuição de um lençol freático, ou mesmo para os efeitos sobre um pico de cheia em um rio. Porém, com relação à produção agrícola, como é o caso de estudo deste trabalho, CHOW (1964) chama de precipitação efetiva (*PPe*) a chuva total precipitada durante o período de crescimento da cultura menos aquela que ocorre imediatamente após uma irrigação do solo, quando este já atingiu sua capacidade de armazenamento de água, causando o escoamento

superficial e a percolação além da zona radicular com o excesso precipitado. Esta definição ainda é vaga, já que a água perdida por *runoff* pode ser utilizada em outro momento ou em outra área cultivada.

Mais tarde, DASTANE (1974) definiu como *P_{Pe}* “a chuva útil ou utilizável. Porção do total precipitado que é direta ou indiretamente utilizado para a produção no local onde chove, sem o uso de bombeamento, enquanto a demanda de água das culturas for considerada”.

Vários são os métodos de determinação da *P_{Pe}* no contexto do atendimento à demanda agrícola. DOOREMBOS e PRUITT (1974) e BERNARDO (1995) citam, dentre outros, o Método do Balanço de Umidade do Solo, o Método do Lisímetro e o Método do U. S. Soil Conservation Service. CARVALHO (2003) aplica este último para simular a alocação de água em um sistema de irrigação no Nordeste Brasileiro.

De acordo com DASTANE (1974), fatores como características do solo, água subterrânea, distribuição da chuva no tempo e no espaço (duração, intensidade e frequência), topografia do terreno, evapotranspiração potencial e características da cultura podem influenciar na proporção da efetividade da chuva.

3.2.2. Solo

O solo é um sistema complexo composto por materiais sólidos, líquidos e gasosos. A porção mineral consiste em partículas de vários tamanhos, formas e composições químicas. Essas partículas são classificadas de acordo com o tamanho das mesmas, como areia, silte e argila, que essencialmente determinam a textura (granulometria) do solo (FAO, 1971).

A água é retida no solo devido a fenômenos de capilaridade e adsorção. A capilaridade está relacionada com a afinidade entre as partículas sólidas do solo e a água, havendo, porém, a necessidade de interfaces água-ar (REICHARDT, 1990).

Muitos fatores afetam a retenção de água no solo. O principal deles é a textura, pois ela, diretamente, determina a área de contato entre as partículas sólidas e a água. A estrutura da matriz porosa também afeta a retenção de água, pois ela determina o arranjo das partículas que, por sua vez, vai determinar a distribuição de poros. A natureza química

das argilas também é outro fator relevante na capacidade de resistência hídrica dos solos.

3.2.2.1. Capacidade de água disponível no solo

De acordo com DOOREMBOS e PRUITT (1974), considera-se como água disponível no solo para uso da cultura a diferença dos conteúdos de umidade do solo na capacidade de campo (*CC*) e no ponto de murcha permanente (*PMP*). Essa quantidade retida no solo entre o percentual da capacidade de campo e o ponto de murcha permanente é a fração volumétrica do solo capaz de ser absorvida pelo sistema radicular.

Para uma dada quantidade de água no solo, o volume disponível para a planta dependerá, dentre outros fatores: (1) da condutividade hidráulica do solo, variando com a natureza do solo e com o conteúdo de água e; (2) da taxa de evapotranspiração da cultura (HAGAN e STEWART, 1972).

RUSSELL (1942) fala a respeito da importância da manutenção da água disponível no solo para a cultura e que esta deve ser contínua. Qualquer escassez, mesmo por breves períodos, podem causar murchamento e, caso o período seja suficientemente intenso, pode vir a afetar a cultura permanentemente. Também menciona que a escassez de água nos primeiros estágios de crescimento da planta causa retardamentos no crescimento que podem prevalecer ao longo do ciclo.

Capacidade de campo

A capacidade de campo é definida por HAGAN e STEWART (1972) como a quantidade de água retida pelo solo após uma irrigação pesada ou uma chuva forte, no momento em que seu movimento descendente tenha diminuído sensivelmente, normalmente, de um a três dias após a irrigação ou a chuva, ou seja, a quantidade de água que um solo pode reter depois de cessada a drenagem natural, sendo esta drenagem desimpedida e sem a influência da evapotranspiração.

A *CC* é considerada como o limite superior da disponibilidade de água no solo. O volume mínimo de água aplicado no solo para alcançar a capacidade de campo dependerá da umidade do solo antes da aplicação de água e de características do solo

(FAO, 1971). Porém, como é um valor que depende da estabilização do movimento de drenagem, é de difícil determinação, sendo influenciado pela textura, estrutura, profundidade e uniformidade do solo (VIEIRA, 1986).

Ponto de murcha permanente

É chamado de ponto de murcha permanente o teor de água presente no solo quando ocorre e se mantém a murcha das plantas normais, que nele vegetam, mesmo quando essas plantas, após murcharem, sejam colocadas em ambiente saturado de umidade (VIEIRA, 1986).

De acordo com REICHARDT (1990), *PMP* é o limite inferior de umidade, no qual a reserva de água do solo se esgotou para o uso vegetal.

A porcentagem de água que leva ao *PMP* não depende unicamente de características do solo, mas também, da própria planta, sua natureza, idade e grau de desenvolvimento. Porém, para a grande maioria das plantas cultivadas, convencionou-se que o ponto de murcha permanente ocorre quando a tensão de umidade do solo atinge 15 atm (VIEIRA, 1986).

Assim como a *CC*, o ponto de murcha permanente também é influenciado pela textura e estrutura do solo. Desta forma, solos de textura fina possuem um maior *PMP* que solos de textura grosseira (FAO, 1971).

Balanço hídrico no solo

Entende-se por balanço hídrico no solo a contabilidade das quantidades de água que entram e saem de uma determinada camada que vai desde sua superfície até uma profundidade previamente convencionada. Neste balanço, há a entrada de água, através do plano da superfície do solo, pela chuva e/ou irrigação, e a perda, dada pela evapotranspiração e o *runoff*. No limite inferior da camada de solo, que deve estar abaixo da zona radicular, ocorrem as perdas por percolação profunda e ganhos por ascensão capilar da água. Realizada a contabilidade de todas as entradas e saídas, obtém-se a quantidade de água que fica retida na camada de solo, medida através do armazenamento de água (REICHARDT, 1990). O balanço hídrico do solo é, portanto,

importante para um acompanhamento da quantidade de água armazenada no solo. Esta quantidade deve ser mantida em níveis ótimos para maximizar a produtividade agrícola.

Como foi visto acima, fatores como condutividade hidráulica, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, balanço hídrico no solo e evapotranspiração da cultura, todos relacionados à retenção de água no solo, são fatores que influenciam na aptidão de um solo para o bom desenvolvimento de uma cultura. Porém, na prática da irrigação, não somente a disponibilidade de água no solo interfere no rendimento da produção da planta. Outros fatores como fertilidade do solo, declividade do relevo, salinidade, acidez, resistência mecânica, drenabilidade do solo, etc. são de igual importância para que um projeto de irrigação dê bons rendimentos.

3.2.3. Cultura

A definição de uma ou mais culturas que se adaptem a uma área produtiva não é trivial. Esta é dependente de alguns fatores relacionados às características climatológicas, pedológicas e de disponibilidade hídrica, pois as culturas diferem na tolerância ao stress hídrico. Fatores como precipitação efetiva e diversos itens pedológicos e climatológicos, como já mencionado, também podem afetar o rendimento das culturas tornando sua produção economicamente inviável. Dessa forma, o bom conhecimento de todos eles na área do projeto de irrigação é essencial para que o uso dos recursos disponíveis seja feito da melhor maneira possível, trazendo o maior retorno econômico.

Altos níveis de produção de uma cultura dependem de uma série de processos interativos. Os fatores que determinam um dado nível de produção incluem além da água e das condições de solo, a radiação solar, temperatura, velocidade dos ventos, umidade relativa do ar, variedade vegetal, quantidade e quantidade de mudas e sementes, bem como o efetivo controle de pragas e doenças. Entretanto, a água é um fator dominante, incluindo sua distribuição ao longo do tempo e o método de aplicação (HARGREAVES e SAMANI, 1983).

Para saber se a água disponível é suficiente para o projeto ou mesmo para se determinar qual área passível de ser irrigada, deve-se definir a necessidade de irrigação líquida (*NIL*). Para a sua determinação, são envolvidas as principais variáveis que compõem o

balanço hídrico que incluem: (1) ET_p e (2) fluxos afluentes e efluentes de água, sejam superficiais ou sub-superficiais, ou seja, contribuições das precipitações, águas subterrâneas e o armazenamento de água no solo. Entretanto, é comum negligenciar a contribuição de um possível lençol freático, bem como da própria água armazenada no perfil do solo, concluindo-se que, simplificadamente, através do balanço hídrico, a NIL é igual à diferença entre a ET_p e a PPE em um determinado período de tempo.

DOOREMBOS e KASSAM (1979) reafirmam a importância da água na irrigação citando que *“o efeito do estresse hídrico sobre o crescimento e o rendimento depende, por um lado, da espécie e da variedade da cultura e, por outro, da magnitude e do tempo em que ocorre o déficit hídrico”*.

Para lidar com os fatores de custo substanciais envolvidos no desenvolvimento de melhores sistemas de distribuição e aplicação de água, são requeridas informações relacionadas ao efeito econômico do déficit hídrico nas culturas.

De acordo com alguns autores, a complexa dinâmica do sistema solo-água-planta-atmosfera tem tornado extremamente difícil obter informações precisas para engenheiros, economistas e outros envolvidos em problemas de projeto e na alocação de água, numa forma útil dentro de seus objetivos (HAGAN e SETWART, 1972).

Assim, técnicas de otimização e de simulação vêm sendo adotadas para obter loteamentos melhores ou mais adequados de uma área de projeto para a distribuição das culturas mais rentáveis economicamente, considerando-se as limitações dos recursos disponíveis. Ou seja, em um projeto de irrigação, de acordo com BLANK (1974), o *“problema é determinar o número de culturas, qual distribuição ou quais métodos de produção tirarão maiores vantagens sobre os recursos limitados para propiciar o maior retorno econômico”*.

3.2.4. Irrigação

Adotada e praticada há milhares de anos, a irrigação é uma prática utilizada de forma a complementar a necessidade de água, naturalmente promovida pela precipitação, proporcionando teor suficiente de umidade no solo durante o período vegetativo de uma determinada cultura. LIMA *et al.* (1999) definem irrigação como o conjunto de técnicas

destinadas a deslocar água no tempo ou no espaço para modificar as possibilidades agrícolas de cada região.

Com o uso racional da água na irrigação, adotando-se as demais práticas agrícolas complementarmente, é possível obter altos rendimentos alcançando produtividades máximas na agricultura. A racionalidade na aplicação de água está relacionada à técnica e ao planejamento adotados para o suprimento quantitativo, qualitativo e temporal do déficit hídrico das plantas, ou seja, água de boa qualidade, em quantidade suficiente e nos momentos necessários.

A lâmina de água necessária para a irrigação tem relação direta com a evapotranspiração da cultura, compensando o déficit hídrico resultante da diferença entre a demanda e o abastecimento a partir das fontes naturais de água (precipitação efetiva, lençol freático e água armazenada na zona radicular).

Com a prática da irrigação, a incerteza com relação aos fenômenos hidrológicos que causam a redução do rendimento das plantas ou mesmo a perda de safras torna-se irrelevante, garantindo o suprimento de água ao longo do ciclo de uma cultura, desde que um estudo de planejamento seja realizado e haja água suficiente para isso.

Vários métodos podem ser adotados para aplicar água às plantas, podendo haver adaptações em cada um para atender às diversas peculiaridades que podem ocorrer na prática. Alguns métodos requerem muita mão-de-obra enquanto outros requerem pouca, mas, em compensação, esses últimos necessitam alto investimento em equipamentos ou em energia. Alguns requerem grande quantidade de água e, em outros, há grande eficiência na utilização. O certo é que, de acordo com TELLES (1986), não existe o método ideal para todas as situações.

A aplicação de água nas plantas se dá por vários métodos de irrigação, sendo que a classificação mais comumente utilizada é (*abid*, 1986):

- Superficial;
- Subterrânea;
- Aspersão;
- Localizada (gotejamento e microaspersão).

A irrigação superficial é aquela na qual a condução da água do sistema de distribuição até qualquer ponto de infiltração, dentro da parcela a ser irrigada, é feita diretamente por gravidade sobre a superfície do solo. Este método se adapta à maioria das culturas, porém, é o que, geralmente, gera a maior perda de água. Além disso, devido a problemas de erosão, não se adapta a terrenos irregulares.

Chama-se irrigação subterrânea aquela cuja aplicação de água é feita no interior do solo por elevação do nível do lençol freático ou por aplicação de água no interior do solo. Apesar de reduzir sensivelmente as perdas por evaporação, este método exige grande combinação de condições naturais que restringem sua utilização a poucas áreas.

A irrigação por aspersão fundamenta-se na distribuição da água sob formas de gotas, simulando uma chuva sobre o terreno, por intermédio de aspersores. Este método é empregado numa grande variedade de culturas e é adaptável a quase todos os tipos de solos. Entretanto, sofre restrições com relação a condições climáticas. Regiões com altas temperaturas e fortes ventos podem acarretar grandes perdas de água por evaporação.

Finalmente, o método de irrigação localizada consiste na aplicação de água diretamente na região da superfície do solo ocupada pelo sistema radicular das plantas. É um método de alta eficiência, porém de elevados custos de implantação e operação. Normalmente, a aplicação de água se processa através de pequenos emissores, principalmente gotejadores ou microaspersores.

Esta classificação é baseada na forma que a água é colocada à disposição da planta, sendo que estes métodos podem ser subdivididos em tipos ou sistemas de acordo com a visão ou preferência do autor da classificação.

Devido a vários fatores que causam perdas na eficiência nos sistemas de adução e de aplicação hídrica nas lavouras, um volume superior à necessidade de irrigação líquida deve ser captado dos mananciais. Dessa forma, é necessário aumentar a disponibilidade de água para a irrigação, de maneira que a planta não sofra déficit hídrico. Portanto, a *necessidade de irrigação bruta (NIB)* deve ser determinada para a obtenção do volume real de água a ser captado para fins de irrigação.

A determinação da *NIB* é feita, utilizando-se a *eficiência de aplicação de água de irrigação (ef)*, que é a relação existente entre a quantidade real de água aplicada na rizosfera, prontamente disponível para as culturas após a irrigação, e a quantidade total

de água aplicada no campo (DOOREMBOS e PRUITT, 1974). A *ef* varia de acordo com os métodos utilizados para aplicar água nas lavouras.

As variações nas eficiências na aplicação de água de diferentes métodos de irrigação são analisadas por vários pesquisadores, formando uma extensa lista de referências abordando o assunto de diferentes formas. HARGREAVES e SAMANI (1984) apresentam uma revisão bibliográfica com vários exemplos de estudos realizados nos Estados Unidos comparando diferentes quantidades de água aplicada nas culturas e os respectivos rendimentos obtidos. Algumas das conclusões obtidas pelos autores são que a prática da irrigação para alcançar o retorno econômico máximo torna-se mais viável em situações que: (1) custos com água são baixos com relação a outros custos com a produção das culturas; (2) preparação do solo e/ou sistemas de irrigação facilitam a alta eficiência e a uniformidade da irrigação; (3) precipitação contribui pouco para o suprimento do déficit hídrico das culturas; (4) rendimento e valores das culturas são altos; (5) déficits hídricos aumentem problemas de salinidade no solo e; (6) a área total irrigável é limitada, mas a disponibilidade de água, nem tanto.

A respeito dos métodos de irrigação comumente empregados, existe uma acentuada predominância dos sistemas por superfície na maioria das regiões irrigadas existentes no mundo. No Brasil, infelizmente não se dispõe de estatísticas precisas a esse respeito. Entretanto, de acordo com dados levantados por CHRISTOFIDIS (2001), os sistemas por superfície prevalecem na ordem de 56% da área total irrigada no território nacional, enquanto que os métodos de irrigação localizada ocupam uma fração de 7% apenas. Em outros países em desenvolvimento localizados na Ásia, África e América Latina podem ser encontrados valores iguais ou superiores a esta percentagem de uso dos sistemas de irrigação por superfície. Essa predominância encontrada em quase todas as regiões irrigadas do mundo justifica-se pelas inúmeras vantagens que o sistema apresenta em relação a outros sistemas de irrigação, como baixos custos fixos e variáveis (TELLES, 1986), tendo como desvantagem uma menor eficiência e sua impossibilidade de uso em topografias acidentadas.

Citado por CARVALHO (2003), na 26ª Conferência Regional da FAO, foi discutido que, nos últimos anos, uma das inovações da ciência e arte de irrigar tem sido a introdução dos sistemas de irrigação localizada, usando técnicas que relacionam alta

frequência e baixo volume de aplicação de água (e nutrientes), respeitando o ciclo de desenvolvimento da cultura. Outra modernidade corresponde ao desenvolvimento de modelos digitais, métodos e técnicas de simulação matemática e otimização dos sistemas de irrigação, o que possibilita aumentar a eficiência dos mesmos e minimizar os custos da água requerida pelas culturas.

4. MODELOS MATEMÁTICOS NA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

A tomada de decisões a respeito do destino que a água disponível em um corpo hídrico terá, em uma dada região e em um determinado instante, deve considerar aspectos como econômicos, sociais, políticos, legais, ambientais e hidrológicos. Estas decisões se tornam mais complexas com o aumento da demanda de água, que tem como consequência o acirramento dos conflitos pelo recurso hídrico.

4.1. A pesquisa operacional e a análise de sistemas de recursos hídricos

A pesquisa operacional foi uma técnica introduzida durante a Segunda Guerra Mundial para a solução de problemas de operações militares, o que dá origem ao nome. Deve-se ao *Harvard Water Program* (MAASS *et al.*, 1962) a ação pioneira de introduzir esse tipo de abordagem em planejamento e gestão de recursos hídricos. Neste trabalho, vários pesquisadores do programa apresentaram as bases da chamada análise de sistemas de recursos hídricos. Um dos objetivos foi melhorar a metodologia da análise de sistemas unindo a engenharia à economia de maneira mais eficiente comparado ao que ocorria até então. Posteriormente, o estudo foi difundido por várias obras (HALL e DRACUP, 1970; KUIPER, 1971).

PORTO *et al.* (2002) define análise de sistemas como uma técnica adotada para alcançar soluções de problemas complexos, podendo ser aplicados na Engenharia de Recursos Hídricos a partir da abordagem sistêmica e do uso de técnicas computacionais agregadas à modelagem computacional.

MAASS *et al.* (1962) apresentam quatro passos básicos para o planejamento e operação de sistemas de recursos hídricos: (1) identificação dos objetivos; (2) formulação dos objetivos em critérios quantitativos; (3) proposta de alternativas para o desenvolvimento

de sistemas específicos de recursos hídricos que atendam amplamente os critérios adotados e; (4) análise dos resultados obtidos com as alternativas avaliadas.

DORFMAN (1965) foi outro pioneiro na saga da descrição da evolução dos modelos matemáticos aplicados ao planejamento e gerenciamento de recursos hídricos. Outras obras como BEARD (1972), YEH (1992) e WURBS (1993) registraram a evolução da análise de sistemas de recursos hídricos ao longo dos anos. Mas foi Yeh que, em 1985, desenvolveu uma revisão do Estado da Arte da aplicação de modelos matemáticos na operação de reservatórios a qual é adotada como referência até os dias de hoje. Nesta obra, o autor analisa a aplicação dos métodos mais utilizados na época, como a Programação Linear (*LP*), a Programação Dinâmica (*PD*), Programação Não-Linear (*PNL*) e modelos de simulação. O autor define a importância da aplicação de modelos matemáticos na tomada de decisões sobre o manejo da água. Ele afirma que não existe um algoritmo geral que resolva todos os problemas, mas a escolha do método dependerá das características do sistema considerado, da disponibilidade de dados e dos objetivos e restrições especificadas.

Dessa forma, este capítulo tem por objetivo a introdução dos métodos de análise de sistemas mais comumente aplicados no gerenciamento de recursos hídricos, estendendo-se a uma abordagem mais aprofundada a respeito de suas aplicações específicas em sistemas de irrigação.

4.2. Métodos comumente empregados

Os métodos mais comumente utilizados para a análise de sistemas em recursos hídricos podem ser divididos em três grupos: (1) modelos de simulação; (2) modelos de otimização e; (3) análise de sistemas baseados em programação em rede de fluxo, cada qual com suas particularidades, vantagens e desvantagens.

4.2.1. Modelos de simulação

Simulação, na área de recursos hídricos, pode ser definida de forma abrangente como o processo de estabelecer um modelo comportamental de um componente físico de um

projeto de recursos hídricos e a investigação das variações do comportamento causado pelas mudanças dos vários parâmetros definidos (CARR e UNDERHILL, 1974).

Outros autores definem simulação como uma técnica de modelagem que tem como essência aproximar o comportamento de um sistema real, representando amplamente todas as suas características por uma descrição matemática ou algébrica (MAASS *et al.*, 1962; WURBS, 1993). Estes modelos têm sido rotineiramente aplicados há muitos anos por agências reguladoras de recursos hídricos e outras entidades responsáveis por planejamento no mundo.

Apesar da grande aceitação da técnica por analistas e planejadores, uma das maiores desvantagens dos métodos de simulação surge ao se tentar obter soluções ótimas de operação ou planejamento de sistemas de recursos hídricos geradas pela aplicação de métodos empíricos. Quando uma combinação ótima de parâmetros de um sistema é encontrada por alguma técnica de busca associada a um estudo de simulação, não há garantia que o ótimo global foi alcançado. No entanto, MAASS *et al.* (1962) obtiveram bons resultados na adoção de uma eficiente técnica de busca. CARR e UNDERHILL (1974) acrescentam que, apesar das limitações impostas citadas, *“o uso de um método de simulação de sistemas em conjunto com uma eficiente técnica de busca que troque as variáveis de decisão de forma lógica, pode-se desenvolver rapidamente um projeto de um sistema, chegando mais próximo de um ótimo global que projetos alternativos baseados em técnicas de planejamento tradicionais”*. Apesar disso, outras desvantagens podem ser encontradas em métodos de simulação (MAASS *et al.*, 1962):

- Simulação não é uma operação automática de otimização, requerendo mão-de-obra extra para a obtenção do resultado solicitado. Estes modelos respondem apenas a pergunta do tipo “e se fizermos isso?”;
- Apesar de propiciar grande liberdade na combinação de estruturas e de previsão de saídas de resultados, não se pode controlar regras operacionais do sistema simulado.

Modelos de simulação são um tanto rígidos com relação ao tratamento de regras de operação de sistemas para a obtenção das variáveis de decisão porque, normalmente, tais regras já estão inseridas no sistema do modelo. Dessa forma, a investigação de outras regras de operação que otimizem o sistema por modelos de simulação, geralmente requer outras rotinas computacionais associadas a eles.

4.2.2. Modelos de otimização

A análise de sistemas complexos de recursos hídricos pode, às vezes, envolver milhares de restrições e variáveis de decisão. A partir do momento em que as restrições e os objetivos tenham sido determinados, a maioria dos problemas se encaminha na direção de técnicas de solução fundamentadas no campo da pesquisa operacional e ciências de gerenciamento (YEH, 1985).

Em contraste com a natureza empírica dos métodos de simulação, técnicas de otimização são essencialmente analíticas e têm por finalidade identificar o máximo global de uma função objetivo específica aplicando um número finito de passos.

O termo *programação matemática* ou *otimização* refere-se a formulações matemáticas nas quais algoritmos são usados para computar um grupo de valores de variáveis de decisão que minimizam ou maximizam uma função objetivo sujeita a restrições e a grande vantagem que tais técnicas têm sobre os modelos de simulação é que “*todos os modelos de otimização também ‘simulam’ o sistema*” (WURBS, 1993).

Para MAASS *et al.* (1962), um resultado ótimo de um sistema pode ser definido como a combinação de unidades do sistema, saídas e procedimentos operacionais que atendam os objetivos melhor que qualquer outra operação.

Embora um grande número de diferentes variáveis possa ser considerado em um estudo de um sistema de recursos hídricos, um modelo de otimização pode maximizar, em geral, apenas uma função objetivo. Dessa forma, múltiplos objetivos podem ser combinados em uma única função, caso sejam expressos nas mesmas unidades. Uma abordagem alternativa para a substituição de objetivos com diferentes unidades envolve a adoção de “pesos” atribuídos a cada objetivo que refletem a importância de cada um no sistema, onde a função objetivo seria a soma de cada componente multiplicado pelos seus respectivos pesos. Outra maneira de abordar os múltiplos objetivos em modelos de otimização é selecionando alguns objetivos e fixando-os como restrições do sistema. Dessa forma, o modelo pode ser executado interativamente com diferentes grupos de restrições de forma que sejam analisadas diferentes propostas de projeto.

A aplicação de técnicas de otimização em recursos hídricos encontrada na literatura é relativamente extensa, com muitas aplicações bem-sucedidas, a maioria objetivando o planejamento da alocação de água, tendo como finalidade alcançar o ótimo no desenvolvimento de estratégias em estudos na área.

Dentre as técnicas de otimização existentes, as que se destacam pela presença mais constante em projetos desenvolvidos são a programação linear e a programação dinâmica. Outras técnicas como a programação não-linear aplicadas à busca de soluções ótimas em sistemas não-lineares são adotadas com menos frequência.

4.2.2.1. Programação linear

A *PL* é uma técnica computacional na qual a solução ótima de um problema definido por funções objetivo lineares e até milhares de restrições lineares pode ser obtida prontamente. Tem sido uma das técnicas mais adotadas no gerenciamento de recursos hídricos, sendo sua única desvantagem a necessidade da linearização de alguns fenômenos não-lineares que ocorrem no contexto dos recursos hídricos. Dessa forma, implementações de formas estritamente lineares podem limitar sua aplicabilidade. Entretanto, uma técnica tradicional para contornar esta limitação é a prática da linearização progressiva que tem sido utilizada para lidar com não-linearidades como evaporação em reservatórios, geração de energia elétrica e redução do rendimento de plantações causada pelo déficit hídrico. Quanto menores forem os segmentos lineares, melhor será a representação da não-linearidade. Como exemplo, OLIVEIRA e LANNA (1997) obtiveram resultados satisfatórios aplicando esta metodologia na linearização de curvas de evapotranspiração relativa em função da umidade relativa no solo.

Uma outra forma de contornar o problema de não-linearidade na programação linear é adotando procedimentos iterativos de uso da *PL*. TAO e LENNOX (1991) discutem em profundidade tal procedimento, empregando-o na operação de reservatórios.

Para lidar com incertezas hidrológicas, modelos de *PL* estocásticos foram desenvolvidos. Alguns exemplos são: (1) *PL* para Processo Markoviano; (2) Programação Estocástica com Recurso; (3) *Chance-Constrained Linear Programming (CCLP)* e; (4) Regras de Decisão Linear. Como exemplo de aplicação, pode-se citar BARROS e BRAGA (1991) que usaram a *PL* na otimização estocástica implícita da

operação de sistemas de reservatórios considerando usos múltiplos, REVELLE *et al.* (1969) aplicaram o método das restrições probabilísticas e DAY e WEISZ (1974), a partir de combinações de controle de cheias e diretrizes de ocupação do solo, aplicaram *PL* para a quantificação dos impactos econômicos regionais.

4.2.2.2. Programação dinâmica

Outra técnica presente em muitos estudos de otimização é a programação dinâmica. A *PD* e suas variações para aplicação em modelos estocásticos foram amplamente utilizadas em sistemas de recursos hídricos por Warren A. Hall e outros pesquisadores da Universidade da Califórnia no início da década de 60.

A popularidade e o sucesso dessa técnica podem ser atribuídos ao fato que características não-lineares e estocásticas as quais definem muitos sistemas de recursos hídricos podem ser traduzidos para uma formulação em *PD*, além de ter a vantagem de decompor efetivamente problemas de alta complexidade com um grande número de variáveis em uma série de subproblemas sendo resolvidos recursivamente (YEH, 1985).

A lista de exemplos da aplicação da programação dinâmica na operação de reservatórios é extensa na literatura. Pode-se citar como aplicações que obtiveram bons resultados HALL *et al.* (1968), BUTCHER *et al.* (1969), BRAGA *et al.* (1985).

4.2.2.3. Programação não-linear

Devido ao fato de a matemática envolvida na *PNL* ser muito mais complexa que os casos da *PL* e *PD* não acomodando eficazmente a estocasticidade dos dados hidrológicos no sistema, esta técnica não tem a mesma aceitação entre os gestores de recursos hídricos ao se comparar com outros métodos citados. Porém, a técnica torna possível lidar com problemas de funções objetivo não-separáveis e restrições não-lineares.

Além disso, conforme PORTO *et al.* (2002) os maiores problemas da *PNL* estão relacionados à incerteza de que a solução ótima obtida seja realmente a melhor entre as soluções. Na verdade, essa limitação não se deve à programação não-linear e, sim, à própria natureza de não linearidade do problema. Da mesma forma, determinados tipos

de problemas têm situações que geram dificuldades de convergência para se chegar à solução ótima.

4.2.2.4. Combinações de técnicas

A combinação de mais de uma técnica de otimização em diferentes etapas da resolução de um mesmo problema é também comumente empregado. HALL e SHEPHARD (1967, *apud* YEH, 1985) aplicaram um modelo *PD-PL* na otimização de um sistema de múltiplos reservatórios. A técnica consiste em abordar cada reservatório como um subproblema resolvendo-o por *PD* enquanto o problema principal (hidrograma de descargas e geração de energia) é otimizado por *PL*. Por outro lado, BECKER e YEH (1974) utilizaram uma forma de *PD* para a seleção da melhor política de armazenamento de um sistema de múltiplos reservatórios enquanto uma rotina de *PL* foi aplicada em cada período minimizando as perdas de energia potencial armazenada. Ou seja, adotaram uma técnica *PL-PD*.

4.2.2.5. Outras técnicas

Além destas três técnicas apresentadas, as quais já vêm sendo aplicadas há várias décadas, outras formulações têm ganhado espaço na otimização de sistemas de recursos hídricos. MAUAD *et al.* (2003), além de reafirmarem muitos assuntos já discutidos por Yeh, em 1985, apresentam algumas atualizações das inovações de métodos de otimização aplicados na análise de sistemas de recursos hídricos que ocorreram desde então. São apresentadas técnicas não-convencionais, nas quais pode-se destacar: (1) a programação baseada na lógica *fuzzy* com os estudos de KINDLER (1992) que apresentou um modelo baseado na técnica para a otimização de alocação de água multicritério e; JAIRAJ e VEDULA (2000) que aplicaram um modelo de programação linear *fuzzy* na otimização de um sistema de reservatórios, minimizando a soma dos déficits hídricos em um sistema de irrigação no sul da Índia; (2) redes neurais artificiais com o caso de NEELAKANTAN e PUNDARIK ANTHAN (1999) que desenvolveram um modelo capaz de simular a operação de um reservatório para o abastecimento de água, combinando-o a um modelo de otimização; (3) algoritmos genéticos (AG) que têm obtido grande aceitação entre os gestores de recursos hídricos. Alguns exemplos da

aplicação de AG são CELESTE *et al.* (2003) e CARRIJO *et al.* (2003) para obter formas de operação ótima de sistemas de recursos hídricos em tempo real e na otimização da operação da distribuição de água, respectivamente e, ainda, de acordo com MAUAD *et al.* (2003); (4) técnicas como *simulated annealing* (SA) e *ant colony algorithms* (ACA).

4.2.3. Modelos baseados em programação em rede de fluxo

Tendo em vista as reconhecidas vantagens da aplicação da simulação e da programação matemática conjuntamente, bem observadas por DORFMAN (1965) dizendo que, com a combinação de ambos os métodos pode-se aproveitar as vantagens de cada um compensando as desvantagens do outro, surge a programação em rede de fluxo.

De acordo com a definição de PORTO *et al.* (2002), os modelos de rede de fluxo representam sistemas de recursos hídricos por uma rede formada de nós, representando reservatórios, demandas, reversões, confluências e outros pontos importantes de um sistema, e arcos, simbolizando elos de ligação entre nós como trechos de rios, adutoras, canais e outras estruturas semelhantes.

As várias versões do MODSIM, desenvolvidas pela *Colorado State University*, baseado em modificações do modelo *Texas Water Development Board SIMYLD-II*, é um bom exemplo de modelo de rede de fluxo.

A cada dia que passa novas técnicas ganham diferentes aplicações no gerenciamento de recursos hídricos, sendo necessária uma constante atualização das novidades apresentadas pelos pesquisadores da área. Dessa forma, esta revisão foi desenvolvida de forma que melhor apresentasse o desenvolvimento do cenário atual da análise de sistemas e da programação matemática aplicadas ao planejamento de recursos hídricos. Dando continuidade, a próxima seção abordará o mesmo assunto, porém aplicados à irrigação.

4.3. Otimização de sistemas de irrigação

Pelo fato de a agricultura irrigada ser a atividade humana que retém a maior fatia do total de água consumida no mundo, a aplicação de modelos de simulação e otimização

na distribuição de recursos hídricos neste setor, torna-se extensa, sendo grande o número de exemplos encontrados na literatura.

Ao planejar um projeto de irrigação, um número de culturas deve crescer com sucesso. O problema está na etapa de se determinar quais culturas e como será realizada sua distribuição ou ainda, qual será o método de produção adotado que trará vantagens considerando-se os recursos limitados disponíveis. Deste modo, BLANK (1975) diz que, do ponto de vista de um proprietário rural ou de um projetista, o objetivo não é, necessariamente, maximizar a produção de uma única cultura, mas sim maximizar a renda líquida gerada dentro dos limites de restrições de área, água, mão-e-obra, etc.

Como foi observado na seção anterior, a utilização da *PL* em sistemas de recursos hídricos é bastante popular, situação que se repete no setor de irrigação. Devido ao fato de a maioria dos estudos relacionados à irrigação terem como objetivo a maximização da renda gerada por uma determinada cultura ou por uma propriedade ou grupo de propriedades, em função da disponibilidade de recursos escassos, a relação rendimento-déficit hídrico torna-se o principal fator na decisão do planejador. Vários estudos experimentais e de campo concluíram que estas funções são de caráter não-linear, apesar de outros afirmarem o contrário, dizendo que a não linearidade surge das perdas crescentes de água para o solo conforme se tenta chegar no suprimento total do déficit hídrico das culturas. Portanto, a frequência de técnicas rotineiramente aplicadas no gerenciamento de recursos hídricos na irrigação difere um pouco das adotadas na otimização de reservatórios multiobjetivo, de forma que técnicas como programação linear e programação não-linear e suas adaptações são as mais aplicadas em planejamento da distribuição de água na agricultura, enquanto que aplicações de *PD* são mais raras.

PAUDYAL e GUPTA (1990) aplicam a técnica da programação linear e otimização “multinível” para a maximização do rendimento global anual gerado por um grupo de irrigantes. Neste modelo, dois níveis de otimização são realizados: o primeiro maximiza a renda líquida gerada pela produção, e o segundo maximiza o uso da água superficial e minimiza os custos com armazenamento e recarga do lençol freático. Os autores consideram duas fontes de água: superficial e subterrânea. Para esse tipo de análise, taxas de recarga e dados de depleção dos níveis do lençol freático foram necessários.

Apesar de serem necessárias simplificações para obtermos o cenário ótimo, muitas considerações podem ser feitas em modelos analíticos, seja por ocasião de falta de dados ou para representar o fenômeno matematicamente, como a divisão de usuários por características físicas dentro de uma bacia.

BOMAM e HILL (1997) adotaram a *PL* para minimizar a diferença entre a demanda e a descarga das comportas do reservatório, tomando decisões operacionais diárias.

Alguns autores (TYAGI, 1986; AFZAL *et al.*, 1992) aplicaram *PL* para maximizar a renda líquida global de sistemas de irrigação considerando a interferência da salinidade das águas superficiais e subterrâneas no rendimento das culturas.

Outros bons exemplos da aplicação da programação linear na alocação de recursos hídricos em sistemas de irrigação são apresentados por MAJI e HEADY (1978; 1980) que desenvolveram um modelo estocástico, adotaram a técnica *CCLP* e a aplicaram em um projeto de irrigação na Índia. Em um segundo trabalho, os autores compararam os resultados do modelo estocástico com os obtidos a partir de uma série de dados determinísticos. MANNOCCHI e MECARELLI (1994) e MANTANGA e MARIÑO (1979) utilizaram o *modelo de Stewart* (STEWART e HAGAN, 1973; STEWART *et al.*, 1974) na otimização de sistemas de irrigação. CARVALHO *et al.* (2000) obteve épocas de cultivo ótimas de algumas culturas praticadas no perímetro irrigado do Gorotuba – MG a partir de vazões mensais pré-estabelecidas para cada usuário, enquanto que CURI *et al.* (2004) aplicaram a técnica para a maximização da receita líquida sob condições de variações hídricas e econômicas em um perímetro irrigado no noroeste da Paraíba. Neste, os autores consideraram, inclusive, a interferência do custo da água bruta na viabilidade da produção das culturas.

Com relação à aplicação de *PNL*, pode-se citar KHAN (1982) que utilizou a técnica na análise da redução do rendimento das culturas devido à salinidade do solo e a obtenção da demanda de água extra para evitá-la. WARDLAW e BARNES (1999) utilizaram a *PQ* na maximização da produtividade de culturas a partir de alocação apropriada de recursos hídricos mantendo a equidade entre diferentes blocos de irrigação e propriedades nos blocos. CARVALLO *et al.* (1998) formularam um modelo em *PNL* para maximizar a renda líquida gerada por um projeto de irrigação sujeito a restrições de disponibilidade de água, tipo de solo e mão-de-obra. No estudo, os autores usaram uma

equação relacionando o tipo de solo ao rendimento da cultura. Outros exemplos de aplicações de *PNL* são ALBUQUERQUE e LABADIE (1997) e KUMAR *et al.* (1998).

São poucos os exemplos encontrados de aplicações de *PD* na irrigação. Porém, como exemplo, pode-se citar uma aplicação pioneira de técnicas de otimização em sistemas recursos hídricos – no caso, adução de água para irrigação – feita por HALL (1961) que aplicou a programação dinâmica para a seleção analítica da seção de um canal que apresentasse o melhor fator benefício-custo global dentre várias seções analisadas de um canal de abastecimento de água para a irrigação, comparando os custos agregados e os benefícios gerados.

Modelos de simulação também são aplicados para a análise de rendimento das culturas ou obter aproximações de alternativas ótimas do desempenho do sistema de distribuição de água, avaliando as opções disponíveis. MEDEIROS e MIZAEL (2003) desenvolvem um modelo de simulação para a determinação de até que ponto é economicamente viável a aplicação de água para aumentar a produtividade das culturas e reduzir a salinidade do solo partindo de vários níveis iniciais de concentração de sais e índices distintos de lixiviação, levando-se em consideração, inclusive, o custo da água. KEPAR *et al.* (2000) descreve um modelo para a distribuição de água sob um esquema imparcial de distribuição de água entre os usuários do sistema.

Ultimamente, uma linha que tem tido muita procura para a aplicação em projetos de planejamento de irrigação é a utilização de técnicas de otimização e simulação no desenvolvimento de sistemas de suporte a decisões (*SSD*). Nesta área, a lista de trabalhos cresce a cada dia. Cita-se como exemplos CHÁVEZ-MORALES *et al.* (1992), PRAJAMWONG *et al.* (1997), KUO *et al.* (2000), MATEOS *et al.* (2002) e LEENHARDT *et al.* (2004).

5. METODOLOGIA PROPOSTA

O planejamento do uso de recursos hídricos de uma dada unidade hidrológica deve ser feito, preferencialmente, antes de o aproveitamento ter início, de maneira controlada e organizada. Quando o planejamento não é realizado desta forma, problemas como escassez de água e redução em sua qualidade, passam a gerar conflitos entre usuários em virtude da estagnação da oferta e do crescimento da demanda.

No Brasil, são vários os casos existentes de conflitos entre usuários de recursos hídricos. Por necessitarem de uma quantidade relativamente grande de água, é comum a presença de usuários do setor agrícola nestes conflitos. Por isso, uma atenção especial deve ser dada ao setor que, em sua maioria, não tem grandes cuidados com o uso dos recursos hídricos, ocasionando perdas geradas pela baixa eficiência dos sistemas de irrigação. Tal ineficiência, além de prejudicar o próprio sistema, causando quedas no rendimento das culturas e deteriorando o solo, afeta outros setores que passam a sofrer com a indisponibilidade de água.

Em muitos casos, a competição e a indisponibilidade de água podem causar mudanças na eficiência do uso da água. BAGLEY (1965) apresenta alguns exemplos de conflito entre usuários que foram solucionados através do aumento da eficiência do uso da água. O trabalho apresenta as melhorias ocorridas no uso da água com o acirramento da disputa pelos recursos hídricos em diferentes estados americanos. BISWAS (1965), em contrapartida, passa a questionar o controle do uso da água pela cobrança e argumenta que competições pelo uso da água não são suficientes para a melhora na eficiência de seu aproveitamento, e que a estes devem ser combinadas motivação, legislações e regulamentações para que haja mudanças no comportamento dos usuários de recursos hídricos.

Em países em desenvolvimento, aplicar soluções propostas para tais problemas não é tarefa simples, pois fatores econômicos estão diretamente relacionados às mudanças na prática da irrigação. Disponibilidade de mão-de-obra qualificada também influi na implementação de melhoras no sistema de irrigação, uma vez que, conforme

SOLTANI-MOHAMMADI (1972), *“a quantidade de gerenciamento inserida necessária para alcançar uma dada meta de produção varia inversamente com a qualidade da mão-de-obra empregada e diretamente com sua quantidade”*. Na obra, conclui-se que, em países em desenvolvimento, os fatores limitantes para o gerenciamento de recursos hídricos na agricultura irrigada são capital, mão-de-obra qualificada e disponibilidade de água.

Levando-se em consideração que custos relacionados à água são somados às despesas de produção, os usuários com melhor eficiência na produtividade serão capazes de distribuir tais custos para uma maior quantidade de unidades do produto. Dessa forma, o mais importante é fazer com que a água adquira o maior valor econômico por unidade volumétrica no final do processo produtivo. Análises econômicas teóricas como as apresentadas por JAMES e LEE (1971) indicam que se o uso da água acrescenta custos à produção, sua aplicação deve ser aumentada (ou reduzida) até que seja atingido o ponto de rendimento máximo da produção de forma que otimize a receita líquida. Aumentando-se a eficiência na aplicação de água no solo, é possível reduzir o consumo dos recursos hídricos, havendo a possibilidade de disponibilizar maiores quantidades de água para outros usuários. Tais metodologias vêm sendo empregadas há mais de quatro décadas, desde o surgimento do conceito de otimização da relação benefício-custo, aplicadas no processo de tomada de decisão em projetos de engenharia.

No Capítulo 3, foi discutido sobre o uso da água na agricultura e várias razões para a aplicação de água na agricultura foram apresentadas. O aumento no rendimento das culturas com a irrigação eficiente é um fato reconhecido e os riscos de perda de safra gerados pelas incertezas hidrológicas são minimizados ao garantir-se água para irrigação ao longo do ciclo.

Conforme foi apresentado no Capítulo 4, existem vários métodos e técnicas para a obtenção do melhor aproveitamento econômico dos recursos hídricos, seja por simulação ou por otimização.

Este capítulo é dedicado à apresentação da técnica de otimização escolhida para contribuir no alcance dos objetivos propostos. O modelo de programação linear proposto corresponde a um modelo estacionário determinístico. Dessa forma, o modelo

representa a operação anual do sistema de adução de água subdividido em doze intervalos de um mês cada.

No sistema linear, a função objetivo a ser maximizada trata da renda líquida gerada pelos produtores rurais enquanto que a área ocupada por uma determinada cultura nas diferentes propriedades será a variável que determinará a quantidade de água necessária para abastecer o sistema. Da mesma forma, a área coberta para a produção agrícola também influenciará nos custos requisitados e benefícios gerados. Controles de vazões serão representados como restrições do sistema, assim como as áreas disponíveis para irrigação em cada propriedade.

Algumas variações no modelo, com relação à concepção dos cenários propostos para a representação de possíveis tendências do estudo de caso, são realizadas para que, ao fim, seus diferentes resultados possam ser analisados.

5.1. Introdução aos problemas de programação linear em recursos hídricos

Esta seção, que tem como objetivo a apresentação da programação linear, foi dividida em três partes, onde, primeiramente, será apresentado um breve histórico da evolução da técnica. Em seguida, será discutida a solução de um pequeno exemplo de aplicação de *PL* em um sistema de irrigação e, finalmente, serão apresentados, brevemente, alguns algoritmos utilizados para a resolução do sistema de equações.

5.1.1. Programação linear

A *PL* é uma técnica adotada em muitos problemas onde custos e ganhos devem ser otimizados e funções objetivo e restrições do sistema real são traduzidos em formas matemáticas particularmente simplificadas. Tais problemas envolvem decisões como escolha de uma determinada quantidade de unidades de algum recurso que tenha o custo variando linearmente por unidade. Nesta técnica, não somente as decisões e restrições devem ser lineares, mas também as funções objetivo.

O desenvolvimento concomitante de duas técnicas, na primeira metade do século passado, motivou o desenvolvimento da *PL*. O primeiro, feito por John Von Newman, quando publicou o teorema central da Teoria dos Jogos, em 1928 (VON NEUMAN, 1928), que mais tarde foi formulada através da *PL* e interpretada com base na teoria da dualidade. O segundo, em 1936, partiu do desenvolvimento da análise *input-output* definida por um modelo matricial linear que posteriormente veio a ser utilizado sob forma de um Problema de Programação Linear (*PPL*), apresentado por Leontief no paper “*Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States*” (LEONTIEF, 1936).

No entanto, a técnica foi primeiramente utilizada em termos matemáticos formais por G. B. Dantzig, em 1947, para resolver problemas de logística da Força Aérea Americana. Ocorreu um período de rápido desenvolvimento e aplicações a problemas de gerenciamento da produção, que antes eram resolvidos por experiência e indução.

A primeira solução bem-sucedida de *PPL* de grande porte ocorreu em 1952 em um computador do *National Bureau of Standards* e, no ano seguinte, quando os computadores passaram a ser produzidos em linha, foi possível a dar início à popularização da técnica, com quase todos os computadores acompanhados de uma rotina *PL* de fácil utilização e entendimento, sendo esta uma das ferramentas mais largamente utilizadas. O surgimento de pacotes computacionais de *PL* para sistemas informatizados e a incorporação do *Solver* ao *Microsoft Excel* têm um papel importante na disseminação da técnica.

A formulação geral para a aplicação da técnica em um *PPL* “*corresponde à descrição matemática do problema que se está modelando. É a etapa básica da PL, onde serão definidas as variáveis e suas relações, reconhecidas as restrições relevantes ao caso em estudo e expressos os objetivos*” (LINS, no prelo). Todos os problemas consistem, basicamente, em: (1) variáveis de decisão, consideradas relevantes ao problema, passíveis de quantificação e disponibilidade; (2) função objetivo, que descreve as relações que se deseja otimizar no problema e; (3) restrições que correspondem aos elementos restritivos que todo problema possui.

Um *PPL* é definido da seguinte forma:

$$\text{Maximizar} \quad F(x_1, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (5.1)$$

Sujeito a

$$r_1(x_1, \dots, x_n) = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$$
$$r_2(x_1, \dots, x_n) = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2$$
$$r_3(x_1, \dots, x_n) = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + \dots + a_{3n}x_n \leq b_3$$

...

$$r_m(x_1, \dots, x_n) = a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m$$

onde $F(x_1, \dots, x_n)$ é a função objetivo a ser maximizada, x_j ($j = 1, \dots, n$) representa as variáveis do sistema e n é a quantidade de variáveis. As restrições são representadas por $r_i(x_1, \dots, x_n) \leq b_i$, onde $i = 1, \dots, m$, todas em função das variáveis x_j e, por sua vez a_{ij} , b_i e c_i representam constantes do sistema.

As limitações no uso de *PPL* para representar sistemas reais devem-se aos pressupostos que somos obrigados a adotar de forma a operacioná-los. Os mais importantes são a *proporcionalidade* que implica na desconsideração de economias de escala e na ausência de custos iniciais para a implantação da alternativa x_j , ou seja, os preços unitários são constantes, independentemente das quantidades em que são adquiridos; *aditividade* que define a inexistência de interações entre as alternativas de atividades, tanto na função objetivo quanto nas restrições, isto é, o preço unitário de um recurso não pode variar, condicionado à aquisição de outro e; *divisibilidade* o qual pressupõe que as variáveis de decisão podem ser fracionadas.

O sistema de inequações 5.1 estabelece a formulação geral de um problema de programação linear. Nos casos de problemas de minimização, o sistema é similar exceto pela direção dos sinais das inequações.

No setor da agricultura irrigada, a *PL* adquire diferentes aplicações, que podem variar de acordo com o regime de abastecimento, das condições dos canais de adução, com o intervalo de tempo modelado ou se as séries de dados serão estocásticos ou determinísticos. Também podem ser aplicados para a obtenção de dados quantitativos como a área irrigada ou o volume disponibilizado para irrigação e para lixiviação. HALL e DRACUP (1970) definiram alguns sistemas de inequações para solucionar problemas no planejamento de recursos hídricos. Para o caso de *alocação sazonal ótima*

de um aqueduto de capacidade fixa, os autores propõem o seguinte sistema de inequações:

$$\text{Maximizar} \quad L = \sum_{j=1}^n l_j a_j \quad (5.2)$$

$$\text{Sujeito a} \quad \sum_{j=1}^n h_{ij} a_j \leq V_i \quad i = 1, \dots, l$$

$$\sum_{j=1}^n a_j \leq A$$

onde:

L representa o somatório de todo o lucro gerado por um sistema de irrigação composto por usuários que possuem áreas a_j irrigadas ($j = 1, \dots, n$) cobertas por n culturas cada qual rendendo l_j por safra.

h_{ij} corresponde à lâmina d'água aplicada na irrigação da cultura i no intervalo de tempo t na área a_j . O volume total disponível no intervalo de tempo t para abastecer toda a demanda das n culturas irrigadas não poderá ultrapassar V_i , enquanto que toda a área ocupada pelas mesmas n culturas não poderá superar A .

Outros problemas de programação linear foram descritos a partir deste sistema de inequações, cada um representando diferentes aspectos do sistema analisado.

Para uma melhor compreensão da estrutura dos problemas de programação linear, um exemplo numérico será apresentado a seguir.

5.1.2. Introduzindo um problema de PL (PPL)

Considere dois usuários, U_1 e U_2 , cultivando, respectivamente, as culturas C_1 e C_2 . Tais culturas possuem, por ciclo de cultivo, déficits hídricos e receitas líquidas específicas, como apresentado na Tabela 5.1. As áreas irrigáveis A_1 e A_2 são ambas de 75 hectares e a vazão total Q_{total} disponibilizado no canal ao longo dos ciclos de cultivo das culturas é de 240.000 m³.

Tabela 5.1 – Déficit hídrico e receita líquida das culturas C_1 e C_2 .

Cultura	Déficit Hídrico (m ³ /ha)	Renda Líquida (R\$/ha)
C1	4000	5000
C2	3000	4000

Se a função objetivo é maximizar a receita líquida L gerada pela produção de ambas as propriedades e se definirmos como variáveis a_1 e a_2 , apresentadas no sistema linear 5.2, sendo, respectivamente, as áreas irrigadas dos usuários 1 e 2, teremos o seguinte *PPL*:

$$\begin{aligned}
 &\text{Maximizar} && L = 5\,000 a_1 + 4\,000 a_2 && (5.3) \\
 &\text{Sujeito a} && 0 \leq a_1 \leq 75 \\
 & && 0 \leq a_2 \leq 75 \\
 & && 4\,000 a_1 + 3\,000 a_2 \leq 240\,000
 \end{aligned}$$

A função objetivo determina o lucro máximo gerado pelas culturas C_1 e C_2 , cultivadas, respectivamente, nas áreas a_1 e a_2 . Será esta a equação que determinará a área que cada usuário poderá irrigar após o *decisor* efetuar a repartição da água disponível. As inequações determinam os limites das áreas de cada propriedade entre zero (*condição de não-negatividade*) e a área máxima irrigável, enquanto a 3ª inequação representa as restrições quanto à disponibilidade de água aduzida pelo canal para o abastecimento do sistema. As três últimas inequações são denominadas *equações de restrição*. É a partir delas que são representados os limites físicos ou de recursos naturais e de mão-de-obra.

Para um problema de duas variáveis, a solução pode ser representada graficamente. Na *solução gráfica*, cada variável é representada por um vetor.

A Figura 5.1 apresenta o plano formado por dois eixos, cada um representando uma variável (a_1 e a_2). Em seu interior, estão traçadas as condições exigidas pelas duas primeiras inequações que representam as restrições das áreas irrigáveis.

Da mesma forma, a Figura 5.2 apresenta a região no plano onde o volume de água disponível para a irrigação é capaz de abastecer ambos os usuários. A reta, que representa o limite da terceira inequação, corresponde às infinitas possibilidades de ocupação do solo com a distribuição de Q_{total} para as atividades agrárias.

Porém, caso apenas uma figura seja utilizada para solucionar o problema, pode ocorrer a situação em que a solução obtida em uma não esteja dentro da região de soluções da outra. Portanto, o conjunto de todas as equações de restrição define uma região no espaço denominada *região factível*, dentro da qual qualquer ponto representa uma solução possível para o sistema, dados os requisitos exigidos. Assim, a Figura 5.3 apresenta a região factível inscrita no polígono delimitado com linha cheia.

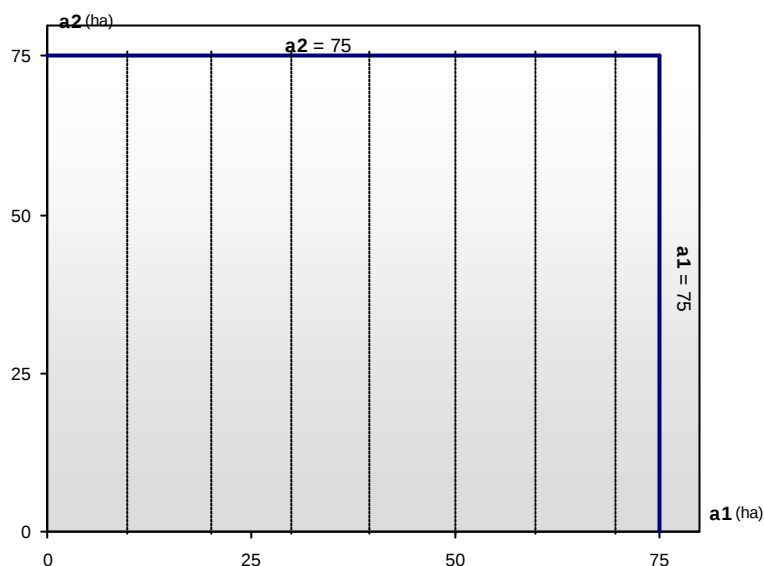


Figura 5.1– Região factível do problema de alocação ótima de água com relação à área irrigável.

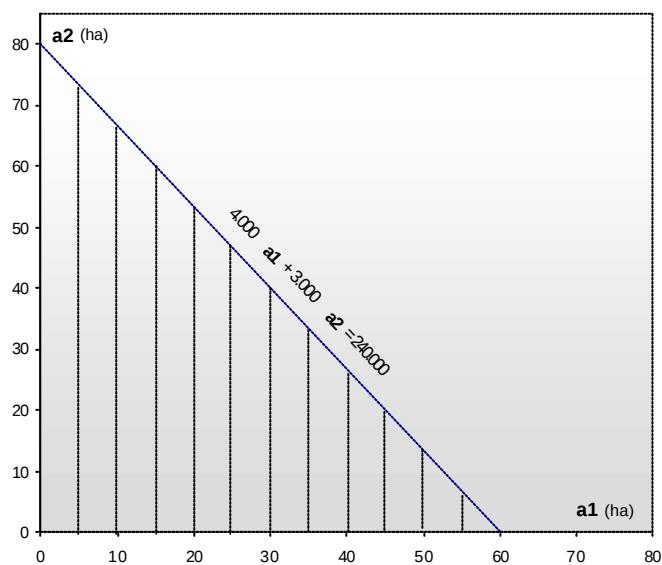


Figura 5.2 – Região factível do problema de alocação ótima de água com relação ao volume de água disponível.

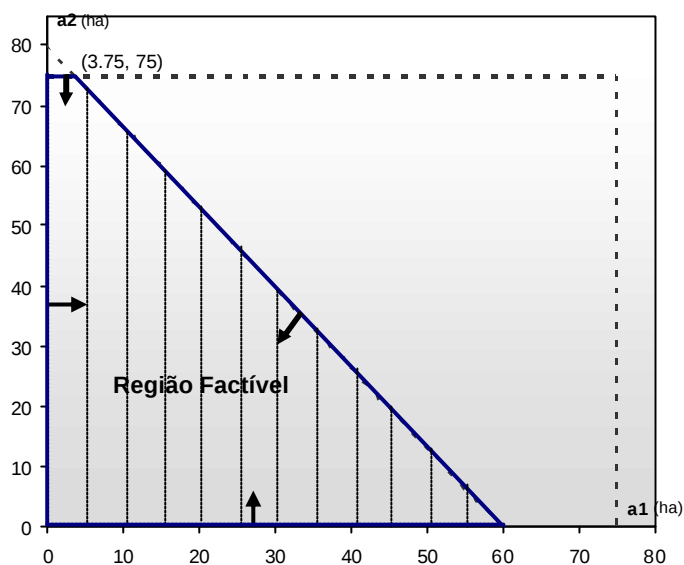


Figura 5.3 – Região factível do problema de alocação ótima de água com relação à área irrigável e ao volume de água disponível.

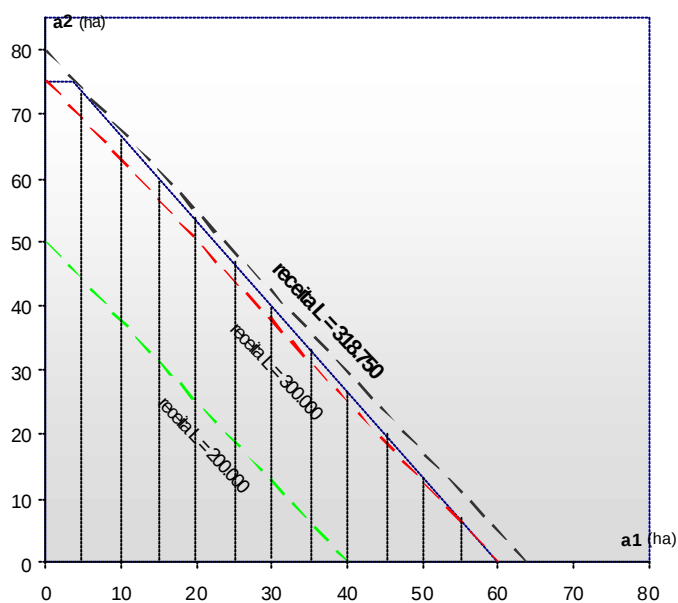


Figura 5.4 – Variação da função objetivo e solução ótima do problema de alocação de água.

Para a obtenção da solução ótima, é necessário analisar a série de resultados obtidos com a substituição das variáveis a_1 e a_2 na função objetivo pelos valores dos pontos existentes dentro da região factível. Algumas retas pontilhadas representando possíveis soluções para o problema são apresentadas na Figura 5.4. O cenário ótimo prescrito pelo

sistema de equações é alcançado quando uma das retas passa sobre o ponto (3.75, 75), atingindo o valor de R\$ 318.750,00. Qualquer outra quantia obtida na região factível será inferior a esta.

É interessante observar a diferença entre a receita líquida ótima obtida e a resultante da simulação de distribuição pelo potencial de produção, onde a variável com maior peso na quarta inequação do sistema de inequações 5.3 seria a que receberia o valor máximo admissível, zerando a segunda. Nesta segunda hipótese, seria obtida uma receita líquida de R\$ 310.000,00. Talvez a diferença possa ser relativamente pequena, porém, em casos reais em que grandes diferenças de produtividade e eficiência no uso da água podem ser encontradas, a diferença passa a ser decisiva para o processo de gestão da produção.

Soluções gráficas estão limitadas a situações de duas variáveis, não tendo aplicabilidade em problemas de recursos hídricos de maior complexidade, nos quais a quantidade de variáveis pode chegar a centenas.

5.1.3. Algoritmos

O método *Simplex* foi o primeiro a ser desenvolvido para a solução de problemas de *PL*. Foi George Dantzig que, em 1947, desenvolveu o algoritmo que teve origem concomitante ao surgimento da própria programação linear. Em 1978, KHACHIYAN (1979) desenvolveu o *algoritmo de elipsóides* e, posteriormente, KARMARKAR (1984) publicou outro algoritmo classificado na categoria dos *algoritmos dos pontos interiores*.

5.2. Representação matemática dos aspectos físicos, agronômicos e financeiros considerados

Após esta breve introdução a respeito da programação linear aplicada a problemas de alocação de recursos hídricos em sistemas de irrigação, torna-se necessário definir todos os fenômenos que serão considerados no modelo adotado neste estudo, a partir das simplificações impostas pela técnica. Tais simplificações do cenário real, ainda que não afetem a complexa relação entre os componentes do sistema, são definidas por ROGERS (1968) como *cena preliminar*.

5.2.1. Clima

5.2.1.1. Evapotranspiração potencial

Dada a indisponibilidade de dados levantados no local do projeto, pode-se obter os valores das evapotranspirações potenciais mensais através da relação entre a ETp e a ETo . Tal relação é considerada através do coeficiente de cultura k_c , quando o abastecimento de água supre plenamente os déficits hídricos da cultura. Esta relação é dada pela equação:

$$ETp = ETo \times k_c \quad (5.4)$$

5.2.1.2. Precipitação efetiva

Para a obtenção das lâminas de PPe , adotou-se o método da proporção evapotranspiração/precipitação - *evapotranspiration/precipitation ratio method* - do *U.S. Soil Conservation Service* (USDA-SCS). O método consiste em determinar as precipitações efetivas a partir de características do solo, do tipo de cultura e da precipitação média mensal (PP), tomando como base a capacidade de água disponível de 75mm, enquanto que a relação entre as médias mensais da PPe e da PP para diferentes valores de médias mensais de ETp são apresentadas na Tabela A.1.

A *CAD* limita-se à umidade do solo na zona radicular. Para adaptar os valores obtidos às características do solo da região analisada, ou seja, capacidades de água disponível diferentes de 75mm, é necessário multiplicar a PPe por um fator de armazenamento fa apresentado na Tabela A.3. Estes fatores estão relacionados com diferentes valores de *CAD* do solo na área de projeto.

Com o intuito de facilitar e agilizar a determinação das PPe , optou-se por realizar ajustes nos valores das tabelas, determinando equações quadráticas através de regressões polinomiais que representem as variações das PPe com relação às PP , para cada valor médio da ETp da cultura. A Figura A.1 apresenta as curvas obtidas a partir dos dados tabelados, representadas pelas equações da Tabela A.2.

Apesar de toda a complexidade expressa pelo método, salienta-se que a precipitação efetiva dependerá do teor de umidade do solo imediatamente antes da chuva se iniciar. No caso da ocorrência de uma chuva logo após a irrigação, não haverá efetividade

alguma. Além disso, outros agravantes como a infiltrabilidade do solo interferem no valor final da *PPe*, tornando sua estimativa imprecisa.

5.2.2. Solo

Toda classificação de terras, de acordo com suas características de aptidão agrícola, tem como objetivo, segundo a SONDOTECNICA (1984b), *“agrupá-las segundo suas qualidades para suportar uma agricultura permanente, ou seja, com caráter prospectivo, tentando, dentro de determinado marco, estabelecer o comportamento da terra uma vez submetida à exploração agrícola. No caso de uma agricultura irrigada, definir a aptidão da terra serve, também, para um melhor aproveitamento dos recursos hídricos disponíveis”*.

Dentre as características consideradas para a classificação do solo segundo sua aptidão, temos a *CAD*. Este atributo é utilizado no método adotado para a determinação da efetividade das chuvas que ocorrem sobre o solo, apresentado na seção anterior. De acordo com o método, um solo com baixa capacidade de armazenamento de água reterá um percentual menor da precipitação. Isso influenciará na *NIL* da planta, de forma que solos com menos aptidão para irrigação requererão maior quantidade de água para o suprimento do déficit hídrico das plantas, enquanto solos mais aptos, por reterem maior quantidade de água de chuva, dependem de menos água para a irrigação.

5.2.3. Culturas

A seleção das culturas foi feita a partir de dados levantados em pesquisa de campo e consulta a projetos de irrigação realizados para a região. Após identificar as culturas de projeto, foram levantadas as seguintes informações: (1) demanda hídrica das culturas; (2) profundidade efetiva do sistema radicular (3) rendimento potencial das culturas em condições favoráveis de desenvolvimento e; (4) valores de mercado.

5.2.3.1. Demanda hídrica das culturas

A necessidade hídrica de cada cultura proposta neste trabalho será definida como a *ETp* e esta demanda deverá ser totalmente suprida pela *PPe* e, complementarmente, pela

irrigação. Ou seja, caso tenha sido estabelecido que uma cultura deva ser produzida por um produtor, este, obrigatoriamente, deverá suprir totalmente o déficit hídrico da planta, de forma que o rendimento potencial não se altere. Tal pressuposto é justificado com conclusões tomadas após a compilação de alguns estudos, indicando que não é econômico, em regiões de escassez de água, irrigar-se áreas gerando pequenas produtividades, impondo-se altos níveis de stress hídrico, sendo mais lucrativo irrigar-se intensamente áreas menores, minimizando o stress, ou mesmo, anulando-o, pelo menos em fases críticas do ciclo do cultivo (OTTONI FILHO, 1988).

5.2.3.2. Profundidade efetiva do sistema radicular

Para cada tipo de cultura, a taxa de ocupação de suas raízes aumenta, conforme a planta se desenvolve, na fase de crescimento vegetativo, até alcançar uma determinada profundidade. O valor da Z_r representa, em termos médios, a profundidade onde se concentra cerca de 80% do sistema radicular. É nessa camada de solo que estará contida a água disponível para as culturas.

Na literatura, alguns autores (DOOREMBOS e KASSAM, 1979; GOMES, 1999) apresentam faixas de valores de Z_r de culturas comumente encontradas. Porém, para simplificação do modelo matemático, foram adotados valores médios das faixas propostas pelos autores. A Tabela A.5 apresenta tais faixas adotadas para esse trabalho.

5.2.3.3. Rendimento potencial

O rendimento potencial (Y_p) de uma cultura pode ser visto de diversas maneiras. Dependendo da situação, este coeficiente pode ser representado por diferentes unidades: ton/m³ (toneladas por metro cúbico de água); R\$/ha (Reais por hectare cultivado); R\$/ton (Reais por tonelada da cultura produzida); etc. Neste estudo, será utilizado o conceito de ton/ha, ou seja, número de toneladas por hectare cultivado. Este valor é específico de cada cultura e condição climática e varia de acordo com as práticas de cultivo e irrigação.

5.2.3.4. Valores de mercado

A mudança das condições de mercado altera a distribuição das culturas nas propriedades, ao longo da vida útil de um projeto de irrigação. Dessa forma, valores previstos sob condições normais devem ser adotados para o planejamento de sistemas de irrigação. JAMES e LEE (1971) recomendam a adoção dos preços normais ou médias nos casos em que for necessário estimar fluxos de caixa futuros em estudos de viabilidade. De outra forma, a possibilidade do projeto dependerá de anormalidades do mercado de curta duração. Portanto, para a determinação dos valores das culturas considerados nos cálculos, propõe-se a utilização dos *preços normalizados, na moeda corrente, ao longo do ano mais recente*. Aos custos relacionados à implantação do projeto de irrigação da cultura serão aplicadas as mesmas considerações.

5.2.4. Irrigação

A *NIL* é definida como o déficit hídrico das plantas menos a contribuição da *P_{Pe}*, ou seja, toda a água necessária para suprir a demanda hídrica por irrigação, desconsiderando-se as perdas do sistema. O conceito pode ser representado matematicamente como:

$$NIL = ET_p - P_{Pe} \quad (5.5)$$

Entretanto, nenhum sistema de irrigação está isento de falhas. Para obtermos a vazão realmente demandada para a irrigação, ou seja, a necessidade de irrigação bruta, deve-se considerar as perdas de água ocorridas ao longo do processo de irrigação até a chegada da água nas raízes.

$$NIB = \frac{NIL}{ef} \quad (5.6)$$

5.2.6. Balanço hídrico

O balanço hídrico de um trecho de rio ou canal possibilita a determinação da quantidade de água que estará disponível a um usuário, considerando-se perdas distribuídas e localizadas, além de outros usos e contribuições ao longo do percurso analisado.

De maneira simplificada, a equação do balanço hídrico pode ser expressa da seguinte forma:

$$Q_k = Q_{k-1} + E - S \quad (5.7)$$

onde:

Q_k determina a vazão corrente na seção k ; Q_{k-1} determina a vazão corrente na seção $k-1$; E corresponde às entradas de água entre as seções $k-1$ e k e; S corresponde às saídas de água entre as seções $k-1$ e k .

Entretanto, as variáveis E e S podem ser decompostas em componentes mais detalhadas. Como exemplo, a Figura 5.5 apresenta diversos tipos de uso, como captação, consumo e diluição. No caso, as captações para uso industrial e agrícola (S_1 e S_2 , respectivamente) representam *saídas* enquanto contribuições de afluentes (E_2), retorno de efluentes industriais e agrícolas (E_1 e E_4) e *runoff* (E_3) representam *entradas* no trecho apresentado e o diferencial das vazões de montante e de jusante correspondem ao somatório das *entradas* e *saídas*:

$$\frac{dQ}{dS} = \sum_{i=1}^n (E_i - S_i) \quad (5.8)$$

onde:

dQ/dS corresponde à variação da vazão no espaço, admitindo-se E_i e S_i constantes no tempo.

Sabe-se que a prática da irrigação não é constante ao longo do tempo, ou seja, é feita pontualmente, em determinados intervalos de tempo de algumas horas ou alguns dias, passando um tempo até que se repita o processo. No entanto, por se tratar de planejamento de distribuição de água em intervalos mensais, considerou-se apenas a demanda média mensal, de forma que não haja alterações de captações dentro do intervalo de tempo mensal.

Apesar de *saídas* de água de um rio ou canal ocorrerem por diferentes causas, como evaporação da superfície líquida, infiltração no solo, percolação profunda, entre outros, admitiu-se como significativa apenas o uso da água pelos irrigantes. Por tratar-se de um manancial para abastecimento de água em sistemas de irrigação, os usos considerados

em um trecho do corpo hídrico, entre as seções hipotéticas k e $k+1$, foram os das áreas cobertas por plantações das propriedades rurais que o circundam, com suas respectivas necessidades de irrigação.

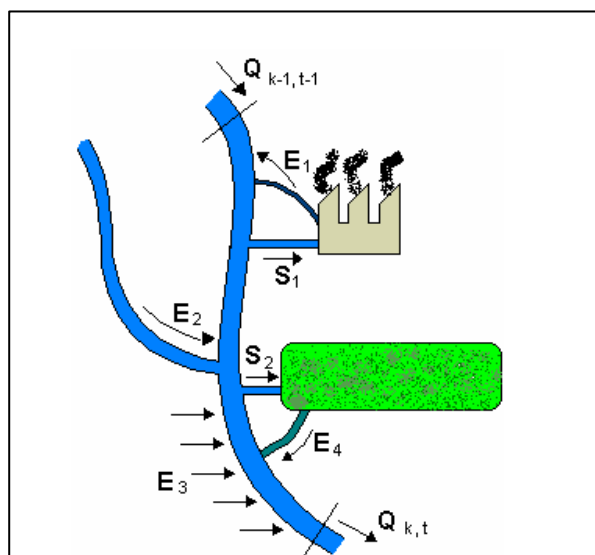


Figura 5.5 – Esquema hipotético de entradas e saídas de água em um trecho de rio.

Os valores obtidos com as Equações 5.5 e 5.6 são, normalmente, apresentados em lâminas d'água mensais (mm/mês). Para se obter as quantidades em unidades volumétricas, basta conhecer as áreas irrigadas por cada lâmina calculada, obtendo-se a equação:

$$q = NIB \times a \quad (5.9)$$

onde:

a é a área irrigada com a lâmina d'água NIB e; q equivale à vazão necessária para irrigar uma área a com uma lâmina d'água NIB .

A contribuição por *runoff* não entrará no balanço, pois supõe-se que, ao haver escoamento superficial causado pela precipitação, o solo estará em sua capacidade de campo, não havendo a necessidade de irrigação após a ocorrência da chuva. Como no sistema não está previsto, a princípio, a instalação de reservatórios para a regularização do abastecimento de água, a contribuição por *runoff* torna-se dispensável.

Como as quantidades de água solicitadas em cada ponto de captação estão relacionadas às áreas das propriedades, que são variáveis do modelo, torna-se necessário a imposição de vazões máximas em pontos onde a capacidade de bombeamento, de adução ou referente a algum outro limitador físico sejam fatores restritivos no escoamento de vazões.

5.2.7. Benefício-custo

Até agora, todos os itens apresentados neste capítulo foram dedicados à descrição e representação matemática dos aspectos físicos e agronômicos que ocorrem em um sistema de irrigação, de forma que seja possível determinar quantidades de água necessárias para irrigar uma determinada região.

Técnicas de otimização requerem a presença de uma grandeza em comum entre todos os fatores analisados no modelo, de forma que seu somatório global seja maximizado ou minimizado (isso dependerá do objetivo do modelo), atingindo a solução ótima. Esta grandeza pode ser expressa de diferentes maneiras. Na grande maioria das vezes por recursos, sejam eles limitados ou não. Entretanto, o uso mais freqüente são os recursos financeiros. Neste trabalho, estabelecemos a moeda corrente brasileira, o Real (R\$). A função objetivo será composta pelos benefícios econômicos retornados aos usuários (renda bruta gerada pela produção agrícola) e os custos (gastos necessários para dar início à produção agrícola e sua posterior manutenção), representados pela Equação 5.10.

$$L_i = B_i - C_i \quad (5.10)$$

onde:

L_i , B_i e C_i representam, respectivamente, os somatórios do lucro (ou renda líquida global), do benefício ou renda bruta gerada e dos custos necessários para a implantação e manutenção da produção agrícola dos i agricultores usuários do sistema de adução de água.

5.2.7.1. Benefício

A renda bruta B gerada por uma cultura pode ser determinada a partir do seu preço unitário no mercado produtor, da produtividade e o tamanho da área que ela cobre na propriedade ⁷, conforme apresentado na Equação 5.11.

$$B = P \times Y_p \times a \quad (5.11)$$

onde:

P simboliza o preço da cultura por tonelada.

5.2.7.2. Custos

O custo pode ser definido como qualquer despesa que venha a surgir ao longo da vida útil de um projeto. Estes custos podem ser decompostos em duas categorias: os custos fixos e os custos variáveis (Equação 5.12).

Os custos fixos correspondem às despesas referentes à implementação do projeto, em função de seu tamanho e invariáveis com o tempo (Equação 5.13). Os custos variáveis referem-se às despesas ao longo dos anos do projeto com a manutenção. No caso de um projeto de irrigação, consideramos como custo fixo o valor médio por unidade de área necessário para a instalação do sistema de irrigação (Equação 5.14). Custos com o preparo do solo, tratos culturais, aquisição de sementes e implantação do sistema de irrigação podem ser considerados como fixos. Por outro lado, custos com a captação da água são considerados variáveis por não serem constantes ao longo dos meses. Uma cultura, por exemplo, que tenha uma vida útil produtiva de seis anos e com safras anuais a partir do segundo ano terá uma única ocorrência de gastos com preparo do solo e plantio, seis ocorrências com tratos culturais (uma por ano) e cinco com colheitas.

$$C = CF + CV \quad (5.12)$$

$$CV = cv \times a \quad (5.13)$$

$$CF = cf \times a \quad (5.14)$$

⁷ No caso da policultura, basta somar os benefícios gerados pelas diferentes culturas, ou seja, $B = \sum_{c=1}^n P_c Y_{p_c} a_c$ (n é o número total de culturas).

onde:

CV e CF representam os custos variáveis e os custos fixos, respectivamente, com a irrigação no período do projeto e; cv e cf simbolizam, respectivamente, o custo variável (no tempo) e o custo fixo com a irrigação por unidade de área irrigada.

A quantificação precisa, tanto dos valores dos benefícios quanto dos custos gerados, é de difícil determinação. Estas quantias podem sofrer grandes variações regionais. Preços de mercado das culturas podem sofrer oscilações ao longo do ano, enquanto que os custos fixos são função das culturas, as quais algumas podem requisitar mais gastos com tratamentos culturais do que outras.

5.3. Modelo proposto

Seguindo os critérios apresentados anteriormente, desenvolveu-se o modelo proposto. O sistema a ser otimizado corresponde a um canal de adução de irrigação responsável pelo fornecimento de água para diversos usuários, produzindo uma ou mais culturas e captando água em diferentes pontos ao longo do canal.

O modelo pode ser formulado aos moldes do *PPL* da Equação 5.2. A Função objetivo corresponde à maximização da Equação 5.15. As variáveis são as áreas ocupadas por cada uma das culturas cultivadas por cada proprietário. Desta maneira, a função objetivo resulta na seguinte equação:

$$\text{Maximizar } L = \sum_{i=1}^N \sum_{c=1}^{NC} a_{i,c} \left[\left(P_c \times Y_{p_c} \times \gamma_c \right) - n \cdot \left(cf_c + \sum_{t=1}^{12} cv_c^t \right) \right] \quad (5.15)$$

onde:

os índices t , i e c correspondem aos coeficientes de contagem dos 12 meses do ano, dos N irrigantes usuários dos recursos hídricos e das NC culturas disponíveis para a produção, respectivamente, e; g_c corresponde ao número de colheitas da cultura c que ocorrem nos n anos de projeto (6 anos).

As restrições do sistema de equações ocorrem tanto no balanço hídrico quanto na disponibilidade de terra irrigável. Do balanço hídrico temos a disponibilidade máxima de água para os irrigantes no mês t . Enquanto que da disponibilidade de terra irrigável

saem os limites superiores e inferiores das variáveis $a_{i,c}$ do sistema. Entretanto, devemos primeiramente escrever a equação que define as vazões para cada ponto de captação k :

$$Q_k^t = \sum_{i=1}^N \sum_{c=1}^{NC} NIB_{i,c,k}^t \cdot a_{i,c,k} \quad \forall t, k \quad (5.16)$$

ou ainda, usando a Equação 5.9 na 5.16,

$$Q_k^t = \sum_{i=1}^N \sum_{c=1}^{NC} q_{i,c,k}^t \quad \forall t, k \quad (5.17)$$

Ou seja, para cada ponto de captação k ao longo do corpo hídrico, haverá uma vazão Q_k^t variando mês a mês, correspondendo ao somatório das vazões captadas por todos os usuários vinculados àquele ponto. A retirada de cada usuário é dada pelo somatório em c que envolve a soma dos produtos das necessidades de irrigação bruta de cada cultura pela área cultivada a .

Poderá, ainda, haver situações em que as vazões admissíveis em algumas seções do canal estarão limitadas, como é o próprio caso da vazão de cabeceira do corpo hídrico. Dessa forma, uma segunda restrição com relação à vazão é imposta, conforme a Inequação 5.18.

$$Q_{\max_k}^t \geq \sum_{x=k}^K Q_x^t \quad \forall t, k \quad (5.18)$$

onde:

$Q_{\max_k}^t$ corresponde à vazão máxima admissível na seção k ; Q_x^t é a vazão total requerida por todos os usuários que captam água num determinado ponto de derivação k no intervalo de tempo t ; x é o coeficiente de contagem dos pontos de captação a jusante da seção k e incluindo o mesmo e; K representa o número total de pontos de derivação de água no corpo hídrico (contado de montante para jusante).

A Inequação 5.18 diz que vazão requerida pelos usuários a jusante de uma determinada seção deve ser menor ou igual à a vazão máxima admissível na mesma. A Figura 5.6 pode representar mais claramente o conceito supracitado.

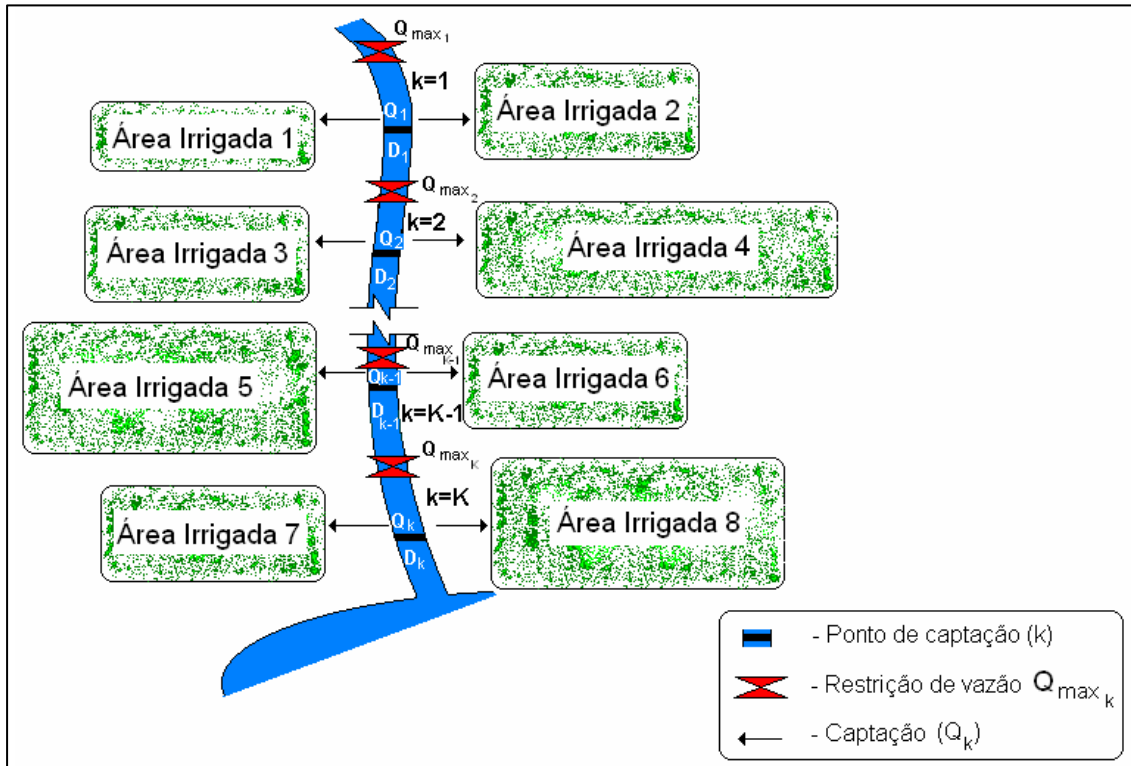


Figura 5.6 – Esquema de distribuição de água em um canal de irrigação.

As restrições quanto às áreas máximas e mínimas de cada cultura irrigada são traduzidas pelas Inequações 5.19 e 5.20, que dizem, respectivamente, que somatório das áreas ocupadas pelas diferentes culturas em qualquer intervalo de tempo e em qualquer propriedade deve ser menor ou igual à área da mesma e que a o somatório das áreas ocupadas por uma mesma cultura em todo o sistema deve ser maior que a_{min} e menor que a_{max} , onde, mais adiante, na apresentação dos cenários, serão definidos os intervalos de máximo e mínimo para cada cultura.

$$A_i \geq \sum_{c=1}^{NC} a_{i,c} \quad \forall i \quad (5.19)$$

$$a_{max_c} \geq \sum_{i=1}^N a_{i,c} \geq a_{min_c} \quad \forall c \quad (5.20)$$

Finalmente, a Inequação 5.21 apresenta a condição de não-negatividade do sistema, apenas para a resolução do sistema:

$$a_{i,c} \geq 0 \quad \forall i, c \quad (5.21)$$

5.3.1. Alocação de recursos hídricos entre os usuários

Dois métodos distintos para a alocação de água foram utilizados para a otimização do modelo. Um tem como objetivo simular a distribuição de água entre os usuários por quotas, e o segundo visa maximizar a receita líquida gerada pelos usuários do sistema de abastecimento. Tais métodos são apresentados a seguir.

5.3.1.1. Alocação por quotas

Diversas modalidades de distribuição de água em sistemas de irrigação podem ser adotadas, conforme a necessidade dos irrigantes. CARMO FILHO (1978) propõe algumas modalidades, dos quais umas se adequam a situações de escassez. São elas:

a) Sistemas de porcentagem fixada

- Quota ou porção
- Rotação

b) Sistemas prioritários

- Turno
- Áreas prioritárias
- Cultivo prioritário
- Sistemas de demandas

Destes sistemas, o adotado neste estudo corresponde ao de porcentagem fixada, mais especificamente, o de quotas ou porções. Este procedimento, segundo o autor, leva à determinação do porcentual para cada agricultor, pela quota admitida no sistema, atribuída pelo organismo gestor, ou através de outros meios legais. Optou-se por utilizar como critério para a determinação de quotas a área irrigável de cada propriedade. Tais quotas serão determinadas de acordo com o coeficiente Co obtido pela Equação 5.22. A equação define a razão entre a vazão total e a área total irrigável no trecho onde a primeira se faz disponível. Para a obtenção da quota de cada usuário, multiplica-se Co

pela área irrigável do usuário conforme é mostrado na Equação 5.23, obtendo-se a fração de água disponível ao mesmo.

$$Co_k^t = \frac{Q_k^t}{\sum_{i=1}^N A_{i,k}} \quad \forall t, k \quad (5.22)$$

$$q_{i,k}^t \leq A_{i,k} \times Co_k^t \quad \forall t, i, k \quad (5.23)$$

onde:

Co é o coeficiente que define a quota de vazão por unidade de área irrigável para os usuários a jusante de um determinado trecho e; q_{max} representa a vazão máxima que um usuário pode captar em um dado intervalo de tempo no seu respectivo ponto de captação.

Nos casos em que, para determinados trechos de um canal, restrições de vazão devido a problemas na condutividade hidráulica do canal, causadas por razões adversas, limitarem o abastecimento dos usuários a jusante do mesmo, sem que irrigantes a montante sejam afetados, torna-se claro que as quotas dos usuários serão distribuídas distintamente, conforme a disponibilidade máxima de recursos hídricos no trecho do canal onde estes estarão localizados. Ou seja, o coeficiente Co para o cálculo da quota de um usuário será a menor dentre todos os que estiverem a montante de seu ponto de captação, enquanto que os usuários a montante do ponto com um Co pequeno se beneficiarão com o aumento da disponibilidade de água que se tornou indisponível para os usuários de jusante.

5.3.1.2. Alocação por otimização da receita líquida global

Propõe-se com este método de distribuição de água, a maximização da renda líquida gerada pelos usuários do sistema, ou seja, não haverá quotas para cada produtor, mas sim a alocação dos recursos hídricos disponíveis para os que tiverem o maior rendimento hídrico, ou seja, maior retorno líquido por metro cúbico de água captada. A imposição, nesta situação, se limita a restringir o total de água demandada pelos usuários a jusante de uma seção em um valor igual ou menor à vazão disponível neste ponto. Esta situação é traduzida pela Equação 5.18 apresentada anteriormente.

6. ESTUDO DE CASO

Após as inúmeras obras de saneamento e drenagem executadas na região da Baixada Campista pelo extinto DNOS, todo o regime hidrológico da região foi alterado. Antes das obras, quando chegavam os períodos de cheia, a região Norte Fluminense, mais especificamente na margem esquerda do rio Paraíba do Sul, entre os municípios de São Fidélis e São João da Barra, se comportava como uma segunda foz do rio, quando as águas vertiam pelas suas margens e corriam para a baixada em direção à lagoa Feia ou para o mar. Entretanto, após alterações hidráulicas obtidas pela construção de diques, os limites da bacia do Paraíba do Sul no curso inferior passaram a corresponder às próprias margens do rio.

Neste novo cenário, a Baixada Campista está, hoje, inserida na bacia hidrográfica da lagoa Feia (BLF). Porém, ao se considerar que os canais são “usuários” do rio Paraíba do Sul por terem pontos de captação neste manancial, optou-se por entender o caso como localizado na bacia hidrográfica do mesmo rio.

Portanto, nos itens a seguir, serão apresentados um breve histórico da origem dos canais e a situação atual que se estabeleceu. Em seguida, serão descritas as características gerais da bacia hidrográfica da lagoa Feia e, depois, a bacia de drenagem do canal Coqueiros, de forma que toda a região envolvida seja contextualizada.

6.1. O passado e a situação atual

A região Norte Fluminense já foi, um dia, constituída por diversos rios e centenas de lagoas brejos e canais perenes e sazonais. Esta condição de território alagadiço deve-se ao fato de que a região se encontra numa planície abaixo do nível da água do rio Paraíba do Sul. Este transfere suas águas subterraneamente para a Baixada e, em tempos anteriores, também o fazia quando suas águas vertiam pelas suas margens nos períodos de cheia. Nessa época, nos mesmos períodos de cheia, outros rios que correm na baixada transbordavam, inundando depressões do terreno, ampliando o espelho d'água

de mais de uma centena de lagoas interconectadas por uma rede de canais e brejos⁸. A reduzida declividade e o grande volume de água acumulado, ora pela contribuição da chuva, ora pela transferência do rio Paraíba do Sul, criavam condições adequadas à inundação.

6.1.1. Breve histórico

De acordo com antigos estudiosos da região, a primeira grande obra de engenharia hidráulica executada na Baixada dos Goytacazes data do final do século XVII, chefiada pelo capitão José Barcelos Machado. Desde então, inúmeras outras obras para o controle de inundações e drenagem do solo com a finalidade de expandir as fronteiras agropastoris em terras dessecadas, em especial a lavoura de cana-de-açúcar, foram executadas. Estas obras, além de outras propostas de intervenção, são descritas com detalhe por diversos autores ao longo dos anos (BRITO, 1924; BRITO, 1943; GÓES, 1934, LAMEGO, 1974 BIDERGAIN *et al.*, 2002; CARNEIRO, 2004).

Porém, as obras de saneamento da Baixada Campista se iniciaram, de fato, no ano de 1883 com a Comissão do Major Rangel de Vasconcellos, nomeado pelo governo imperial. Após esta comissão, algumas outras foram estabelecidas com o mesmo intuito até que, em agosto de 1933, a Comissão de Saneamento da Baixada Fluminense foi criada, o que configurou o marco inicial das grandes transformações na hidrografia da Baixada. Esta deu lugar, em 1940, ao Departamento Nacional de Obras de Saneamento, o DNOS. Desde então, até a sua extinção em 1989, o órgão executou inúmeras obras de saneamento na Baixada Campista, sempre com a influência da aristocracia rural da região nas tomadas das decisões (CARNEIRO, 2004).

O DNOS tinha como missão institucional *“executar a política nacional de saneamento geral e básico, atuando no saneamento rural e urbano, na defesa contra inundações, controle de enchentes, recuperação de áreas para aproveitamento agrícola ou instalação de indústrias e fábricas, combate à erosão, controle da poluição das águas e instalação de sistemas de abastecimento de água e esgoto (...) entretanto, o grande teatro de operações do DNOS continuava sendo a Baixada Fluminense e, dentro dela, a*

⁸ Acredita-se que existiam cerca de 106 lagoas na bacia hidrográfica da lagoa Feia (BIDERGAIN *et al.* (2002).

Baixada dos Goytacazes” (BIDERGAIN *et al.*, 2002). Todo esse processo de dessecação de brejos, lagos e lagoas, além de áreas de inundações intermitentes durou até a década de 60, quando as principais obras de drenagem foram concluídas, agregando novas extensões de solo fértil ao sistema produtivo da Baixada Campista.

Portanto, a nova hidrofisionomia da Baixada do Goytacazes havia sido traçada pelo DNOS: cheias periódicas do rio Paraíba do Sul eram contidas, parte pelos diques, parte transportada para a lagoa Feia através dos canais artificiais com suas comportas manobráveis nas tomadas d’água. Daí, o escoamento dava sequência até o oceano através do canal das Flechas, aberto na década de 40, centralizando toda a drenagem da baixada para o mar.

Concomitantemente com o acelerado crescimento econômico da região, ocorrido na década de 70 e impulsionado pela monocultura da cana, várias usinas passaram a se instalar na planície, que já havia sido entregue à agroindústria açucareira. Com a modernização dos processos de refino do açúcar, o que implicou em grande acréscimo na capacidade de processamento da cana-de-açúcar, veio junto a ociosidade na produtividade das indústrias, pois as produções na lavoura não acompanharam tal desenvolvimento, o que gerou a insatisfação dos usineiros.

Neste contexto, passa a haver, de forma crescente, pressões para a difusão de uma nova prática de apropriação dos recursos hídricos dispostos na região: a irrigação. Conforme CARNEIRO (2004), os usineiros e produtores de cana começaram a atribuir a responsabilidade pela “crise agrícola” ao recrudescimento dos períodos secos.

Vários programas, criados a partir do início da década de 70 até o ano de 1984, serviram para fomentar o desenvolvimento da agroindústria na região Norte Fluminense. A seguir, é feita uma breve menção a eles e as respectivas datas de criação. Maiores detalhes podem ser encontrados em SONDOTECNICA (1984a).

Programa de Racionalização da Agroindústria Açucareira, criado em 1971 e, posteriormente, em 1973, renomeado com o nome de Programa de Apoio à Agroindústria Açucareira; Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL), criado em 1972; Programa Especial do Norte Fluminense (PRODENOR), criado em 1974; Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-Açúcar (PLANALSUCAR), entre outros.

Com a implementação do Programa Nacional do Alcool (PROALCOOL), novos esforços foram dados a partir do poder público ao fomento da produção das usinas assim como financiamentos com condições favorecidas de prazo e juros subsidiados.

6.1.1.1. PROJIR

Em 1982, com o objetivo de estudar e analisar diferentes alternativas de sistemas hidráulicos visando o suprimento de água necessária para complementar o déficit hídrico na planície, o Instituto do Açúcar e do Alcool contratou a empresa de consultoria Sondotécnica, e que, de acordo com CARNEIRO (2004), “... *foi, sem dúvida, o mais detalhado e abrangente estudo até hoje realizado no Norte Fluminense visando o aumento das áreas irrigadas*”. Foi considerado, na época, como o primeiro passo para concretizar o projeto de irrigação das lavouras de açúcar do Norte Fluminense, cobrindo uma área de projeto de, aproximadamente, 200 mil hectares.

6.1.1.2. Início dos conflitos pelo uso da água na região

Os conflitos em torno da água na região vêm sendo registrados desde a década de 70. Em 1976, foi apresentada a primeira manifestação formal questionando o DNOS sobre os impactos de suas obras aos ecossistemas locais pelo então diretor do Departamento de Recursos Naturais Renováveis da Secretaria Estadual de Agricultura e Abastecimento.

Ainda nesta mesma década, outras manifestações demonstrando a insatisfação pública com relação aos impactos causados ao meio ambiente com as obras de drenagem da Baixada dos Goytacazes, realizadas pelo órgão, foram apresentadas. Um dos impactos citados foi o causado pelas intervenções realizadas na lagoa Feia que, segundo Norma Crud Maciel e Dorothy Sue Dunn de Araújo, biólogas da FEEMA, em um parecer técnico sobre o impacto causado aos ecossistemas lacustres com as obras realizadas pelo DNOS na Baixada Campista, em outubro de 1979, desde 1895 a lagoa vinha sofrendo reduções em água, flora e fauna (*ibid*, 2004).

Além do conflito entre ambientalistas e o órgão público com suas intervenções na região, há outros exemplos de conflitos registrados em torno da água entre: (1)

pescadores e a agroindústria; (2) usinas e produtores rurais e; (3) produtores rurais entre si.

6.1.2. Situação atual dos canais

Com a extinção do DNOS, no final da década de 80, junto com intervenções pontuais nos canais executadas de acordo com os interesses particulares de cada usuário, foram deixados na planície cerca de 1.500 km de canais e valões de drenagem, muitos dos quais assoreados ou com sérios problemas hidráulicos, rios retificados, lagoas e brejos reduzidos, comportas emperradas e dragas apodrecendo. Com a extinção do DNOS, também se foi a quase totalidade de seu acervo que apodreceu consumido por traças e fungos abandonado em galpões ou passou a fazer parte de coleções particulares ou, ainda, foi vendido para sebos. Atualmente, existe catalogado apenas uma pequeníssima parte do acervo, mantido no Arquivo Nacional onde relatórios elaborados pelo DNOS podem ser encontrados.

Além da série de problemas ocorridos com a extinção do órgão, o assoreamento, a presença de lixo e a recepção de efluentes domésticos tornam a água dos canais, em alguns trechos, impróprias para o uso agrícola. Tal cenário demonstra a urgência para que haja a mobilização dos usuários dos diferentes setores junto ao governo para que providências com relação à gestão dos canais sejam posta em prática. Diferentes propostas oriundas dos atores envolvidos na problemática são descritas por CARNEIRO (2004). Dentre elas estão a (1) criação de um órgão gestor dos canais com saber técnico; (2) criação de um consórcio; (3) criação de um “comitê privado” e; (4) associações de irrigantes vinculadas aos canais de drenagem.

A primeira proposta baseia-se em soluções hidráulicas de manejo de água para o atendimento da demanda através de um eficiente sistema de monitoramento automático de comportas, operado remotamente por telemetria, e dos níveis de água ao longo dos canais, além da implantação de um centro de irrigantes e a monitoração hidrológica da baixada. Esse projeto foi proposto pela TECNORTE (TECNORTE, no prelo) e orçado em R\$ 37 milhões.

A segunda propõe a criação de um espaço público onde haja negociações entre os atores e que isso auxilie os detentores do conhecimento técnico nas tomadas de decisão. Neste contexto, surge a proposta de um grupo de discussão denominado GT-FOZ, o qual pretende constituir-se num campo de evidenciação e proposição de soluções para os conflitos entre os diversos agentes.

A proposta do terceiro modelo gira em torno da continuidade do regime ocorrido na época do DNOS. Dessa forma, muitas vezes, os coniventes desse modelo opõem-se às intervenções de órgãos governamentais gestores de recursos hídricos e meio ambiente.

O último modelo é a favor da criação de associações de usuários dos canais (irrigantes) onde a outorga seria concedida a grupos de usuários de um mesmo canal (ou canais) que tivessem em comum o mesmo ponto de captação no rio Paraíba do Sul.

6.2. Caracterização da região

6.2.1. Bacia hidrográfica da lagoa Feia

A bacia hidrográfica da lagoa Feia tem superfície aproximada de 2.955 km², considerando o canal das Flechas, que funciona como principal escoadouro de suas águas para o oceano. É uma bacia hidrográfica estadual por ter seus limites totalmente inseridos dentro do Estado do Rio de Janeiro, no Norte Fluminense. Eles são, ao norte e ao noroeste, a bacia do rio Paraíba do Sul, a Oeste, a bacia do rio Macaé e, ao sudoeste, uma pequena bacia litorânea formada por um conjunto de lagoas e lagunas, onde se sobressai a de Carapebus. Ao sudoeste, seus divisores de água são pouco perceptíveis e constituem-se de elevações arenosas situadas no encontro da unidade meridional de tabuleiro da região Norte Fluminense com a restinga.

A BLF abrange, parcialmente, o território de seis municípios, a saber: Carapebus, Quissamã, Conceição de Macabu, Campos dos Goytacazes, Trajano de Moraes, Santa Maria Madalena e São João da Barra. Estes municípios têm uma população total de 495.405 habitantes, de acordo com o Censo do ano 2000, realizado pelo IBGE. No entanto, estima-se que a população destes municípios que habita dentro dos limites da bacia seja de, no máximo, 360 mil habitantes (BIDERGAIN *et al.*, 2002). A distribuição

da área de cada município ocupada pela bacia, assim como a contagem populacional de cada um, de acordo com o IBGE, são apresentadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Informações gerais dos municípios integrantes da bacia da lagoa Feia.

Município	Área total (km ²)	Área da bacia hidrográfica da lagoa Feia		Percentual da bacia da lagoa Feia	População dos municípios em 2000
		Absoluta (km ²)	relativa (%)		
Campos dos Goytacazes	4.037,8	1.617	40,0	54,7	406.511
Quissamã	717,7	356	49,6	12,0	27.503
Sta Maria Madalena	817,7	350	42,8	11,8	18.706
Conceição de Macabu	385,5	168	43,6	5,7	13.668
São João da Barra	461,9	246	53,3	8,3	10.336
Carapebus	306,4	48	15,7	1,6	10.030
Trajano de Moraes	590,9	170	28,8	5,8	8.651

Fonte: Projeto Planágua semads/GTZ.

6.2.1.1. Sub-bacias e rios contribuintes

Dividir a bacia da lagoa Feia não é tarefa fácil, haja vista a interligação dos canais afluentes entre ela e o canal Campos-Macaé, e a conexão de alguns com o rio Paraíba do Sul. Entretanto, BIDERGAIN *et al.* (2002), definem como sub-bacias da BLF: as dos canais do Sudoeste; do rio Macabu; dos canais do Noroeste; do rio Ururaí; dos canais da Barra do Furado e; das lagoas do Noroeste. Dentre essas, destaca-se a sub-bacia do Furado, que abrange a região drenada pelo canal Coqueiros. Infelizmente, naquele trabalho não são apresentadas imagens ilustrando as delimitações das sub-bacias descritas.

6.2.2. Canal Coqueiros

O canal Coqueiros foi selecionado dentre todos os outros existentes na região devido às suas características físicas e hidráulicas que geram conflitos entre os usuários agrícolas. Além disso, este é um canal de expressivo uso de água na irrigação.

O canal é um longo curso artificial, com cerca de 45 km de comprimento e uma área de influência como elemento drenante de, aproximadamente, 29.000 ha. Seu percurso se inicia na área urbana de Campos, partindo daí rumo ao sul. Suas comportas de adução e a estrutura que as abriga, necessitam de reparos imediatos devido ao abandono e à falta de um órgão que coordene ou se responsabilize pelo seu funcionamento e manutenção.

Ao passar próximo a localidade de Tocos, assume rumo leste e faz uma curva contornando de longe a lagoa Feia, até o canal São Bento. No seu trajeto, recebe valas e canais secundários que drenam poucas lagoas remanescentes.

Este importante canal tornou-se um problema, já que expressiva parte de sua extensão (cerca de 7500 m) está inserida no perímetro urbano de Campos e, coincidentemente, em alguns lugares, as seções transversais são muito altas e o subsolo mostra camadas de areia que sofrem desmoronamentos constantes, alterando as quotas do fundo, além de servirem como depósito de lixo e esgoto sanitário para a população residente às suas margens (NAVIA, no prelo).

Em decorrência dessas circunstâncias, efetivar limpeza e manutenção, nesse percurso, tornou-se um exercício extremamente complicado, motivos que levaram a TECNORTE (no prelo) a propor o revestimento desses trechos problemáticos.

O segmento rural apresenta problemas semelhantes. Em alguns trechos ao longo do canal existem depressões no relevo ocasionado pela drenagem de algumas lagoas. É nessas depressões que, nos períodos de chuva, concomitantemente com a precária manipulação das comportas de controle de vazão dos canais, aflora água oriunda da elevação do lençol freático, prejudicando as plantações, pois reduzem a quantidade de oxigênio no solo, causando problemas no crescimento das culturas ou mesmo condenando toda a safra.

Na área rural, a partir do décimo quilômetro a contar das comportas, sua importância na drenagem das terras agrícolas de suas margens é muito expressiva porque permite o uso de centenas de hectares da planície onde as quotas são bastante baixas e os solos muito heterogêneos e não raramente salinizados.

Levando em consideração que este canal venha a ser usado como adutor de água para irrigação intensivamente, a elevação do lençol nesses trechos deve ser controlada para que não haja danos na produção dos proprietários rurais. Portanto, uma maneira de se impedir a saturação do solo na zona radicular é controlar a vazão afluyente nesses trechos, de forma que níveis de água desfavoráveis não sejam atingidos.

Portanto, o uso deste curso de água para fins de adução, terá que ser rigorosamente controlado e monitorado permanentemente para se identificar, não só os níveis relativos e absolutos do lençol freático, como também a físico-química da água em função da

inversão da sua finalidade e do volume aduzido para se estabelecer limites técnicos no que diz respeito a seu uso (NAVIA, no prelo). Aliás, esse procedimento deverá se tornar norma para todos os canais da Baixada Campista.

6.2.2.1. Problemas hidráulicos

A adução de água do canal Coqueiros ocorre a partir de dois pontos distintos: sua própria comporta no rio Paraíba do Sul e a partir do canal Cambaíba, através de um canal de ligação (canal São José) entre os dois, cujo entroncamento se dá a seis quilômetros, aproximadamente, a contar das comportas do primeiro.

A adução do canal Coqueiros é bastante prejudicada nos períodos secos, já que a quota da soleira de sua comporta está em elevações desfavoráveis para a adução de água ⁹. Apesar da instalação de um sistema de bombeamento composto por quatro moto-bombas na cabeceira do canal Coqueiros, a adução principal para esse canal se dá via canais Cambaíba-São José, pois neste não ocorrem problemas de adução no rio Paraíba do Sul.

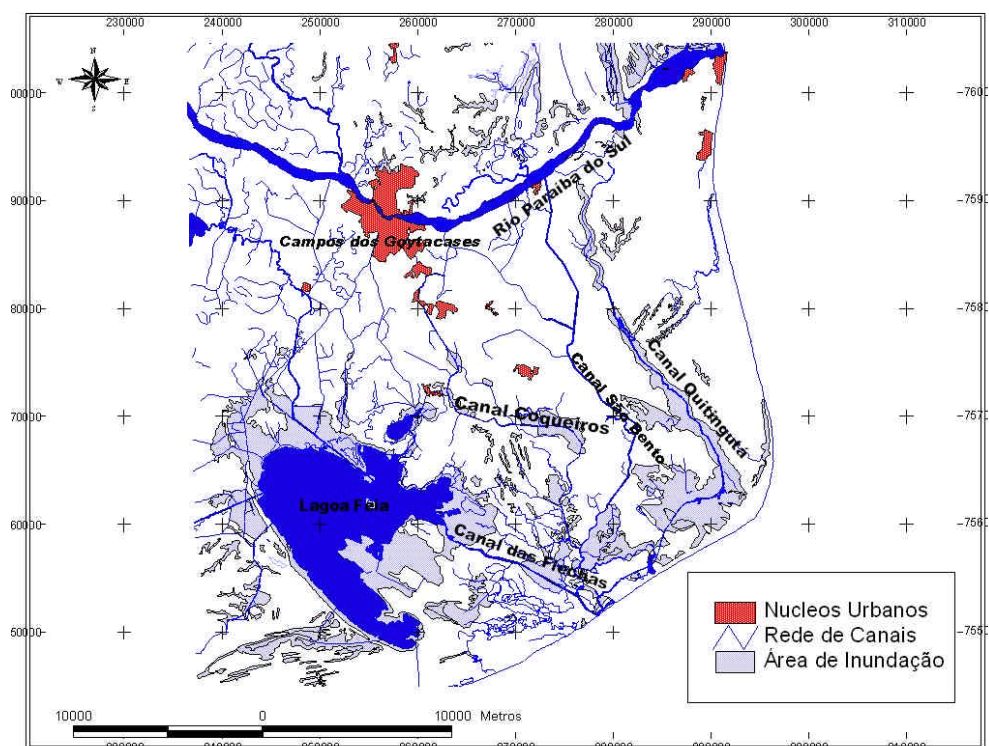
Nota-se que para a realização de um estudo minucioso para a utilização plena do canal como meio de adução de água para a irrigação exigem dados os quais não existem, ou, quando existem, pelo fato de terem sido levantados há muitos anos, não são mais representativos devido ao caráter sazonal ou a modificações nas características físicas da região.

Motivado por tais carências de informações, ALMEIDA (no prelo) propõe uma série de estudos para o levantamento de informações hidrológicas e de usos de água visando o desenvolvimento das diretrizes para o gerenciamento dos recursos hídricos da região. No entanto, nenhum projeto de vulto foi executado desde o PROJIR.

Com base em cartas do PROJIR e outras fornecidas pela TECNORTE, foi possível a construção de uma imagem georreferenciada no *software ArcView*, como mostrado na Figura 6.1, de onde foram processadas todas as informações necessárias para a aquisição de dados, essenciais para o desenvolvimento deste estudo.

⁹ 2,67 m na Convenção IBGE.

Nota-se que, a partir do cenário apresentado, um estudo que trate do planejamento da distribuição de água na região abastecida por estes canais se torna uma tarefa complexa, pois algumas considerações deverão ser tomadas. Estimativas relacionadas à delimitação da região que os canais abastecem, limites de cada propriedade, níveis do lençol freático, e capacidade máxima de escoamento no canal, entre outras, são abordadas com maiores detalhes mais adiante.



Fonte: Adaptado de TECNORTE (no prelo).

Figura 6.1 – Imagem georreferenciada do sistema hídrico da Baixada Campista, no Norte Fluminense.

6.2.3. Clima

6.2.3.1. Evapotranspiração de referência

A ET_o adotada para o cálculo da demanda hídrica das culturas produzidas na bacia estudada foi obtida a partir de dados climatológicos (precipitação, temperaturas mínima, média e máxima do ar, umidade relativa do ar média mensal, evaporação do tanque Classe A, evaporímetro de piche, velocidade mínima, média e máxima do vento, insolação e radiação) adquiridos no Campus Leonel Miranda da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ (AZEVEDO *et al.*, 2000). O método utilizado para a

determinação da *ETo* foi o de Penman-Monteith que, de acordo com MENDONÇA *et al.* (2003), que realizaram comparações com dados levantados pelo método do lisímetro, fornece resultados compatíveis com as características climatológicas da região. Os valores das *ETo* mensais são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Evapotranspiração de referência (*ETo*) de Campos dos Goytacazes.

Mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Total Anual
<i>ETo</i> (mm)	166,8	162,5	162,3	132,8	110,1	97,5	99,8	114,9	112,2	127,2	135	147,5	1568,6

6.2.3.2. Precipitação

Apesar de ser uma região que, por vários séculos, vem sendo utilizada para o cultivo da cana-de-açúcar, ao se analisar dados climatológicos de séries históricas da localidade, é possível constatar que o Norte Fluminense apresenta condições desfavoráveis para a produção de culturas com altas taxas de evapotranspiração.

Fenômenos climatológicos que vêm sendo constatados na região e analisados por MARQUES *et al.* (no prelo) dão indícios de que esteja ocorrendo um processo de diminuição do regime pluviométrico ao longo das últimas décadas e que podem ter implicações negativas nas atividades dependentes dos recursos hídricos desses locais.

Em tal estudo, algumas conclusões foram alcançadas das quais destacam-se: (1) a constatação de um decréscimo nos valores anuais de precipitação entre 1961 e 2000, chegando a 30% em Campos dos Goytacazes; (2) nos últimos cinco anos, a estação de Campos apresentou precipitação cerca de 25% inferior à média climatológica; (3) as localidades representativas das regiões Norte e Noroeste do Estado do Rio de Janeiro apresentam déficit anual de água no solo em todos os meses do ano; (4) em termos médios, estas mesmas localidades apresentam-se com características de regiões semi-áridas e; (5) a evolução nos últimos seis anos revela que os índices de umidade do ar tendem a decrescer, assumindo valores característicos de clima semi-árido e os índices de aridez tendem a crescer, atingindo valores característicos de clima com grande deficiência de umidade na estação seca.

Seguindo as colocações apresentadas no parágrafo anterior e aplicando-as aos dados levantados no Posto Climatológico Leonel Miranda, duas séries de precipitações médias

foram obtidas, uma dos anos de 1975 a 2003 e outra, de 1999 a 2003, como apresentadas na Tabela 6.3.

Observa-se que, de fato, a precipitação média anual dos cinco anos correspondentes à série de 1999/2003 neste posto é, aproximadamente, 10% menor que a constatada na série de 1975/2003.

Tabela 6.3 – Precipitações médias mensais - Posto Campos Leonel Miranda (UFRRJ): séries 1999/2003 e 1978/2003.

Mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Média Anual
PP (mm) 1975/2003	106,1	61,0	75,0	73,4	47,0	30,0	29,7	31,6	70,0	89,5	130,5	143,0	886,8
PP (mm) 1999/2003	106,3	56,2	53,8	39,5	40,9	35,1	21,1	33,7	68,2	60,2	144,0	148,3	807,4

Seguindo a hipótese apresentada, optou-se por utilizar as precipitações médias do intervalo 1999/2003 por representar melhor a situação atual da região.

Pode-se observar com clareza a distribuição irregular da chuva ao longo do ano, havendo grande discrepância entre os meses de novembro a janeiro e de fevereiro a outubro. Nota-se também que apenas nestes três meses, chove o equivalente a 49% (398,7mm) do total anual (com relação à série 1999/2003), havendo um pico, em dezembro, de 111mm e um mínimo de 16mm em julho. Tal fenômeno pode causar grande déficit hídrico nas plantas.

6.2.3.3. Precipitação efetiva

Como foi explicitado na seção 5.2.1.2, a *P_{Pe}* será determinada de acordo com o tipo de solo, evapotranspiração potencial e profundidade da zona radicular da cultura e a intensidade da precipitação.

6.2.4. Solo

As classes de solos identificadas na área da Baixada Campista ocorrem de forma caótica quanto à sua distribuição geográfica, como reflexo da própria gênese da planície, que

sofreu influência marinha em certas épocas e, em outras, o aporte de materiais muito recentes de deposição fluvial, principalmente do rio Paraíba do Sul. A formação geológica da região é descrita em detalhes por LAMEGO (1974).

De acordo com SONDOTÉCNICA (1984b), os solos da planície fluvial do rio Paraíba do Sul e áreas de influência da lagoa Feia podem ser categorizados em: (1) solos aluviais; (2) solos semidesenvolvidos não-hidromórficos; (3) solos com expressiva gleização e; (4) solos salinos e tiomórficos. A classificação destes solos se divide em subclasses com características mais específicas.

6.2.5. Culturas

Atualmente, a cultura dominante em toda a Baixada Campista é a cana-de-açúcar, havendo, no entanto, alguns focos de fruticultura distribuídos pela região. Entretanto, outras seis culturas foram propostas para a modelagem. A seleção de tais culturas foi feita com base nos estudos do PROJIR e FRUTIFICAR.

Além da cana-de-açúcar, o PROJIR propôs uma série de culturas acreditando na possibilidade de implantar-se a policultura na região dominada pela monocultura açucareira. Foram elas: cenoura, tomate, melão, milho, feijão. Dentre estas opções, apenas duas foram consideradas neste trabalho: o tomate e a cenoura. O critério adotado para selecionar estas duas culturas foi a utilização dos valores de mercado regionais, baseados em dados do ano de 2004, levando à conclusão que o tomate e a cenoura são as mais rentáveis. Também foram propostas quatro fruteiras pelo projeto FRUTIFICAR do Governo do Estado (abacaxi, coco, goiaba e maracujá), as quais foram inseridas no modelo. No entanto, nenhum estudo que contemple a policultura baseada na fruticultura irrigada jamais foi desenvolvido para a região. Apesar de o Projeto FRUTIFICAR propor a produção das fruteiras irrigadas, nenhum estudo definindo a adequabilidade de tais plantas foi desenvolvido. Desta forma, a grande maioria dos dados necessários para o preenchimento do modelo foram obtidos em publicações da EMBRAPA (COELHO *et al.* 2000) ou estimadas através de critérios propostos por DOOREMBOS e PRUITT (1974) e DOOREMBOS e KASSAM (1979). Os valores de *kc* adotados são apresentados na Tabela A.4.

Uma característica fundamental das culturas para a definição da disponibilidade de água no solo, que influencia também na determinação da *P_{Pe}*, é a profundidade efetiva da

zona radicular. Algumas referências definem alguns intervalos de profundidade da Zr para algumas culturas (*ibid*, 1979; GOMES, 1997). Neste trabalho, foram utilizados valores próximos às profundidades médias propostas, os quais são apresentados na Tabela A.5. Assim, torna-se possível a obtenção dos déficits hídricos ($ET_p - PPe$) de cada cultura para cada tipo de solo. Os resultados são apresentados na Tabela A.7.

6.2.6. Irrigação

Os métodos de irrigação propostos neste trabalho são os usualmente indicados pela literatura para alcançar bons rendimentos de cada cultura (DOOREMBOS e KASSAM, 1979; COELHO *et al.* 2000; GOMES, 1997). Cada planta possui sua peculiaridade que está associada a um melhor rendimento conforme a maneira que se aplica água. Normalmente, as diferentes culturas se adaptam mais a uns métodos que a outros. As conclusões tiradas das informações obtidas nas referências supracitadas são que a irrigação por aspersão é a melhor aceita pela maioria das culturas, com exceção do maracujá e do coco que se apropriam melhor ao sistema de gotejamento. A Tabela A.6 lista os métodos de irrigação considerados para cada cultura e as respectivas *ef* adotadas.

6.2.7. Balanço hídrico

6.2.7.1. Disponibilidade hídrica

Apesar de a região Norte Fluminense apresentar características de clima semi-árido e índices de precipitação bastante baixos em alguns meses, outras fontes de recursos hídricos fazem com que a água seja abundante na região da Baixada Campista, chegando, inclusive, a causar problemas, como já foi visto anteriormente. Além da chuva, outras duas fontes são claramente distinguidas: as águas subterrâneas e o rio Paraíba do Sul.

Águas subterrâneas

Estima-se que grande quantidade de água potável esteja armazenada em profundidades a partir de 70 metros da superfície da baixada. CAPUCCI (no prelo), objetivando

demonstrar esta disponibilidade de recursos hídricos, combinou a perfilagem geofísica realizada em determinados poços com resultados qualitativos dos poços em operação na faixa costeira, obtendo um contorno aproximado da cunha da água doce. Assim, de acordo com os dados de transmissividade hidráulica obtidos, foi deduzido que o volume de água potável encontrada no subsolo da Baixada e que se escoar ao mar é várias vezes superior à vazão do rio Paraíba do Sul em sua foz.

Neste estudo, foram utilizados dados de vários poços espalhados pela região. Entretanto, todos os poços citados são destinados ao abastecimento doméstico de municípios e bairros situados no Norte Fluminense.

Devido à falta de controle do poder público, não há registros oficiais de poços para abastecimento agrícola na região. Portanto, a disponibilidade hídrica subterrânea não será considerada neste estudo. Porém, após a realização de um levantamento mais detalhado dos poços existentes no local, propõe-se um outro estudo de planejamento considerando tais fontes de água.

Rio Paraíba do Sul

Apesar das obras de drenagem realizadas, a região disponibiliza de grande quantidade de água proveniente do rio Paraíba do Sul. A partir de séries históricas dos anos de 1964 a 2002 obtidas em medições no posto fluviométrico da Ponte Municipal (Campos dos Goytacazes), disponíveis na *HidroWeb* (ANA, 2004), pôde-se gerar alguns dados importantes com relação à disponibilidade hídrica na região. Com estes dados, foram montadas algumas curvas, apresentadas na Figura 6.2. Observa-se que a vazão média mensal máxima ocorre em janeiro com $2735 \text{ m}^3/\text{s}$ enquanto que a média mensal mínima ocorre em agosto com $318 \text{ m}^3/\text{s}$. De acordo com LABHID (2002^a), a Q_{95} (vazão com 95% de permanência no tempo) é de $301,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Mesmo considerando uma vazão ecológica de 50% da total disponível, nota-se a grande disponibilidade de água existente neste trecho do rio, considerando que não há nenhum outro uso representativo até a foz, além da água captada para a irrigação e a manutenção dos canais da Baixada Campista.

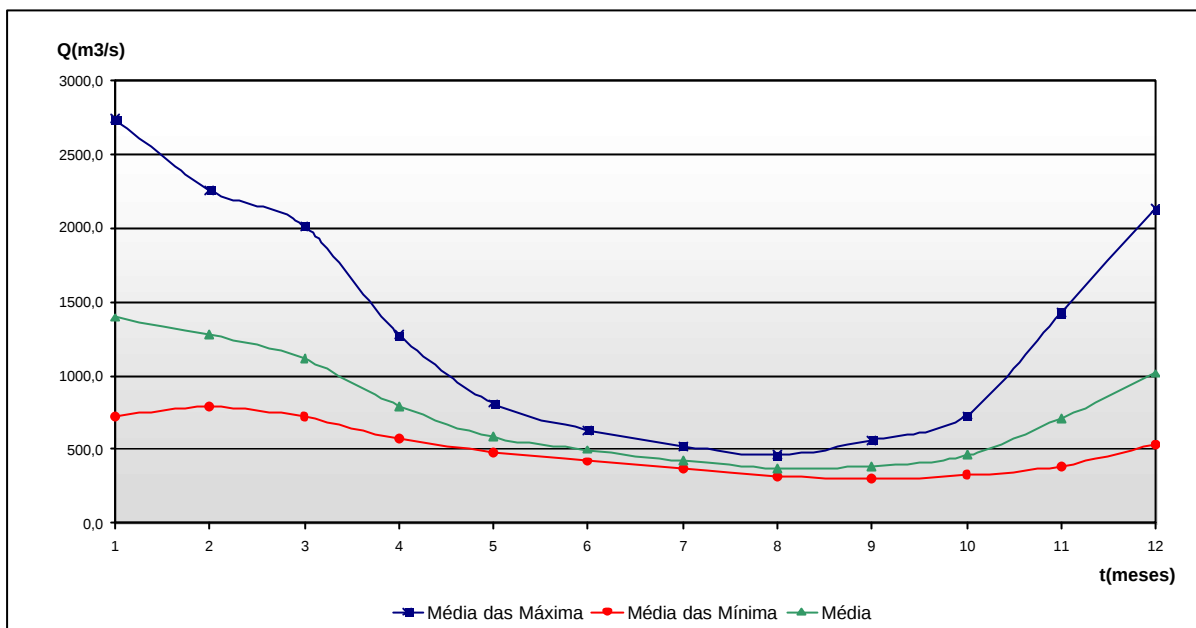


Figura 6.2 – Vazões mensais no período 1964-2002 do posto fluviométrico Ponte Municipal – Campos dos Goytacazes.

Capacidade de adução do canal

Alguns fatores limitantes, como restrições hidráulicas nos canais, tornam a disponibilidade de água na região “virtual”. O primeiro limitador é a própria capacidade de captação de água do canal Coqueiros. Nos períodos de cheia, quando o rio está em quotas elevadas, a condução de água no canal se dá de forma livre. Entretanto, nos períodos de estiagem, dificilmente o nível d’água do rio atinge o mínimo necessário para que haja a entrada de água pela comporta. Para resolver tal problema, foram instaladas quatro bombas de captação com capacidade de captação de $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$ cada. Ou seja, um total de $4,0 \text{ m}^3/\text{s}$. Além disso, o canal São José, que conecta o canal Coqueiros ao Cambaíba, é capaz de disponibilizar aos usuários do primeiro, altas quantidades de recursos hídricos perenemente. Entretanto, não há registros exatos desta quantidade disponibilizada¹⁰. Portanto, foi estabelecida uma vazão de $4,0 \text{ m}^3/\text{s}$ para os irrigantes do canal Coqueiros proveniente do canal São José, totalizando um montante de $8,0 \text{ m}^3/\text{s}$ na confluência dos canais.

¹⁰ Propõe-se que simulações baseadas em levantamentos batimétricos precisos e usos de água por outros irrigantes e usinas do canal São José sejam realizadas de forma que vazões exatas que afluem no canal Coqueiros sejam determinadas.

Contudo, devido a problemas de assoreamento e depressões localizadas ao longo do percurso, alguns trechos do canal Coqueiros apresentam restrições de vazões, acima das quais alagamentos em áreas cultivadas podem ser causados. Para a localização dos trechos problemáticos, foi utilizado um modelo computacional hidrodinâmico com o objetivo de se determinar as curvas-chaves das várias seções ao longo do canal, de forma que fossem identificadas suas vazões toleráveis que não desrespeitassem níveis d'água superiores aos considerados satisfatórios para os agricultores que beiram o canal.

O modelo computacional utilizado foi o CLiv, desenvolvido pelo FCTH (Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica) na Universidade de São Paulo e capaz de simular escoamentos hidrodinâmicos em rios e canais (FCTH, 2003).

Foram utilizadas na modelagem do canal 107 seções transversais, selecionadas do levantamento realizado no estudo da TECNORTE (no prelo), representando o canal desde a contribuição do canal São José até as comportas de controle de vazão do canal São Bento, totalizando uma extensão de, aproximadamente, 42 km de extensão. O trecho do canal que cruza o perímetro urbano do município de Campos dos Goytacazes não fez parte da simulação por não apresentar interesses a este estudo.

A metodologia baseou-se na realização de simulações consecutivas do canal em regime permanente com variações nas condições de contorno de montante (vazão afluente) desde $1\text{m}^3/\text{s}$ até $15\text{m}^3/\text{s}$ com alterações de $1\text{m}^3/\text{s}$, enquanto a condição de jusante (nível d'água no canal), na comporta do canal São Bento, foi arbitrada em um valor fixo correspondente ao nível de água em um metro abaixo do nível do solo na última seção. Dessa forma, não somente o canal Coqueiros, mas também o trecho final do canal São Bento entre a sua comporta e a afluência do anterior foram simulados. A Figura 6.3 ilustra a interface do modelo com o canal representado pelas seções transversais levantadas.

A opção pelo estabelecimento da quota do nível d'água em um metro abaixo do nível do solo se deve ao fato que foi considerado que este seria o nível necessário para que não houvesse danos às culturas cultivadas no entorno da região. Entretanto, sabe-se que algumas culturas respondem melhor que outras a solos saturados ou semi-saturados.

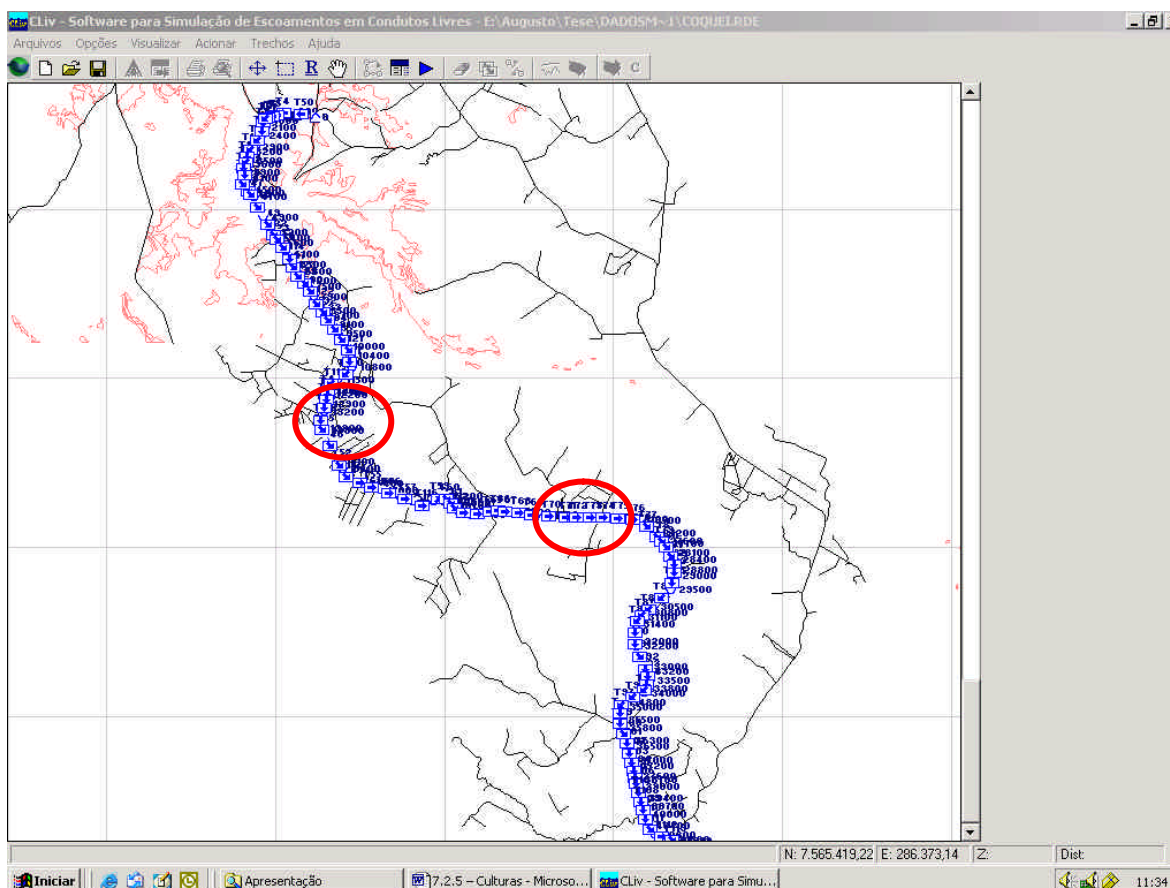


Figura 6.3 – Ilustração da simulação no modelo CLiv do escoamento do canal Coqueiros.

Após a realização das consecutivas simulações para cada vazão proposta, uma curva-chave para cada seção foi definida e com isso, a obtenção dos diferentes níveis d'água relacionados a cada vazão.

Para a determinação das vazões máximas admissíveis em cada seção acima das quais danos poderiam ser causados às culturas, considerou-se que as vazões limitantes em cada seção seriam aquelas que não ultrapassassem a diferença entre os níveis do solo e da água em valores inferiores a 1,0 metro (Figura 6.4). Desta maneira, pôde-se efetivar um mapeamento, ao longo do curso do canal, das vazões máximas permitidas em cada trecho.

Os resultados obtidos apresentam, basicamente, dois trechos críticos os quais podem causar maiores problemas com relação ao abastecimento dos usuários de jusante dos mesmos. O primeiro situa-se na distância de, aproximadamente, 12 km, partindo da

confluência do canal Coqueiros com canal São José, com uma vazão máxima de $4,7\text{m}^3/\text{s}$, enquanto o segundo situa-se a 21 km do mesmo referencial, com um limite de $2,0\text{m}^3/\text{s}$.

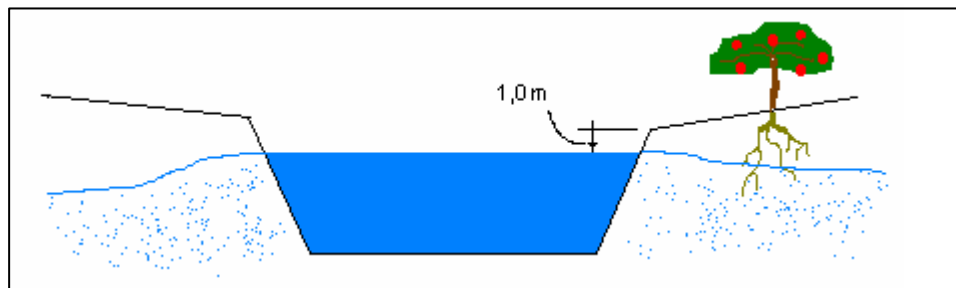


Figura 6.4 – Nível de água admissível nas seções ao longo do canal.

6.2.7.2. Demanda hídrica

Devido à ausência de um cadastro completo dos usuários de recursos hídricos dos canais, uma metodologia para estimar a distribuição da demanda hídrica ao longo do canal Coqueiros foi desenvolvida. Trata-se de uma técnica que se baseia em dados de classes de solo, desconsiderando os limites reais das propriedades dos usuários.

Distribuição da demanda hídrica ao longo do canal

Mesmo que os canais tenham sido concebidos, a princípio, para a drenagem da Baixada Campista, atualmente ocorre o uso de suas águas com fins de irrigação. Ainda este uso seja pequeno (comparado com as potencialidades de agricultura irrigada da região), seu valor é significativo, gerando inclusive conflitos entre usuários.

Entretanto, mesmo que se conheça aproximadamente o local onde tais usuários estejam localizados ao longo dos canais, não se sabe em que ordens de grandeza giram suas demandas hídricas, pois o valor das áreas atualmente irrigadas ainda é impreciso.

Com o intuito de se obter valores aproximados das áreas potencialmente irrigáveis passíveis de serem abastecidas pelo canal Coqueiros, foi desenvolvida uma técnica que simplifica o exaustivo trabalho de levantamento de informações e que pode gerar resultados satisfatórios em níveis de planejamento.

Delimitação da unidade hidrológica de gerenciamento

Para o prosseguimento da definição das demandas ao longo do canal, considerou-se que são usuários do canal todas as propriedades que estiverem inseridas dentro dos limites da bacia hidrográfica do corpo hídrico. Dessa forma, foi necessário obter a delimitação da unidade hidrológica de gerenciamento.

Os dados utilizados foram obtidos na Cartografia Geral do PROJIR (SONDOTÉCNICA, 1983a), em escala 1:25.000, as quais apresentam a hidrografia dos canais, valas, lagos e brejos. Tais cartas, um total de seis, foram digitalizadas.

Com a obtenção das informações hidrográficas da região em meio digital no formato DXF, traçou-se as delimitações das micro-bacias de drenagem do canal Coqueiros e seus afluentes, manualmente, no *software* AutoCAD. O método adotado foi o apresentado por LYRA *et al.* (2001) para a obtenção de limites de bacias hidrográficas em situações que ocorrerem a ausência de informações topográficas. No entanto, o método apresentado pelo autor faz uso de *softwares* específicos, enquanto neste trabalho, optou-se por realizá-lo manualmente, traçando-se linhas sobre os possíveis divisores de água, definidos por pontos eqüidistantes entre dois canais. Os resultados destas duas primeiras etapas são ilustrados nas Figuras 6.5 e 6.6.

As micro-bacias dos canais secundários foram agrupadas em cinco bacias maiores, com o objetivo de se reduzir o número de variáveis no sistema. Destas, três são limitadas pelas duas restrições de vazão apresentadas anteriormente.

A segunda consideração feita foi que cada propriedade inserida na unidade hidrológica é delimitada pelos limites de uma unidade de mapeamento de solo, como o descrito adiante. Neste caso, outros tipos de dados necessários foram os de classes pedológicas e de aptidões dos solos para irrigação. Estes dados foram obtidos da mesma forma que a hidrografia do canal: através de quinze mapas de classe de solo e de aptidão das terras para irrigação na escala 1:5.000, preparadas pelo PROJIR (SONDOTÉCNICA, 1983b) e foram igualmente digitalizadas. O número de cartas selecionadas foi o mínimo necessário para que fosse obtido o mapeamento de solos da unidade hidrológica do canal.

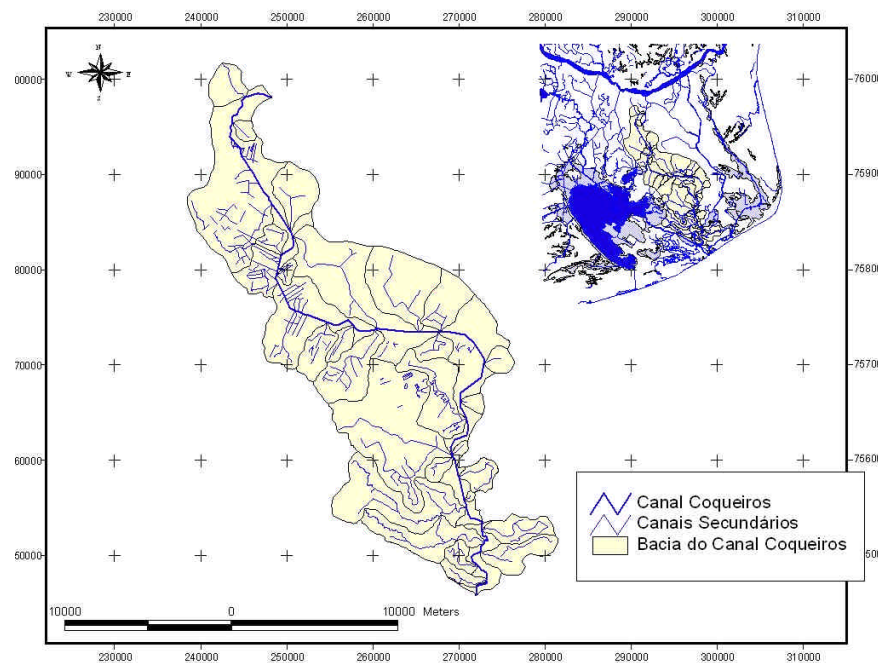


Figura 6.5 – Delimitação da unidade hidrológica do canal Coqueiros e suas micro-bacias (posicionada com relação à Baixada Campista).

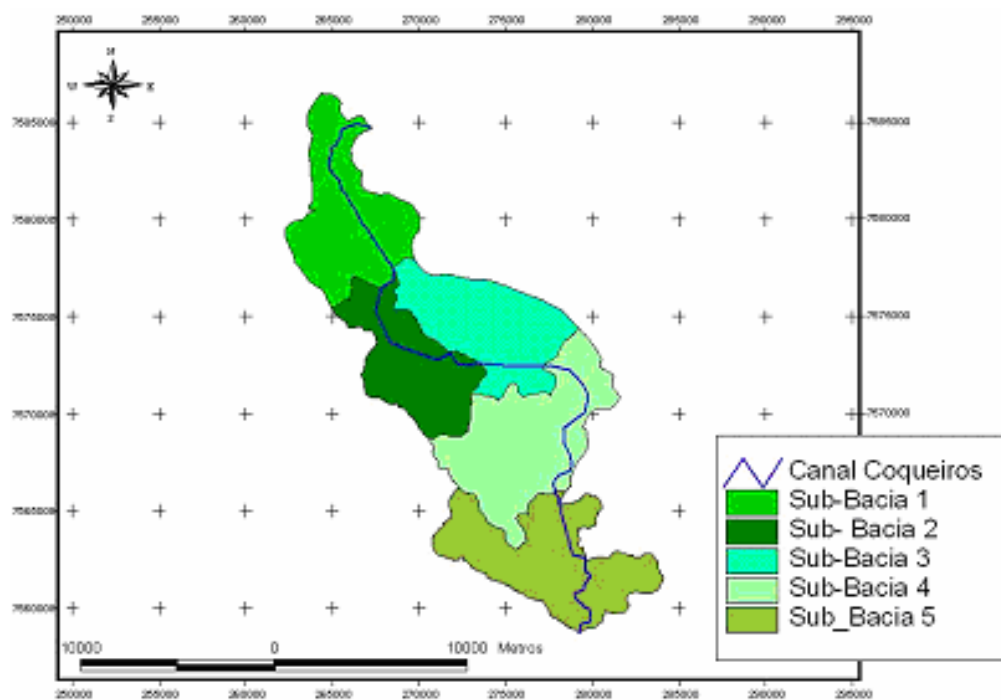


Figura 6.6 - Delimitação de sub-bacias na unidade hidrológica do canal Coqueiros.

Distribuição de solos na unidade hidrológica

Os solos foram classificados de acordo com suas características pedológicas. O relatório que se refere às cartas mencionadas (SONDOTÉCNICA, 1984b) contém informações sobre características dos solos, como salinidade, fertilidade, pH, capacidade de água disponível (CAD), além da declividade do terreno, drenagem, entre outras. A Figura 6.7 apresenta a distribuição de solos na unidade hidrológica do canal Coqueiros conforme sua classificação pedológica.

As aptidões dos solos para irrigação são determinados em função de todas estas características, além de outras, conforme o método desenvolvido pelo *US Bureau of Reclamation*. Dadas as adaptações do método à região analisada feitas pelo PROJIR, os solos foram classificados de acordo com suas aptidões em, basicamente, seis classes: 1, 2, 3, 4, 5 e 6. Estas classes são ordenadas de acordo com a qualidade do solo e sua aptidão para a prática da irrigação. Conforme os relatórios da Sondotécnica, as classes 5 e 6 são completamente impróprias para o uso agrícola devido às condições físico-químicas dos solos. Apesar de o PROJIR ter sido orientado, fundamentalmente, para a cultura canavieira, no atual trabalho a classificação de aptidão foi extrapolada para as outras culturas, ou seja, um solo classificado como 1 será de excelente qualidade para irrigação para todas as culturas propostas. A Tabela A.8 apresenta as principais características dos solos encontrados dentro dos limites da unidade hidrológica. Observa-se que, na situação do canal, a porção inferior da unidade hidrológica que se refere ao trecho final do canal São Bento não foi levantada devido à inaptidão desses solos para a irrigação causada pelos freqüentes alagamentos nesta região que se encontra em terras baixas.

Os polígonos gerados na digitalização, representando os limites das classes de solo, foram processados no *software ArcToolBox*, sendo convertidos para formato *coverage*, momento em que cada polígono recebe atributos como área e perímetro. Já em ambiente *ArcView*, foram adicionados outros atributos como os citados anteriormente, levantados em campo pelo PROJIR. Ainda neste *software*, foi possível unir os polígonos dos solos de diferentes classes, porém com a mesma aptidão, obtendo-se, assim, a área total coberta por um solo de uma determinada aptidão dentro da unidade hidrológica. O resultado desta etapa é apresentado na Figura 6.8.

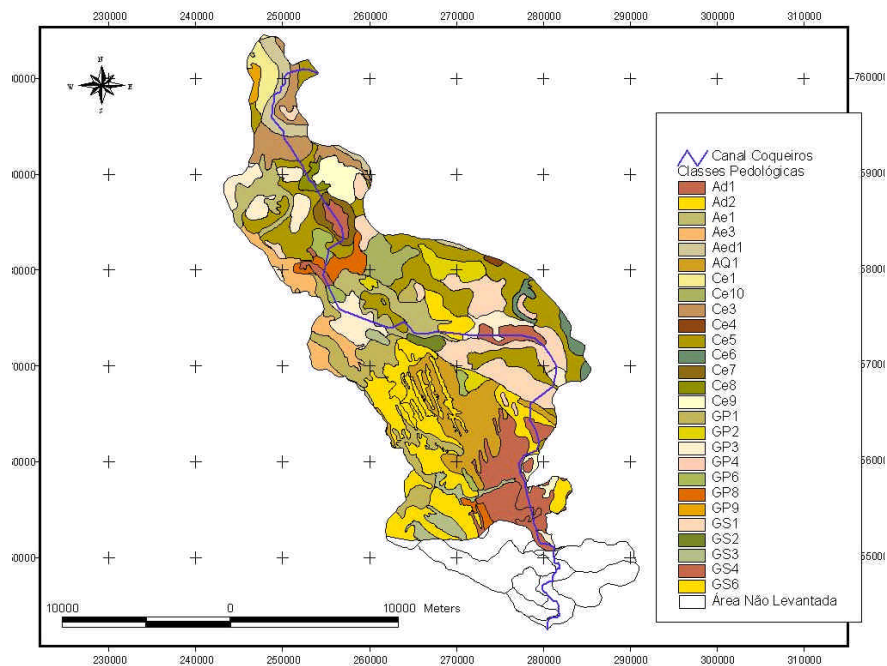


Figura 6.7 - Distribuição de solo na unidade hidrológica do canal Coqueiros.

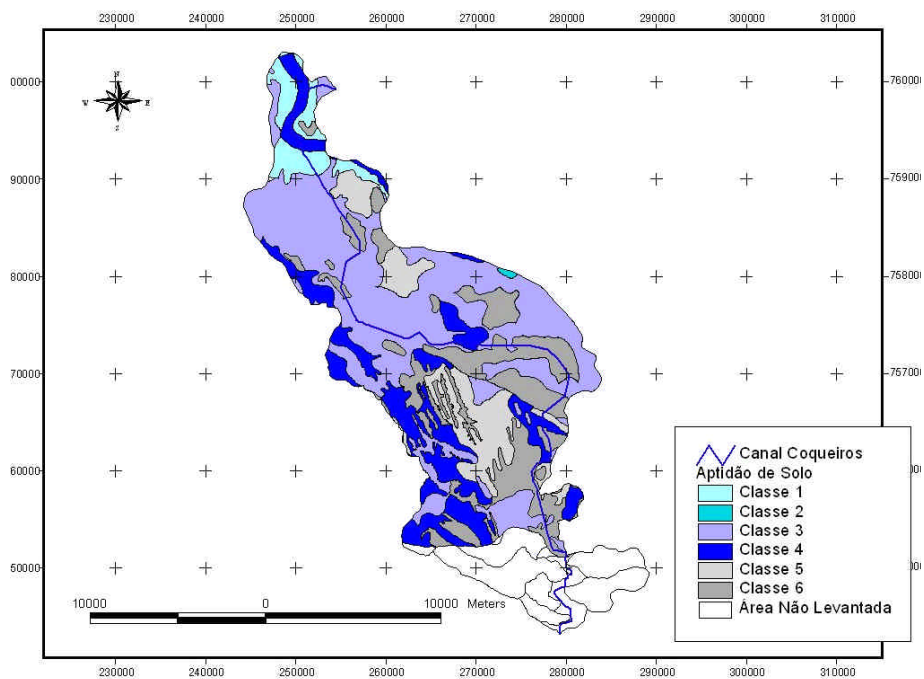


Figura 6.8 - Distribuição dos solos com suas respectivas classes de aptidão para irrigação na unidade hidrológica do canal Coqueiros.

Determinação do usuário de recursos hídricos

A solução proposta para contornar a indisponibilidade de dados de demanda de água do canal foi a consideração de que os solos com diferentes aptidões em uma mesma sub-bacia determinam diferentes usuários de recursos hídricos. Para isso, foi feita a superposição dos temas “sub-bacias” (Figura 6.6) e “classes de solo” (Figura 6.8) no *ArcView* e os polígonos resultantes passaram a representar diferentes propriedades, cada qual com diferentes atributos. Considerou-se também que cada grupo de usuários contidos em uma sub-bacia capta água no trecho do canal que estão relacionados.

A justificativa para a adoção deste método foi a possibilidade de caracterizar cada propriedade pela demanda de água. Como foi visto na seção 5.2.1.2, a *P_{Pe}* é definida de acordo com a intensidade da chuva, a *ET_p* e a *CAD* no solo. A obtenção dos dois primeiros foi descrita em itens anteriores. O terceiro foi obtido através dos atributos dos solos apresentados na Tabela A.6. Assim, uma mesma planta cultivada em diferentes solos apresentará déficits hídricos distintos. Outros atributos poderiam ter sido considerados na estimativa da demanda de água como a salinidade do solo, ou na produtividade de uma planta a partir das informações de concentrações de nutrientes no solo. No entanto, seriam necessários dados das reações de cada cultura sob a interferência de cada componente do solo.

Ressalta-se que os solos das classes 5 e 6 foram excluídos do grupo de solos com potencialidades para irrigação e estão devidamente representados na Figura 6.9 pelos polígonos preenchidos com tonalidades cinzas. As áreas totais de cada propriedade foram obtidas no *ArcView* e multiplicadas por um coeficiente de ocupação de 0,9. Isso tornou possível a determinação de todas as áreas aptas à irrigação, com suas diferentes restrições de manejo de água, através das classes de aptidão de solos para irrigação encontradas na baixada. As áreas sujeitas a alagamentos também foram obtidas nesta imagem e distribuídas para cada usuário conforme suas localizações.

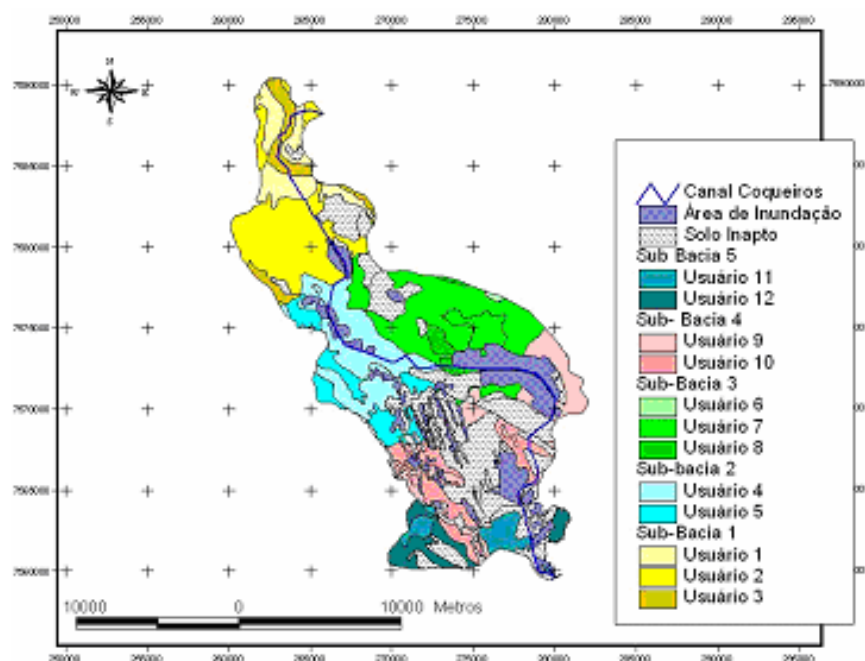


Figura 6.9 – Delimitação das propriedades dos usuários de recursos hídricos presentes na unidade hidrológica do canal Coqueiros.

Tabela 6.4 – Atributos dos usuários de recursos hídricos do canal Coqueiros.

Usuário	Sub-Bacia	Classe de Aptidão do Solo	Área Total (ha)	Área Potencialmente Irrigável (ha)	CAD Média no Solo (mm/m)
1	1	1	1193	1074	167
2	1	2	2594	2334	149
3	1	3	679	611	97
4	2	2	2404	2163	149
5	2	3	1085	977	97
6	3	1	32	29	167
7	3	2	3266	2940	149
8	3	3	358	322	97
9	4	2	1506	1355	149
10	4	3	1201	1081	97
11	5	2	641	577	149
12	5	3	731	658	97

Os usuários foram enumerados, por sub-bacias, de montante para jusante, dos solos mais apropriados para menos próprios para irrigação, de 1 a 12. A Tabela 6.4 apresenta as informações que caracterizam cada usuário.

6.2.8. Benefício-custo

A função benefício-custo é definida pela diferença entre o total arrecadado pelos usuários com suas respectivas produções num intervalo de seis anos e o total de

despesas necessárias com a manutenção do sistema produtivo e a irrigação, acrescidos os custos da cobrança pelo uso da água e da energia elétrica necessária para o bombeamento da mesma, neste mesmo intervalo de tempo. Feito este balanço, torna-se possível determinar o quanto rentável pode ser o sistema de irrigação.

A Tabela A.9 apresenta os valores anuais dos custos fixos, benefícios e renda líquida gerada por cada cultura no intervalo do projeto considerado. Levando em conta que os usuários do canal são, na verdade, usuários indiretos do rio Paraíba do Sul, estes deveriam pagar ao CEIVAP pelo uso da água que, no caso, é uma captação com 100% de consumo (não há retorno para o rio). Portanto, de acordo com a equação da cobrança pelo uso da água desenvolvida pelo Laboratório de Hidrologia da COPPE/UFRJ e aprovada pelo Comitê de Bacia, tem-se:

$$C = Q_{cap} \times K_0 \times PPU + Q_{cap} \times K_1 \times PPU + Q_{cap} \times (1 - K_1) \times (1 - K_2 K_3) \times PPU \quad (6.1)$$

Onde:

Q_{cap} representa o volume de água captada durante um mês ($m^3/mês$), *fornecido pelo usuário*; K_0 corresponde a um multiplicador de preço unitário para captação, *definido pelo CEIVAP*; K_1 corresponde a um coeficiente de consumo para a atividade em questão, ou seja, a relação entre o volume consumido e o volume captado pelo usuário (ou índice correspondente à parte do volume captado que não retorna ao manancial), *fornecido pelo usuário*; K_2 corresponde ao percentual do volume de efluentes tratados em relação ao volume total de efluentes produzidos (ou índice de cobertura de tratamento de efluentes domésticos ou industriais), ou seja, a relação entre a vazão efluente tratada e a vazão efluente bruta, *definida por informação fornecida pelo usuário*; K_3 corresponde ao nível de eficiência de redução de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) na estação de tratamento de efluentes, *fornecido pelo usuário* e; PPU equivale ao Preço Público Unitário, correspondente à cobrança pela captação, pelo consumo e pela diluição de efluentes para cada m^3 de água captada ($R\$/m^3$), *definido pelo CEIVAP*.

No caso da captação de água do canal no rio, apenas os dois primeiros termos do lado direito da equação são representativos, pois como não há retorno da vazão captada, a quantidade de efluentes é nula.

No caso da agricultura irrigada, os índices estabelecidos pelo CEIVAP são de 0,4 para K_0 e R\$ 0,0005/ m³ para $PPU_{irrigação}$, desde que o valor total pago pelo usuário não exceda 0,5% dos custos de produção.

Portanto, o custo da água para os usuários do canal totaliza em R\$ 0,0077/ m³, onde R\$ 0,007/m³ corresponde aos gastos estimados com energia elétrica necessária para o bombeamento da água e R\$0,0007/m³, equivalente ao resultado da equação de cobrança pelo uso de recursos hídricos do Paraíba.

6.3. Aplicação da metodologia e Construção de Cenários

Apresentado o modelo proposto e o estudo de caso, seguimos com a aplicação da metodologia proposta. Tendo como objetivo principal analisar propostas de soluções de conflitos baseado em um estudo de viabilidade da recuperação e gestão dos canais do município de Campos dos Goytacazes, fundamentado em critérios econômicos, doze cenários são propostos, cada qual com seu propósito e previsão de diferentes tendências agrícolas regionais, os quais servirão como fornecedores dos dados de entrada para o modelo de otimização e, dessa forma, obter os resultados de maximização do retorno econômico de cada um.

Nestes cenários, considerou-se que a prática da irrigação passou a prevalecer na região, trazendo como consequência a demanda de grandes vazões de água no canal. Eles estão divididos, basicamente, em 2 grupos e estes, em outros dois subgrupos cada. Os dois grupos são representados pelos cenários de 1 ao 6 e 7 ao 12. Estes se distinguem pelo regime de distribuição de água (alocação por quotas e distribuição otimizada, respectivamente). Os subgrupos dizem respeito ao plano de cultivo implantado. Os cenários de 1 ao 3 e de 7 ao 9 referem-se à prática da monocultura da cana-de-açúcar enquanto, os cenários de 4 ao 6 e 10 ao 12 dizem respeito à policultura. A seguir, os cenários propostos são descritos em maiores detalhes:

1º cenário – Este se caracteriza pela carência de intervenções estruturais no canal estudado e a opção por beneficiar os usuários nestes trechos com terras propícias a alagamentos, havendo grandes restrições de vazão para os outros usuários a jusante, o que limitará a produção dos mesmos, enquanto as propriedades vizinhas dos trechos

problemáticos não sofrerão com elevações do lençol freático. Portanto, teremos três aplicações para a Equação 5.18: a primeira restrição de vazão máxima na cabeceira do canal com capacidade de $8,0 \text{ m}^3/\text{s}$, a segunda e a terceira estarão de acordo com as restrições apresentadas no item 6.2.7.1, com vazões máximas de $4,7 \text{ m}^3/\text{s}$ e $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$. Também foi considerada a predominância da monocultura da cana irrigada com a fortificação do projeto RIOCANÁ e a distribuição dos recursos hídricos por quotas, conforme proposto pelas Inequações 5.22 e 5.23 e utilizando as áreas potencialmente irrigáveis apresentadas na Tabela A.12. Esta mesma tabela foi utilizada para obter as restrições impostas pela Inequação 5.19. A Por tratar-se de monocultura somente, Inequação 5.20 não foi utilizada. Este primeiro cenário foi representado matematicamente por 12 variáveis sujeitas a 168 restrições, ou seja, as terras irrigadas de cada um dos doze usuários ocupadas por uma cultura somente (cana-de-açúcar) e suas respectivas áreas mínimas e máximas irrigáveis e vazões máximas disponíveis a cada um, mensalmente.

2º cenário – O segundo cenário também apresentará a ausência de melhorias estruturais, porém, ao contrário do primeiro cenário, os beneficiados serão os usuários a jusante, os quais terão acesso aos recursos hídricos disponíveis, enquanto os usuários localizados no entorno dos trechos problemáticos terão fração de suas áreas inundadas, causando reduções de terras produtivas. Também se considerou a predominância da monocultura da cana irrigada com a fortificação do projeto RIOCANÁ e distribuição dos recursos hídricos por quotas. Os números de variáveis e de restrições neste cenário se igualam ao do anterior.

3º cenário – Neste cenário, foram consideradas as intervenções necessárias para a regularização da vazão ao longo do canal, ou seja, não haverá restrições hidráulicas em trecho algum, exceto na cabeceira, onde a vazão máxima permanecerá de $8,0 \text{ m}^3/\text{s}$. Isso ocorre porque considerou-se que as intervenções estruturais venham a eliminar todos os pontos de conflito, através da construção de diques e dragagens e retificações do canal. Todavia, o regime de distribuição de água por quotas e a monocultura da cana permanecerão iguais aos cenários anteriores. O número de variáveis e de restrições deste cenário repete os valores dos dois cenários anteriores.

4º cenário – O quarto cenário é definido, igualmente ao primeiro, pela carência de intervenções estruturais no canal estudado e a opção por beneficiar os usuários nestes trechos com terras propícias a alagamentos. Contudo, considerou-se que outro projeto, o Projeto Moeda Verde FRUTIFICAR do Governo do Estado do Rio de Janeiro, teve uma propulsão significativa, levando alguns agricultores a trocar a cana por uma das quatro fruteiras propostas pelo projeto ou pela produção de tomate e cenoura, intercaladamente, no mesmo solo. Porém, para que haja uma representação mais próxima possível da realidade, restringiu-se áreas máximas ocupadas por cada cultura, com exceção da cana, em 10% do total irrigável no sistema e um mínimo de 2,5% para cada cultura. Também se adotou uma ocupação mínima para a cana de 60% do total disponível para irrigação no sistema. Estes limites foram adotados na Inequação de restrição 5.20 como *a max* e *a min*, respectivamente, para cada cultura, representando a predominante ocupação da monocultura da cana que tem sua tradição enraizada na região devido à passagem de “pai para filho” em seguidas gerações e, por outro lado, para o abastecimento das usinas localizadas nas redondezas. Foram definidas 72 variáveis sujeitas a 168 restrições.

5º cenário – O quinto cenário é uma combinação do segundo com o quarto, onde se mantém do segundo cenário as restrições de vazão, a distribuição por quotas, os usuários a jusante como beneficiados e a perda de fração da área produtiva dos proprietários de terras que contornam o canal. Do quarto, prevalece a adaptação da prática da policultura no mesmo regime já descrito e a restrição das áreas máximas ocupadas por cada cultura. O número de variáveis e restrições deste cenário é o mesmo do cenário anterior: Setenta e duas variáveis e 168 restrições.

6º cenário – O sexto cenário, de forma análoga ao anterior, é uma combinação do terceiro com o quarto, onde se mantém do terceiro cenário a regularização da vazão ao longo do canal e o regime de distribuição de água por quotas. Do quarto cenário, manteve-se a restrição das áreas máximas ocupadas por cada cultura. Os números de variáveis e de restrições são iguais aos dos dois cenários anteriores.

7º ao 12º cenário – Nestes cenários, as considerações realizadas nos seis cenários anteriores são feitas de forma idêntica, exceto por, ao invés de ocorrer a distribuição dos recursos hídricos por quotas, haverá a alocação por otimização da renda líquida global

do sistema, com a utilização da Inequação 5.18. Na ordem, os respectivos números de variáveis e restrições necessárias para cada cenário foram de 12 e 60, 12 e 36, 12 e 36, 72 e 120, 72 e 96 e 72 e 96.

A Tabela A.10 apresenta um quadro definindo, resumidamente, os critérios adotados em cada cenário, enquanto que as áreas irrigáveis e a disponibilidade de água mensal para cada usuário, em cada cenário, são apresentadas na Tabela A.13.

Como marco inicial, seria aconselhável a aproximação da renda líquida gerada pela produção atual do sistema, considerando o rendimento obtido nas atuais condições precárias que se encontra a região, como forma de avaliar os resultados obtidos no modelo. Adotando o rendimento de 40t/ha (situação não rara na região), um custo de produção de, aproximadamente, R\$ 900,00/ha¹¹ (considerando a falta de infra-estrutura e mão-de-obra necessária para a plantação de cana) e valor de mercado da cana de R\$ 28,00/t são obtidos lucros de R\$ 220,00/ha anuais e, considerando a área total irrigável de 13.123 ha, já descontadas as regiões alagadas, tem-se no período do projeto, o retorno de R\$ 17.322.360,00 ao final de seis anos.

O *software* adotado para a implementação do modelo de otimização foi o *XPress-Optimizer* (DASH OPTIMIZATION, 2004). Este *software* utiliza o algoritmo Simplex e é capaz de resolver *PPL*'s nas formas primal e dual do algoritmo. Também é munido de um algoritmo de pré-resolução integrado para reduzir o tempo de obtenção do resultado do problema. As variações do modelo foram resolvidas pelo *software* no Laboratório de Otimização da COPPE/UFRJ.

^{11 11} Valores hipotéticos baseados em dados médios regionais.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a realização das otimizações do modelo com os diferentes dados de cada cenário e as áreas irrigadas por cada usuário (variáveis do modelo), diversas outras informações puderam ser extraídas. Tais resultados são discutidos neste capítulo.

7.1. Alocação de recursos hídricos por quotas

7.1.1. Monocultura

A primeira análise feita é com relação à diferença das rendas líquidas obtidas estimadas para a situação atual (sem irrigação e investimentos precários em infra-estrutura) e as obtidas pelos cenários otimizados. Temos que após a aplicação de água através da irrigação e a partir de maiores investimentos no processo produtivo, passa-se a ter rendimentos líquidos superiores a cinco vezes o estimado na primeira situação.

Variações da renda líquida também foram obtidas entre os cenários obtidos na otimização. Observamos na Tabela 7.1 que há um aumento significativo de 14,8% ou R\$ 13,2 milhões na renda líquida gerada pelos usuários do canal quando se passa do cenário 1 para o 3. Em contrapartida, não são observadas variações no lucro gerado pelos agricultores ao compararmos os cenários 2 e 3, ou seja, na hipótese de serem realizadas intervenções no canal ao se ter anteriormente um acordo pela irrestrição de vazão em trechos problemáticos.

Notamos que, devido à quantidade reduzida de água disponível aos usuários a jusante dos trechos com estrangulamento, a área total irrigada no cenário 1 é menor que os outros dois, que resultaram em áreas ocupadas praticamente idênticas. Percebemos também que as demandas de água nos dois últimos cenários são praticamente iguais, acompanhando a tendência das áreas ocupadas. Isso nos leva a crer que o fator limitante no desenvolvimento agrícola nestes cenários é a disponibilidade máxima de água e não

a disponibilidade de área irrigável. Tal hipótese é confirmada quando observamos a variação da demanda hídrica anual dos três cenários.

O rendimento hídrico sofre uma pequena redução entre o cenário 1 e os outros dois, possivelmente provocada pela maior disponibilidade de água aos usuários com menor rendimento (solos de menor aptidão) localizados nas sub-bacias a jusante no canal, apesar de haver aumento na renda líquida.

7.1.2. Policultura

Com a modelagem de cenários prevendo outras culturas além da cana, propôs-se a demonstração de que a migração para outras culturas irrigadas pode se tornar um processo mais rentável para os agricultores.

Com base na Tabela 7.1, constatamos uma expressiva variação entre os benefícios gerados pelas intervenções estruturais no canal ao compararmos os resultados dos cenários da monocultura e da policultura. Ao se tratar de cenários onde os usuários praticam policultura, intervenções estruturais acarretam mudanças significativas na renda gerada pelos produtores, tanto no cenário 4, com um acréscimo de R\$ 22,92 milhões ou 13,8%, quanto no cenário 5, acrescentando R\$ 4,54 milhões ou 2,5%.

Ao compararmos os resultados obtidos nos cenários da policultura com os dos cenários da monocultura, notamos uma grande diferença entre as rendas líquidas geradas pelo sistema nas situações com as mesmas condições hidráulicas do canal, apresentadas na Tabela 7.2, variando desde 79,8% até 85,8% nos cenários 2 e 1, respectivamente. Estes resultados comprovam o aumento do lucro gerado pelos irrigantes com a prática de outras culturas associadas à cana-de-açúcar. Vê-se também que as áreas ocupadas nos cenários onde se pratica a policultura são superiores às áreas ocupadas nos cenários submetidos à cana somente. Isto é causado pela menor demanda hídrica das outras culturas propostas, acarretando um maior rendimento hídrico que chegam a atingir valores superiores a R\$ 252,00 por mil metros cúbicos de água no terceiro cenário, 65,6% maior que seu equivalente na monocultura.

Tabela 7.1 – Informações de área ocupada, demanda hídrica e renda líquida dos cenários de 1 a 6.

Parâmetros		Cenário					
		Quotas					
		Monocultura			Policultura		
		1	2	3	4	5	6
Área Ocupada (ha)	Cana-de-açúcar	10039	11526	11527	8473	7874	8473
	Abacaxi	0	0	0	519	984	368
	Maracujá	0	0	0	353	1312	1412
	Goiaba	0	0	0	1412	1312	1412
	Coco	0	0	0	353	328	353
	Tomate e Cenoura	0	0	0	353	1312	1412
Área Total Ocupada na Unidade Hidrológica (ha)		10039	11526	11527	11464	13123	13431
Área Irrigável Ociosa na Unidade Hidrológica (ha)		4083	1597	2595	2658	0	691
Renda Líquida do Projeto (milhões de Reais)		89,09	102,28	102,29	165,54	183,93	188,47
Demanda Hídrica Anual (milhões de m³)		97,42	111,96	111,95	107,77	126,26	124,56
Aumento na renda Líquida após intervenções estruturais	(milhões de Reais)	13,2	0,01	-	22,92	4,54	-
	(%)	14,8	0	-	13,8	2,5	-
Rendimento da Água (R\$/ milhares de m³)		152,42	152,26	152,29	256,02	242,79	252,17

Tabela 7.2 – Diferenças das áreas ocupadas, rendas líquidas e demandas hídricas entre cenários de monocultura e policultura com alocação de recursos hídricos por quota.

Observações		Cenários		
		1 e 4	2 e 5	3 e 6
Área Total Ocupada na Unidade Hidrológica (ha)		1425	1597	1904
Renda Líquida do Projeto	(milhões de Reais)	76,45	81,64	86,17
	(%)	85,8	79,8	84,2
Demanda Hídrica Anual (milhões de m³)		10,35	14,30	12,61

Por ser uma cultura de pequeno retorno econômico, comparado às outras culturas propostas, o coco ocupou áreas pequenas nos cenários, referentes às áreas mínimas, de 2,5% da total irrigável, impostas como restrições no modelo. Situação semelhante ocorre no quarto cenário com o maracujá e a combinação do tomate e a cenoura.

7.1.3. Demanda hídrica

A partir da Tabela 7.5, pode-se constatar que nos cenários 1 e 4, que representam as situações que são mantidas restrições de vazão, em momento algum foi alcançada a capacidade máxima de adução do canal. O primeiro cenário obteve a vazão média mensal máxima de 6,96 m³/s no mês de fevereiro e o quarto, 7,02 m³/s no mesmo mês, enquanto todos os outros cenários atingiram, em pelo menos um mês, o limite de adução

do canal de 8,00 m³/s, sendo que os cenários da monocultura no mês de fevereiro e os da policultura em março. Com o aumento da variedade de culturas irrigadas, o canal passa a ser utilizado com maior intensidade, quase atingindo a vazão média máxima também no mês de fevereiro. Da mesma forma, é possível observar que durante os meses de chuva, as vazões captadas pela policultura é inferior a outra prática, reduzindo a sobrecarga do sistema de drenagem do solo.

7.2. Alocação de recursos hídricos por otimização da renda líquida global

7.2.1. Monocultura

Considerando a distribuição de água com o objetivo de maximizar o retorno econômico global do sistema, podemos observar na Tabela 7.3 que variações desprezíveis foram encontradas quando se deixa de alocar água aos usuários por quotas. Tal resultado demonstra que a diferença dos rendimentos hídricos entre os usuários talvez não seja suficiente para que seja economicamente viável a redistribuição de água para os usuários com maior eficiência. Tal análise é novamente abordada na seção 7.3 – Mercado de água.

Por outro lado, comparando os resultados dos cenários 7, 8 e 9 entre si, podemos notar que houve variações significativas da renda líquida gerada e a área irrigada entre o sétimo cenário os outros dois subsequentes. Também é constatado o aumento de 15,0% ou R\$ 13,4 milhões na renda líquida gerada pelos usuários do canal quando se compara o resultado do sétimo cenário com o do nono.

7.2.2. Policultura

Verifica-se nestes cenários, com os dados apresentados na Tabela 7.3, que o coco permaneceu como a cultura de menor retorno econômico em todos os cenários, atingindo a ocupação mínima definida pela restrição do problema. No cenário 10, que há restrições de vazão ao longo do canal, o mesmo ocorre com o maracujá e a combinação do tomate e da cenoura. A goiaba, da mesma forma que os cenários de policultura anteriores, por ser a cultura com maior retorno econômico, atinge em todas as situações a área máxima permitida no modelo matemático.

Tabela 7.3 - Informações de área ocupada, demanda hídrica e renda líquida dos cenários de 7 a 12.

Parâmetros		Cenário					
		Otimizada					
		Monocultura			Policultura		
		7	8	9	10	11	12
Área Ocupada (ha)	Cana-de-açúcar	10053	11545	11558	8473	7874	8473
	Abacaxi	0	0	0	534	999	376
	Maracujá	0	0	0	353	1297	1412
	Goiaba	0	0	0	1412	1312	1412
	Coco	0	0	0	353	328	353
	Tomate e Cenoura	0	0	0	353	1312	1412
Área Total Ocupada na Unidade Hidrológica (ha)		10053	11545	11558	11478	13123	13438
Área Irrigável Ociosa na Unidade Hidrológica (ha)		4069	1578	2564	2643	0	684
Renda Líquida no Projeto (milhões de Reais)		89,23	102,47	102,60	165,76	183,98	188,59
Demanda Hídrica Anual (milhões de m³)		97,23	111,71	111,53	107,69	126,08	124,26
Aumento na renda Líquida após intervenções estruturais	(milhões de Reais)	13,37	0,13	-	22,83	4,61	-
	(%)	15,0	0,1	-	13,8	2,5	-
Rendimento da Água (R\$/ milhares de m³)		152,95	152,95	153,33	256,53	243,20	252,94

Destaca-se que as diferenças entre as áreas irrigadas e a renda gerada entre o cenário 10 e os outros dois cenários são significativas. Desta forma, após analisarmos ambos os métodos de distribuição de água (quotas e otimizada), tanto praticando a monocultura quanto a policultura, podemos concluir que é financeiramente menos atraente restringir a vazão em trechos propícios a alagamentos e inundações para que mais terras estejam disponíveis para a irrigação que, ao contrário, alagando-as e aumentando a vazão disponível a jusante das mesmas.

Tabela 7.4– Diferenças das áreas ocupadas, rendas líquidas e demandas hídricas entre cenários de monocultura e policultura com alocação de recursos hídricos por otimização da renda líquida global.

Observações	Cenários		
	7 e 10	8 e 11	9 e 12
Área Total Ocupada na Unidade Hidrológica (ha)	1426	1578	1880
Renda Líquida do Projeto	(milhões de R\$)	76,53	81,51
	(%)	85,8	79,5
Demanda Hídrica Anual (milhões de m³)	10,46	14,37	12,74

Da mesma forma que os cenários com distribuição por quotas, a variação do retorno econômico entre a monocultura e a policultura na alocação otimizada também é bastante significativa. Verifica-se na Tabela 7.4 que das três propostas de condutividade

hidráulica, todas com o cultivo de policultura alcançaram maior ocupação do solo, maior retorno econômico e maior aproveitamento dos recursos hídricos disponíveis. Portanto, outra conclusão que se pode tomar é que, por qualquer que seja a forma de distribuição de água, a prática da policultura prevalecerá como a mais rentável.

7.2.3. Demanda hídrica

As demandas hídricas totais dos usuários nos cenários que estabelecem o regime de alocação ótima de recursos hídricos mantêm a mesma tendência dos primeiros cenários. De maneira geral, todos os cenários apresentados na Tabela 7.5 apresentaram vazões mensais na mesma ordem de grandeza que os cenários de 1 a 6. Entretanto, uma pequena redução na vazão anual foi observada em cada situação.

Tabela 7.5 - Vazões médias mensais aduzidas pelo canal para o abastecimento dos usuários nos cenários de 1 a 12.

Mês	Vazão Média Mensal (m³/s)											
	Cenário											
	Quotas						Otimizada					
	Monocultura			Policultura			Monocultura			Policultura		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Jan	5,08	5,84	5,84	4,81	5,12	5,12	5,07	5,83	5,82	4,80	5,10	5,08
Fev	6,96	8,00	8,00	7,02	7,98	7,98	6,96	8,00	8,00	7,02	7,98	7,98
Mar	6,44	7,40	7,40	6,73	8,00	8,00	6,44	7,40	7,40	6,73	8,00	8,00
Abr	5,08	5,84	5,84	5,38	6,39	6,35	5,08	5,84	5,84	5,39	6,39	6,36
Mai	2,12	2,43	2,43	2,47	3,05	2,86	2,11	2,43	2,42	2,47	3,05	2,86
Jun	0,67	0,77	0,77	1,42	1,96	1,78	0,67	0,77	0,77	1,43	1,96	1,78
Jul	1,35	1,55	1,55	2,24	2,80	2,68	1,35	1,55	1,55	2,25	2,80	2,68
Ago	1,36	1,56	1,56	2,34	3,18	3,11	1,36	1,56	1,56	2,34	3,19	3,12
Set	1,34	1,55	1,54	1,92	2,60	2,60	1,33	1,53	1,53	1,92	2,60	2,59
Out	4,02	4,62	4,62	4,34	4,66	4,69	4,02	4,61	4,61	4,33	4,66	4,69
Nov	1,28	1,48	1,48	1,18	1,20	1,17	1,26	1,45	1,43	1,16	1,17	1,13
Dez	1,87	2,15	2,15	1,73	1,77	1,71	1,85	2,12	2,10	1,71	1,73	1,66

Os cenários 7 e 10 não alcançaram a vazão máxima disponível em mês algum devido às restrições de vazão ao longo do canal. No entanto, os cenários 8 e 9 atingiram a vazão máxima de 8,0 m³/s no mês de fevereiro e os cenários 11 e 12 tiveram suas maiores captações no mês de março. Salienta-se que, devido à diversidade de culturas cultivadas, a disponibilidade de água no mês de fevereiro é também quase totalmente utilizada.

Atualmente, a bacia do rio Paraíba do Sul ainda não está servida de um cadastro de usuários completo o suficiente de forma que se possa determinar a sazonalidade da demanda de cada uso. Entretanto, a partir do momento em que tais informações se tornarem disponíveis, será possível basear estudos para a determinação das melhores culturas cultivadas com diferentes déficits hídricos em função da disponibilidade de água ao longo do ano, não somente na região da Baixada Campista, mas em qualquer parte da bacia. Ou seja, poderá haver situações que será viável a prática de culturas que tenham maiores déficits hídricos em um determinado mês, quando, devido à sazonalidade dos usos, haverá maior disponibilidade de recursos hídricos, e, por outro lado, menores demandas em outro mês quando os usos na bacia serão mais intensos.

7.3. Mercado de água

Atualmente, já existem modelos matemáticos que realizam este tipo de estudo, otimizando o próprio mercado entre um grupo de usuários, analisando os ganhos potenciais, o volume de água comprada e vendida por cada irrigante, custos de oportunidade e variação do preço do recurso hídrico (ZEKRI e EASTER, 2005). Entretanto, neste estudo, analisou-se apenas a viabilidade da utilização do modelo adotado em um eventual mercado de águas no sistema.

Na Tabela 7.6 são apresentadas as variações percentuais dos rendimentos líquidos gerados entre cenários submetidos às diferentes formas de distribuição de água. Ou seja, em uma coluna estão distribuídos os acréscimos (ou decréscimos) percentuais obtidos ao se migrar de um determinado cenário de distribuição de água por quotas (apresentados na primeira linha) para outro, com alocação ótima dos recursos hídricos (apresentados na primeira coluna). Valores negativos significam que a mudança traz prejuízos (usuários gerarão menor renda líquida global). Valores positivos significam que, caso haja a mudança da alocação de água, atingindo a otimização da renda líquida, da maneira que a segunda metade dos cenários se propõem, toda a água re-alocada será capaz de gerar não somente o que gerava antes da redistribuição, mas excederá o valor total nos percentuais apresentados na Tabela 7.6.

Verifica-se que, entre os cenários com os mesmos regimes de produção - monocultura (1 a 3 e 7 a 9) ou policultura (4 a 6 e 10 a 12) - , a maior variação apresentada ocorre entre o terceiro e nono cenários (alocação de água por quotas e otimizada, respectivamente, ambos com práticas agrícolas da monocultura com intervenções estruturais), atingindo o valor de 0,30%, ou seja, o cenário 9 supera neste percentual a produção do outro cenário.

Tabela 7.6 – Variação percentual da renda líquida na mudança de regimes de distribuição de água.

Cenários		Alocação por Quotas						
		Monocultura			Policultura			
		1	2	3	4	5	6	
Alocação Otimizada	Monocultura	7	0,15	(12,76)	(12,77)	(46,10)	(51,49)	(52,66)
		8	15,02	0,18	0,17	(38,10)	(44,29)	(45,63)
		9	15,17	0,31	0,30	(38,02)	(44,22)	(45,56)
	Policultura	10	86,05	62,06	62,04	0,13	(9,88)	(12,05)
		11	106,51	79,87	79,85	11,14	0,03	(2,38)
		12	111,68	84,38	84,36	13,92	2,53	0,06

Para um melhor detalhamento deste caso, a Tabela 7.7 apresenta as diferenças entre as demandas hídricas mensais de cada usuário nos cenários 3 e 9. Como já foi observado anteriormente, nos cenários que não ocorrem restrições de vazão ao longo do canal, no mês de fevereiro, o déficit hídrico da cana-de-açúcar cultivada na região sempre atingirá a disponibilidade hídrica máxima.

Tabela 7.7 – Diferença entre demandas de água nos cenários 3 e 9.

Usuários	Diferença das Vazões Médias (Q9 - Q3) – m ³ /s											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	0,095	0,131	0,121	0,096	0,039	0,012	0,025	0,025	0,024	0,075	0,022	0,033
2	0,212	0,291	0,270	0,213	0,088	0,028	0,056	0,057	0,055	0,168	0,052	0,076
3	(0,162)	(0,219)	(0,202)	(0,159)	(0,067)	(0,022)	(0,043)	(0,044)	(0,044)	(0,127)	(0,046)	(0,064)
4	0,196	0,270	0,250	0,197	0,082	0,026	0,052	0,052	0,051	0,155	0,048	0,070
5	(0,259)	(0,349)	(0,323)	(0,254)	(0,108)	(0,036)	(0,068)	(0,070)	(0,071)	(0,203)	(0,073)	(0,103)
6	0,003	0,003	0,003	0,003	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001
7	0,267	0,367	0,339	0,268	0,111	0,035	0,071	0,071	0,070	0,211	0,065	0,096
8	(0,086)	(0,115)	(0,107)	(0,084)	(0,035)	(0,012)	(0,023)	(0,023)	(0,023)	(0,067)	(0,024)	(0,034)
9	0,123	0,169	0,156	0,123	0,051	0,016	0,033	0,033	0,032	0,097	0,030	0,044
10	(0,287)	(0,386)	(0,358)	(0,282)	(0,119)	(0,039)	(0,076)	(0,077)	(0,079)	(0,225)	(0,081)	(0,114)
11	0,052	0,072	0,067	0,053	0,022	0,007	0,014	0,014	0,014	0,041	0,013	0,019
12	(0,175)	(0,235)	(0,218)	(0,171)	(0,072)	(0,024)	(0,046)	(0,047)	(0,048)	(0,137)	(0,049)	(0,069)
Total	(0,023)	0,000	(0,001)	0,002	(0,007)	(0,009)	(0,003)	(0,007)	(0,018)	(0,008)	(0,043)	(0,046)

Consideremos os usuários 1, 2, 4, 6, 7, 9 e 11. Para que estes passem a produzir mais, saindo do Cenário 3 (distribuição por quotas) para o 9 (distribuição otimizada), obrigatoriamente requererão maior quantidade de água durante o ciclo da cultura, variável ao longo do ano. Entretanto, no mês de fevereiro, esta quantidade extra de água que tais usuários requisitam, não está disponível para o consumo, pois outros usuários já estão usando. No entanto, como foi mostrado que estes têm um menor rendimento hídrico que os anteriormente citados, eles passarão a receber apenas a água disponível que resta após o total suprimento dos usuários com maior rendimento hídrico, o que pode ser confirmado ao se analisar a Tabela 7.7 juntamente com as Tabelas A.11 e A.12, que se referem às rendas líquidas e áreas ocupadas por cada usuário em cada cenário proposto.

É importante ressaltar que tanto a diferença de 0,30% entre os dois cenários, utilizados como exemplo, quanto os outros valores em negrito na Tabela 7.6 representam variações da renda líquida com a realocação da água nas situações onde é considerada apenas a eficiência das culturas relacionada à classe de aptidão de solos para a irrigação, não representando a realidade do sistema que apresentará variações superiores às da tabela. Não devemos esquecer que para a implementação de um mercado de água em um sistema de abastecimento deve ser considerado como fator decisivo práticas agrícolas associadas diretamente a exercícios humanos, pois serão estes que definirão o bom do mau usuário de recursos hídricos. Dentre estas práticas, está o método de aplicação de água nas plantas, que define o quanto do recurso está se desperdiçando. Destaca-se que para todos os irrigantes do sistema estudado, foi atribuído o mesmo método para uma mesma cultura, ou seja, no caso da monocultura da cana-de-açúcar, todos os irrigantes praticam o mesmo método de irrigação, conforme é indicado na Tabela A.6. Experiências internacionais (GARRIDO, 1998) propõem que um mercado de água torna-se viável quando, primeiramente, a água é escassa para o suprimento da demanda de todos os usos e quando se atinge variações da renda líquida gerada entre 1 e 12%, dependendo das taxas tributárias da localidade onde será implementada.

7.4. Análise de impactos causados pela variação do preço da água após as intervenções de regularização do canal

Conforme mencionado na seção 6.2.8, os resultados obtidos nesta análise já levam em consideração a cobrança pelo uso da água da bacia do rio Paraíba do Sul, paga pelos irrigantes, como água destinada ao setor agrícola.

O que se propõe nesta seção é a realização de uma análise dos impactos causados sobre o sistema e cada irrigante quando são estabelecidos preços pelo uso da água após a regularização do canal como uma forma de pagamento pelas obras de melhoria, observando-se até que quantias usuários estão aptos a pagar e como a variação dos custos estabelecidos influencia na produtividade, renda líquida global e retorno econômico individual.

Por não haver valores precisos relacionados aos gastos necessários para a implementação de tais melhorias, a análise a seguir poderá servir de referência para futuros orçamentos que cobranças pelo uso da água disponibilizada sejam estabelecidas como pagamento das obras executadas.

7.4.1. Critérios

Variações do custo da água foram feitas com um intervalo de R\$ 0,02 até o ponto que se atingisse um valor que tornasse inviável a produção de uma determinada cultura e em um dado tipo de solo. A partir deste valor, começam a ocorrer variações na renda líquida gerada pelo sistema, pois agricultores passariam a não produzir mais a cultura, pois seu lucro seria anulado pela cobrança da água.

Como a análise é dedicada aos estudos dos impactos pós-intervenções, apenas os cenários com distribuição por quotas¹² que correspondem a esta situação foram analisados, ou seja, os cenários 3 e 6. Em cada cenário, foram feitas algumas verificações relacionadas à variação do valor unitário do metro cúbico captado por usuário. São elas: (1) variação da renda líquida gerada pelo sistema no projeto; (2)

¹² Ressalta-se que os cenários que estabelecem a alocação de água otimizada foram apresentados somente para se estabelecer referências comparativas, não tendo, a princípio, possibilidades reais de implementação.

arrecadação das contribuições por usuário com o aumento do valor unitário cobrado pela água; (3) mudança do retorno financeiro do sistema considerando a cobrança pela água usada; (4) variação da renda líquida individual e; (5) da área plantada de cada usuário.

7.4.2. Monocultura

De acordo com a Figura 7.1, constata-se que a variação do custo da água não causou variações na renda líquida do sistema até que atingisse R\$ 0,148, quando a cana cultivada em solos de classe de aptidão 4 passa a não ser mais lucrativa. Por isso, nota-se que, ao atingir este valor, a renda líquida gerada sofre uma considerável queda, causada pela inviabilidade de produzir em tais solos. O mesmo ocorre com a cana produzida nos solos de classe de aptidão 3, quando o valor da água atinge R\$ 0,154, e posteriormente, ao atingir R\$ 0,155, com a cana cultivada nos solos de classe de aptidão 1 e 2. Tais fatos também podem ser verificados pelas variações das áreas produtivas das propriedades de cada usuário com o aumento do custo da água, apresentadas na Figura 7.2.

No entanto, a maior contribuição arrecadada ocorre quando o metro cúbico de água é cobrado a R\$ 0,148, além dos R\$ 0,0077/m³ já gastos com o bombeamento e a transferência do rio Paraíba do Sul, havendo a arrecadação de R\$ 99.180.000,00 ao longo dos seis anos de projeto. Entretanto, tratando-se da disposição dos usuários em pagar pela água, estabeleceu-se que, para que haja o interesse pelos irrigantes em haver as melhorias do canal sujeitas ao posterior pagamento por elas, aqueles deveriam ter, ao menos, o mesmo retorno financeiro obtido na pior situação de suas produções irrigadas, ou seja, o Cenário 1. Neste cenário, a renda líquida obtida no sistema ao longo dos seis anos de projeto foi de R\$ 89.090.000,00. Para que haja o pagamento pela água nestas condições, esta deveria ter o valor de, no máximo, R\$ 0,020, mais a cobrança pela transferência e o bombeamento, atingindo uma arrecadação de R\$ 13.430.000,00 no final do projeto.

7.4.3. Policultura

Como foi visto na seção anterior, as condições da produção da cana-de-açúcar na região permitem que seja cobrado pela água um valor máximo de R\$ 0,148. Da mesma forma, cada outra cultura apresenta um valor específico, variando com seu déficit hídrico, valor de mercado e solo ocupado. Devido a isso, a função *Custo da Água x Arrecadação* resultante do Cenário 9 toma uma forma bastante irregular, como ilustra a Figura 7.3.

Conforme é apresentado na figura, a renda líquida global máxima alcançada com a variação do custo pelo uso da água no cenário da policultura é de R\$ 189,1 milhões, quando o valor cobrado pela água é de R\$ 0,097. Este valor é superior a todos os outros obtidos anteriormente porque ao se cobrar tal quantia pela água captada, a produção do coco passa a ser inviável, dando espaço a outras culturas mais rentáveis. Esse resultado mostra que o coco, dentre estas culturas propostas não seria uma boa opção para se produzir. Após atingir este máximo no sistema, a renda líquida gerada pelo sistema passa a sofrer seguidas quedas conforme o custo da água atinge os valores dos rendimentos hídricos (R\$/m³) de cada cultura cultivada em um dado solo.

A maior eficiência hídrica obtida pela adição de outras culturas além da cana no sistema produtivo fez com que a arrecadação, apesar de atingir o máximo de R\$ 108,6 milhões, quando a água adquire o valor unitário de R\$ 0,148, não ultrapassasse 60% do total gerado pelo sistema. O aumento da eficiência hídrica causado pela adição de culturas mais rentáveis também interfere no valor unitário admissível para que os usuários permaneçam lucrando o equivalente à pior renda líquida obtida nos cenários de policultura (Cenário 4). Este valor atinge a ordem de R\$ 0,031, possibilitando a arrecadação de R\$ 29,9 milhões. Constata-se, portanto, que uma possível cobrança pelo uso da água como forma de pagamento pelas melhorias no canal seria mais viável caso houvesse a mudança de práticas por parte de alguns usuários, deixando de cultivar somente a cana e passando a produzir outras culturas mais lucrativas.

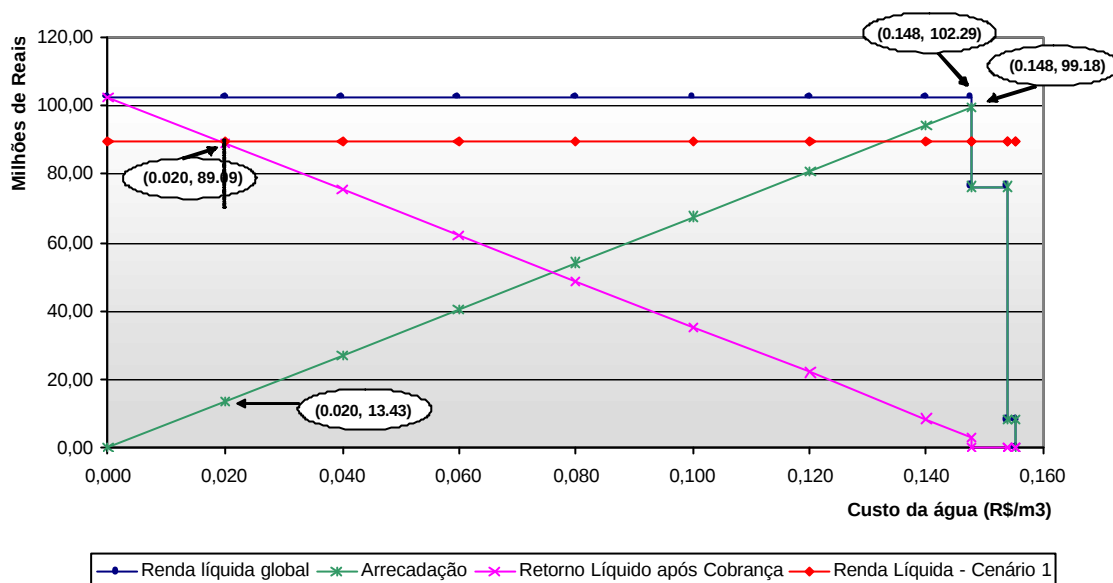


Figura 7.1 –Variação da renda líquida gerada, do retorno financeiro e da quantia total arrecadada com o aumento do valor unitário da água captada na monocultura.

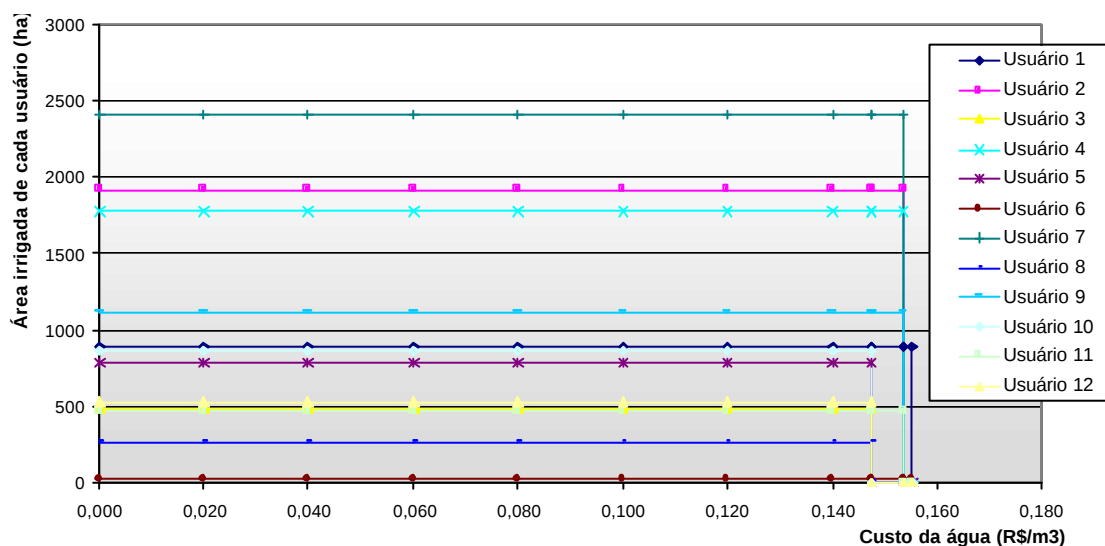


Figura 7.2– Variação da área produtiva de cada usuário com o aumento do valor unitário da água captada na monocultura.

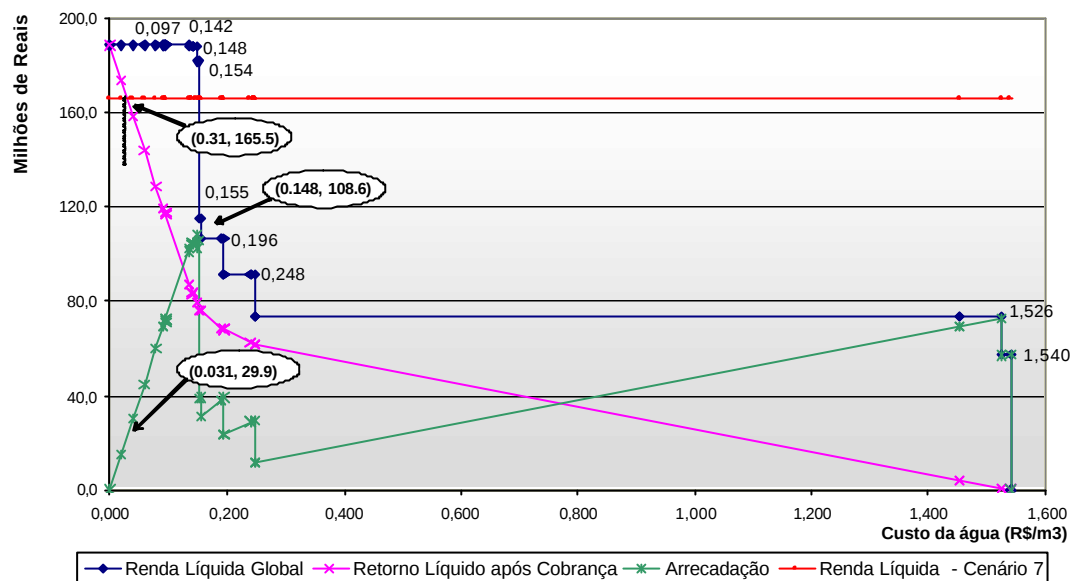


Figura 7.3 - Variação da renda líquida gerada, do retorno financeiro e da quantia total arrecadada com o aumento do valor unitário da água captada na policultura.

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O desenvolvimento deste estudo teve como principal motivação a atual condição por que se passa a rede de canais de irrigação e drenagem da Baixada Campista frente aos conflitos existentes entre irrigantes devido à falta de uma política de gerenciamento do uso adequado de tais estruturas, atualmente discutida entre instituições federais e estaduais.

Propôs-se a utilização de técnicas de otimização de forma que, ao mesmo tempo que possíveis soluções para os conflitos entre usuários dos canais pudessem ser apresentadas, estabelecendo-se diferentes suposições, poderia também conferir-se a maximização do rendimento hídrico do sistema.

Dentre estes atributos, o que tomou destaque neste trabalho foi a possibilidade de analisar a sustentabilidade do sistema comparando resultados nas atuais situações hidráulicas do canal estudado com outros obtidos após a implementação de possíveis intervenções para a regularização do corpo hídrico. Além disso, a técnica também possibilita a realização de outras análises como a viabilidade da implementação do mercado de água, ferramenta de gestão comum em muitos países.

O modelo matemático foi aplicado em doze cenários. Algumas considerações foram realizadas para as suas definições de forma que representassem diferentes posições tomadas pelos atores dos conflitos analisados, além de possíveis intervenções realizadas no corpo hídrico, de forma que se tornasse viável a análise das diferentes decisões.

A partir do estudo dos resultados obtidos nos diversos cenários, algumas conclusões puderam ser tomadas, não somente com relação ao sistema hídrico, mas também a respeito do próprio modelo.

8.1. Sobre o modelo

Apesar de simplificado, o modelo se mostrou bastante eficiente na otimização da alocação dos recursos hídricos disponíveis a cada irrigante, maximizando a receita líquida gerada pelo sistema formado pelos usuários do canal. Cada cenário obteve um resultado distinto do outro devido às restrições estabelecidas pela disponibilidade de recursos escassos como a água e a terra irrigável, além de restrições de produção das culturas, assim como a imposição de cultivo de várias plantas ou somente da cana-de-açúcar.

O modelo respondeu perfeitamente conforme o esperado. No caso da distribuição por quotas para a monocultura, devido maior homogeneidade dos resultados, não há muito que comentar, exceto pelo fato que pôde-se observar uma leve variação da renda líquida do sistema entre os cenários onde prevalecem a distribuição por quotas e a distribuição otimizada.

No caso da policultura, o modelo foi capaz de alocar água às culturas com maior rendimento hídrico, até que se fosse alcançada a saturação desta na região, passando a fornecer água à cultura com o segundo maior valor de rendimento hídrico. Concomitantemente, o modelo pôde definir quais irrigantes deveriam produzir determinada cultura respeitando as limitações impostas de ocupação máxima de cada planta. Isso tudo depois de alocar água suficiente para a cana, que possuía restrições mínimas de ocupação do solo. Em seguida, nos cenários em que quotas de água passam a não existir, o modelo respondeu de forma semelhante às respostas obtidas nos cenários anteriores, porém, os recursos hídricos passaram a ser direcionados, preferencialmente, para as propriedades com melhores solos, ou seja, aqueles que propiciam maior eficiência na precipitação.

Ressalta-se que, não somente para análise do sistema de irrigação do canal Coqueiros, mas para qualquer outro sistema de recursos hídricos, a capacidade do modelo de otimizar diferentes cenários para serem utilizados no suporte a decisões de conflitos pelo uso da água torna-se infinito, pois são inúmeras as variáveis que são fixadas como restrições no modelo, desde época de plantio e cultura cultivada até valores de mercado e custo pelo uso da água.

8.2. Sobre os resultados

Antes da aplicação da técnica adotada ao estudo de caso, considerações foram tomadas e algumas metodologias para a geração de informações inexistentes tiveram que ser desenvolvidas.

A mais importante é o fato que, apesar de muitos agricultores produzirem cana-de-açúcar em regime de sequeiro, foi previsto em um cenário futuro a intensificação da prática da irrigação pelos mesmos. Também foram consideradas duas tendências: a manutenção da monocultura e a migração para a policultura.

Para desviar do extensivo trabalho de digitalização necessário para obter com detalhes a topografia do relevo da região da Baixada Campista, necessário para a determinação dos locais potencialmente sujeitos a inundações e alagamentos, foi aplicada uma metodologia que indicasse trechos com restrições de vazão. Resultados foram obtidos, mas para que houvesse melhor representatividade, visitas de campo teriam que ser feitas. No entanto, devido ao curto prazo para o desenvolvimento deste trabalho, não foi possível realizá-los para esta finalidade. Apesar de tudo, para fins acadêmicos, o procedimento mostrou-se útil.

A metodologia proposta para a determinação dos usuários dos recursos hídricos do canal a partir da delimitação das micro-bacias dos canais secundários e terciários, juntamente com a distribuição das classes de aptidão de solos para a irrigação, mostrou-se uma eficiente ferramenta para a localização de usos de água do setor agrícola, em situações que a ausência de um cadastro confiável de usuários de recursos hídricos torna o planejamento do uso dos recursos hídricos da bacia hidrográfica um processo limitado. Entretanto, o procedimento adotado para determinar as delimitações das micro-bacias de contribuição não foi o mais apropriado, pois processos manuais, como o realizado neste trabalho, sempre estão sujeitos a erros de aproximação. Sugere-se a utilização de *softwares* específicos para a obtenção de resultados mais precisos.

Ambos os procedimentos adotados e mencionados acima foram necessários para cobrir a indisponibilidade de informações precisas, essenciais para a execução de um plano de recursos hídricos de uma unidade hidrológica.

Pudemos observar no capítulo anterior que o provável fator limitante na produção agrícola na região é a disponibilidade insuficiente de água para os irrigantes. Essa afirmativa é fortificada após observar-se que, caso haja intervenções estruturais no canal partindo-se de uma situação equivalente a do Cenário 1, uma variação significativa na renda líquida gerada ocorrerá, viabilizando tais obras. Entretanto, se a mesma comparação passa a ser feita com o Cenário 2, observa-se que não há expressiva variação no lucro, tornando as intervenções desnecessárias. Uma possível causa de tais resultados é a restrição de vazão máxima de 8,0 m³/s. Dessa forma, um teste realizado, alterando as restrições de vazão do modelo para valores extremamente altos, de forma que não houvesse mais restrições na produção causadas pela falta de água na cabeceira do canal, resultou em significativas variações da renda gerada em alguns cenários, conforme é apresentado na Tabela 8.1.

Percebe-se que as situações onde ocorreram as maiores variações foram nos cenários que prevaleceram a monocultura, após a realização de intervenções estruturais, com um acréscimo de, aproximadamente, 22,0% na renda líquida gerada. No caso da policultura, também é constatado um acréscimo significativo de 5,5% na renda líquida gerada pelos usuários nos cenários que propõem intervenções estruturais nos canais. Dessa forma, conclui-se que é altamente recomendado que, ao haver obras que tragam melhorias na condutividade hidráulica do canal, também disponibilizem maior vazão de água para os usuários, de forma que toda a terra irrigável seja utilizada, maximizando a produção.

Tabela 8.1 – Comparação de rendas líquidas geradas com e sem restrições de vazão na cabeceira do canal nos diversos cenários.

Parâmetros	Quotas						Otimizada					
	Monocultura			Policultura			Monocultura			Policultura		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Renda líquida com 8,0m ³ /s (milhões de Reais)	89,1	102,3	102,3	165,5	183,9	188,5	89,2	102,5	102,6	165,8	184	188,6
Renda líquida sem limitações de vazão na cabeceira (milhões de Reais)	89,1	116,5	125,3	165,5	184,8	198,9	89,2	116,5	125,3	165,8	184,8	198,9
Variação na renda líquida (%)	0	13,9	22,5	0	0,5	5,5	0	13,6	22,1	0	0,4	5,5
Vazão máxima atingida (m ³ /s)	-	9,1	9,8	-	8,1	8,8	-	9,1	9,8	-	8,1	8,8

8.3. Recomendações

O canal Coqueiros foi escolhido factível como estudo de caso desta análise por representar de maneira ampla os problemas que passam os agricultores da região da Baixada Campista, que se agravarão com a intensificação do uso dos canais como corpo adutor de água para irrigação. Portanto, com relação às recomendações para o desenvolvimento da técnica adotada, propõe-se a extensão da análise para todo o sistema, correspondente aos canais Coqueiros, São José, Cambaíba, São Bento e Quitunguta, que apresentam outras sortes de conflitos entre diferentes setores. Sugere-se também a realização de estudos para a determinação do melhor cenário que estabeleça acordos entre os atores do conflito, conjuntamente com o órgão gestor dos canais, possivelmente através de técnicas de teoria dos Jogos, mais especificamente, a Modelagem de Conflitos, ou mesmo analiticamente.

Entretanto, destaca-se a necessidade de introduzir outros fatores não considerados no modelo como perdas de água por infiltração nos períodos de seca assim como a contribuição de águas subterrâneas em períodos úmidos, variações do nível do lençol freático, salinidade da água, curvas de variação de adaptabilidade das culturas ao clima/solo, além da consideração de aspectos sociais, políticos e econômicos que retratem fielmente as condições atuais da região. Tais considerações entrariam no modelo como novas equações de restrição.

A aplicação do modelo na alocação ótima dos recursos hídricos passa a ser viável após a definição dos critérios de compartilhamento da água disponível. Destaca-se que existem outras formas de distribuição de água entre irrigantes, além das utilizadas neste trabalho. No caso da utilização de outra forma senão as adotadas neste estudo, modificações no sistema de inequações serão inevitáveis, porém de fácil execução. No entanto, as modificações de alguns critérios podem vir a tornar o modelo em um sistema não-linear, tornando a sua resolução não tão simples.

Com relação à proposta de um mercado de águas no sistema, pode-se observar no atual contexto da gestão dos recursos hídricos no País, que esta é, ainda, uma situação infactível, pois para a implementação de tal mecanismo, instrumentos legais são fundamentais para o controle do mercado. Além disso, o mercado de águas é aplicável

somente em situações onde não há água suficiente para o abastecimento da demanda. Caso venha a ser implementada a proposta de se aumentar a vazão na cabeceira do canal, apresentada no item anterior e justificada na Tabela 8.1, a situação de um mercado passa a ser inválida.

Constata-se que a falta de informações hidráulicas e hidro-pedológicas, seja pela indisponibilidade, obsolescência ou inconsistência de dados, é um fator limitante no desenvolvimento de estudos mais precisos para o aproveitamento hídrico do canal, trazendo limitações para a modelagem através de arbitrações. Este problema não é particular do canal Coqueiros. Toda a região apresenta as mesmas características e, devido a isso, foi necessária a realização de varias considerações para o prosseguimento deste trabalho. Apesar de atualmente uma maior esforço estar sendo concentrado na regularização da gestão dos canais, por parte de órgãos federais, estaduais, centros de pesquisa e usuários dos canais, algumas recomendações são apresentadas a seguir:

- delimitação das bacias de drenagem dos canais;
- avaliação da qualidade da água em diferentes trechos dos canais de forma que se possa haver o controle da concentração de sais na água usada na irrigação;
- estudos de adaptabilidade às características climatológicas e pedológicas das culturas propostas tanto pelo PROJIR quanto pelo FRUTIFICAR;
- controle de vazões afluentes nas comportas dos canais no rio Paraíba do Sul, assim como dos níveis de água em diferentes pontos ao longo dos canais;
- manutenção de níveis do lençol freático toleráveis pelas culturas propostas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFZAL, J.; NOBLE, D. H.; WEATHERHEAD, E. K., 1992, "Optimization model for a alternative use of different quality irrigation waters". **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE. v.118, n.2, pp.218-228.
- ALBUQUERQUE, F. G.; LABADIE, J. W., 1997, "Optimal predictive control for canal operations". **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE. v. 123, n.1, pp.45-54.
- ALMEIDA, F. T., no prelo, **Proposta de gestão dos recursos hídricos para os canais da Baixada Campista com vista à irrigação**. Projeto de pesquisa. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ. 18p.
- ANA (Agência Nacional de Águas), 2004, Disponível em <http://ana.gov.br/>.
- AZEVEDO, H. J.; SOUZA, D.; RABELO, P. R., 2000, **Boletim climático do Campus Leonel Miranda**, Boletim Técnico Nº 16, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Campos dos Goytacazes, RJ. 38p.
- BARROS, M. T.; BRAGA, B. P. F., 1991, "Otimização estocástica implícita da operação de sistemas de reservatórios considerando múltiplos objetivos". **Caderno de Recursos Hídricos**, RBE, v.9, n.1, pp.33-51.
- BEARD, L. R., 1973, "Status of water resources systems analysis". **Journal of the Hydraulics Division**, ASCE, v.99, HY4, pp.559-565.
- BECKER, L.; YEH, W. W-G., 1974, "Optimization of real time operation of a multiple-reservoir system". **Water Resources Research**, v.10, n.6, pp.1107-1112.
- BERNARDO, S., 1989, "Desenvolvimento da irrigação no Brasil". **Caderno de Recursos Hídricos**, RBE, ABRH, v.7, n.2, pp.31-38.

- BIDEGAIN, P.; BIZERRIL, C.; SOFFIATI, A., 2002, **Lagoas do Norte Fluminense – perfil ambiental**. Rio de Janeiro: Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, Projeto Planágua Semads / GTZ. 148 p.
- BLANK, H. G., 1974, “Functions to predict irrigation problems – Discussion” **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, ASCE, v.101, IR1, pp.75-77.
- BOMAM, B. J.; HILL, R. W. , 1997, “LP operation model for on-demand canal system”. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, v.115, n.4, pp.687-700.
- BRAGA, B. P. F., 1987, “Técnicas de otimização e simulação aplicadas em sistemas de recursos hídricos”. In: **Modelos para gerenciamento de recursos hídricos**, Editora Nobel/ABRH, São Paulo.
- BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. L.; BECKER, L. *et al.*, 1985 , “Capacity expansion of Sao Paulo water supply”. **Journal of Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 111, n.2, pp.238-252.
- BRITO, F. S. , 1924, **Defesa contra inundações**. Rio de Janeiro: Imprensa Nacional.
- _____, 1943, **O saneamento de Campos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Imprensa Nacional.
- BRITO, R. A.L.; COUTO, L.; SANTANA, D. P., 2002, “Agricultura irrigada, recursos hídricos e produção de alimentos”, **ITEM**. n.55, pp.64-69.
- BUTCHER, W. S.; HAIMEs, Y. Y.; HALL, W. A., 1969, “Dynamic programming for the optimal sequencing of water supply projects”. **Water Resources Research**. v.5, n.6, pp.1196-1204.

- CARMO FILHO, A. A., 1978, **Um modelo de simulação e operação de um sistema de irrigação com reservatórios em rios intermitentes**, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 170p.
- CARNEIRO, P. R. F., 2004, **Dos pântanos à escassez: uso da água e conflito na Baixada dos Goytacazes**, Annablume Editora, Rio de Janeiro, RJ. 136p.
- CARR, D. P. UNDERHILL, H. W., 1974, **Simulation methods in water development**, Irrigation and Drainage Paper 23, FAO, Rome, Italy. 59p.
- CARRIJO, I. B.; REIS, L. F. R.; CHEUNG, P. B. *et al.*, 2003, “Otimização da operação de sistemas de distribuição de água utilizando algoritmos genéticos multiobjetivo”. In: **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Curitiba, 20p.
- CARVALHO, D. F.; SOARES, A. A.; RIBEIRO, C. A. A. S. *et al.*, 2000, “Otimização do uso da água no perímetro irrigado do Gorotuba, utilizando-se a técnica da programação linear”. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.2, pp.203-209.
- CARVALHO, J. F.; OLIVEIRA, C. A.; ANDRADE, E. P. A., 1976, “Programa Nacional de Irrigação”. In: **Anais do III Seminário Nacional de Irrigação**, Fortaleza, v.3, pp.283-327.
- CARVALHO, M. A., 2003, **Sistema de suporte a decisão para alocação de água em projetos de irrigação**. Tese de D.Sc., Escola Politécnica/USP, SP, Brasil. 173 p.
- CARVALLO, H. O.; HOLZAPFEL, E. A.; LOPEZ, M. A. *et al.*, 1998, “Irrigated cropping optimization”. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, v.124, n.2, pp.76-72.

- CELESTE, A. B.; SUZUKI, K.; KADOTA, A., 2003, “Algoritmos genéticos para operação ótima de sistemas de recursos hídricos em tempo real”. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, ABRH, v.8, n.3, pp.71-78.
- CHÁVEZ-MORALES, J.; MARIÑO, M. A.; HOLZAPFEL, E. A., 1992, “Planning simulation model of irrigation district”. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE. v.118, n.1, pp74-87.
- CHOW, V. T., 1964, **Handbook of applied hydrology**. 1a ed., McGraw-Hill, New York, USA.
- CHRISTOFIDIS, D., 1999, **Recursos hídricos e irrigação no Brasil**. Centro de Desenvolvimento Sustentável, UnB, Brasília, DF. 34 p.
- _____, 2001, “Os recursos hídricos e a prática da irrigação no Brasil e no mundo”, **ITEM** n.49, pp.8-13.
- COELHO, E. F.; SOUSA, V. F.; NETTO, A. O. A. *et al.*, 2000, **Manejo de irrigação em fruteiras tropicais**. Circular Técnica nº 40, EMBRAPA, Cruz das Almas, BA:. 48p.
- CURI, R. C.; CURI, W. F.; OLIVEIRA, M. B. A., 2004, “Análise de alterações na receita líquida de um perímetro irrigado no semi-árido sob condições de variações hídricas e econômicas”. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v.9, n.3, pp.39-53.
- DASTANE, N. G., 1974, **Effective rainfall in irrigated agriculture**. Irrigation and Drainage Paper 25, FAO, Rome, Italy. 62p.
- DAY, J. C.; WEISZ, R. N., 1976, “A linear programming model for use in guiding urban floodplain management”. **Water Resources Research**. v.12, n.3, pp.349-359.

DASH OPTIMIZATION, 2004. Disponível em <http://www.dashoptimization.com/>.

DOOREMBOS, J.; KASSAM, A. H., 1979, **Yield response to water**. Irrigation and Drainage Paper 33, FAO, Rome, Italy. 193p.

DOOREMBOS, J.; PRUITT, W. O., 1974, **Guidelines for Predicting Crop Water Requirements**, Irrigation and Drainage Paper 24, FAO, Rome, Italy. 144 p.

DORFMAN, R., 1965, “Formal models in the design of water resource systems”. **Water Resources Research**. v.1, n.3, pp.329-336.

FAO., 1971, **Irrigation practice and water management**. Irrigation and Drainage Paper 1, Rome, Italy, 84p.

FCTH (Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica), 2003, **CLiv: manual do usuário**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 109p. Disponível em http://www.fcth.br/pub/software/manual_cliv.pdf

GARRIDO, A., 1998, “Economical analysis of water markets in the Spanish agricultural sector: can they provide substantial benefits”. In: Easter, K. W., Dinar, A., Rosegrand, M. W. (Eds.) **Markets for water: potential and performance**. Kluwer Academic Publishers, Boston.

GÓES, H. A., 1934, **Relatório apresentado pelo engenheiro chefe da Comissão de Saneamento da Baixada Fluminense**. Comissão de Saneamento da Baixada Fluminense, Rio de Janeiro. 534 p.

GOMES, H. P., 1999, **Engenharia de irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento**. 3ª ed., Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande – PA. 412p.

- GOODRICH, R. D., 1956, "Methods of determining consumptive use of water in irrigation". **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, ASCE, v.82, n.1, pp.1-11.
- HAGAN, R. M.; STEWART, J. I., 1972, "Water deficits – irrigation design and programming". **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, ASCE, v.98, n.IR2, pp.215-237.
- HALL, W. A., 1961, "Aqueduct capacity under an optimum benefit policy". **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, ASCE, v.87, IR3, pp.1-11.
- HALL, W. A.; BUTCHER, W. S.; ESOGBUE, A., 1968, "Optimization of the operation of a multiple-purpose reservoir by dynamic programming". **Water Resources Research**, v.4, n.3, pp.471-477.
- HALL, W. A.; DRACUP, J. A., 1970, **Water resources systems engineering**. 1^a ed., McGraw-Hill, New York, USA. 372p.
- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A., 1983, "Estimating potential evapotranspiration". **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, ASCE, v.108, n.IR3, pp. 225-230.
- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A., 1984, "Economic considerations of deficit irrigation". **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, v.110, n.4, pp. 343-358.
- JAIRAJ, P. G.; VEDULA, S. "Multireservoir system optimization using fuzzy mathematical programming". **Water Resources Management**, v.14, n.6, pp.4575-472, 2000.
- JAMES, L. D.; LEE, R. R., 1971, **Economics of water resources planning**. 1^a ed., McGraw-Hill, New York, USA. 615p.

- KARMAKAR, N., 1984, "A new polynomial time algorithm for linear algorithm", **Combinatoria**, n.4, pp.373-395.
- KHACHIYAN, L. G., 1979, "A new polynomial algorithm for linear programming". **Soviet. Math. Doclady**, v.20, pp.191-194.
- KHAN, I. A., 1982, "A model for managing irrigated agriculture". **Water Resources Bulletin**, American Water Resources Association. v.18, n.1,p p.81-87.
- KHEPAR, S. D.; GULATI, H. S.; YADAV, A. K. *et al.*, 2000, "A model for equitable distribution of canal water". **Irrigation Science**, v.19, pp.191-197.
- KINDLER, J., 1992, "Rationalizing water requirements with aid of fuzzy allocation model". **Journal of Water Resources Planning and Management**, ASCE, v.118, n.3, pp.308-323.
- KLAR, A. E., 1991, **Irrigação: frequência e quantidade de aplicação**. Editora Noblel, São Paulo. 156p.
- KUMAR, C. N.; INDRASENAN, N.; ELANGO, K., 1998, "Nonlinear programming model for extensive irrigation". **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, v.124, n.2, pp.123-130.
- KUO, S-F.; MERKLEY, G. P.; LIU, C-W., 2000, "Decision support for irrigation project planning using a genetic algorithm". **Agricultural Water Management**, v.45, pp.243-266.
- LABHID (Laboratório de Hidrologia e Estudos do Meio Ambiente da COPPE/UFRJ), 2001, **Sistema de Informações e de Apoio à Decisão de Outorga para a Bacia do Paraíba do Sul**. In: Projeto Gestão dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (PGRH-RE-03-R0), Fundação COPPETEC/ANA, Rio de Janeiro.

- _____, 2002a, **Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul**. In: Projeto Gestão dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (PGRHRE-09-R0), Fundação COPPETEC/ANA, Rio de Janeiro.
- _____, 2002b, **Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul**. In: Projeto Gestão dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (PGRHRE-10-R0), Fundação COPPETEC/ANA, Rio de Janeiro.
- LAMEGO, A. R., 1974, **O homem e o brejo**. 2ª ed., Editora Lidador, Rio de Janeiro. 217p.
- LEENHARDT, D.; TROUVAT, J-L.; GONZALÈS, G. *et al.*, 2004, “Estimating irrigation demand for water management on a regional scale: ADEAUMIS, a simulation platform based on bio-decisional modeling and special information”. **Agricultural Water Management**, v.68, pp.207-232.
- LEONTIEF, W. W., 1936, “Quantitative Input and Output Relations in the Economic Systems of the United States” **Review of Economics and Statistics**, v.18, n.3 pp.105–125.
- LIMA, J. E. F. W.; FERREIRA, R. S. A.; CHRISTOFIDIS, D., 1999, “O uso da irrigação no Brasil”. In: O estado das águas no Brasil. Organizado por Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas. ANEEL/SIH/MMA/SRH/MME, Brasília, pp.73-83.
- LINS, M. P. E.; CALÔBA, G. M., no prelo, **Programação linear**. Universidade Federal do Rio de Janeiro/Departamento de Engenharia de Produção.
- LYRA, F.J., CARVALHO, M., THOMAS, P., 2001, “Um sistema de informações e apoio à outorga para a bacia do rio Paraíba do Sul”. In: **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, ABRH, Aracaju.

- MAASS, A.; HUFSCHEIDT, M. M.; DORFMAN, R. *et al.*, 1962, **Design of water-resource systems**. 1ª ed. Harvard University Press. USA. 620p.
- MAJI, C. C.; HEADY, E. O., 1978, “Intertemporal allocation water in the Mayurakshi Project (India): an application of chance-constrained linear programming”. **Water resources Research**, v.14, n.2, pp.190-196.
- _____, 1980, “Optimal reservoir management and crop planning under deterministic and stochastic inflows”. **Water Resources Bulletin**, v.16, n.3, pp.438-443.
- MANNOCCI, F.; MECARELLI, P., 1994, “Optimization analysis of deficit irrigation systems”. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, v.120, n.3, pp.484-503.
- MANTANGA, G. B.; MARIÑO, M. A., 1979, “Irrigation planning 1. Cropping pattern”. **Water Resources Research**, v.15, n.3, pp.672-678.
- MARQUES, V. S.; ANDRÉ, R. G. B.; SUCHAROV, E. C. *et al.*, no prelo, **Possíveis modificações na classificação climática das regiões norte e noroeste do Estado do Rio de Janeiro**. Secretaria de Estado de Ciência e Tecnologia/SIMERJ (Sistema de Meteorologia do Estado do Rio de Janeiro).
- MATEOS, L., LÓPEZ-CORTIJO, I., SAGARDOY, J. A., 2002, “SIMIS: the FAO decision support system for irrigation scheme management agricultural water management”, **Agricultural Water Management**. v. 56, pp. 193-206.
- MAUAD, F. F.; ALBERTIN, L. L.; CORRÊA FILHO, C. R. R. *et al.*, 2003, “Avaliação de conflitos de usos múltiplos de água em sistemas de recursos hídricos: o estado da arte”, In. **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Curitiba. 22p.

- MEDEIROS, J. F.; MIZAE, A. R., 2003, “Modelo de simulação e otimização da agricultura irrigada sob salinização”. In: **Anais do XIII Congresso Brasileiro de Irrigação e Drenagem**. Juazeiro – BA.
- MEIRELLES, F., 2000, “Impactos decorrentes nos principais usuários: Agricultura”. In: Thame, A. C. M. A (ed) **Cobrança pelo uso da água**, Capítulo 7, São Paulo, SP.
- MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F.; BERNARDO, S. *et al.*, 2003, “Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ”. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, pp.275-279.
- NAVIA, O., no prelo, **Manutenção dos canais de drenagem de Campos dos Goytacazes**, 46p.
- NEELAKANTAN, T. R.; PUNDARIKANTHAN, N. V., 1999, “Hedging rule optimization for water supply reservoirs system”. **Water Resources Management**, v.13, n.6, pp.409-426.
- OLIVEIRA, J. A.; LANNA, A. E. L., 1997, “Otimização de um sistema de múltiplos reservatórios atendendo a múltiplos usos no Nordeste brasileiro”. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, ABRH, v.2, n.7, pp.123–142.
- OTTONI FILHO, T. B., 1988, “Por que irrigar? I – Considerações agronômicas e de manejo”. **Caderno de Recursos Hídricos**, RBE, ABRH, v.6, n.1, pp.55-68.
- PAUDYAL, G. N.; GUPTA, A. D., 1990, “Irrigation planning by multilevel optimization”. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, v.116, n.2, pp.273-291.
- PORTO, R. L.; LANNA, A. E. L.; CIRILO, J. A. *et al.*, 2002, **Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos**. Porto, R. L. (ed) 2ª ed., Porto Alegre, RS, UFRGS, 420p.

- PRAJAMWONG, S.; MERKLEY, G. P.; ALLEN, R. G., 1997, "Decision support model for irrigation water management". **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, v.123, n.2, pp.106-113.
- REICHARDT, K., 1990, **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo, Editora Manole, 188p.
- REVELLE, C.; JOERES, E.; KIRBY, W., 1969, "The linear decision rule in reservoir management and design. 1 – Development of the stochastic model". **Water Resources Research**. v.5, n.4, pp.767-777.
- ROGERS, P., 1968, "A game theory approach to the problems of international river basins". **Water Resources Research**, v.5, n.4, pp.749-760.
- RUSSEL, E. J., 1942, **Soil condition and plant growth**. 7ed. Longmans, Green and Co. London, England, 655p.
- SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F. W.; CHAVES, A. G. M. *et al.*, 2001, **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**, ANEEL/ANA, Brasília. 328p.
- SOLTANI-MOHAMMADI, G. R., 1972, "Problems of choosing irrigation techniques in a developing country". **Water Resources Research**, v.8, n.1, pp.1-6.
- SONDOTECNICA, 1983, Cartografia Geral. In: Projeto de irrigação e drenagem da cana-de-açúcar na região Norte Fluminense. Nº SF.24-Y-A-II-2-NO; SF.24-V-C-V-2-SO; SF.24-V-C-V-4-SE; SF.24-V-C-V-4-SO; SF.24-V-C-V-3-SE; SF.24-V-C-V-4-NO.
- _____, 1983b, **Mapa de classe de solo e de aptidão das terras para irrigação**. In: Projeto de irrigação e drenagem da cana-de-açúcar na região Norte Fluminense. Nº SF.24-V-C-V-3-NE-B; SF.24-V-C-V-3-NE-D; SF.24-V-C-V-3-NE-F; SF.24-V-C-V-3-SE-A; SF.24-V-C-V-3-SE-B; SF.24-V-C-V-3-SE-D; SF.24-V-C-V-4-NO-E; SF.24-V-C-V-4-SO-A; SF.24-V-C-V-4-SO-B; SF.24-V-

C-V-4-SO-C; SF.24-V-C-V-4-SO-D; SF.24-V-C-V-4-SO-E; SF.24-V-C-V-4-SO-F; SF.24-Y-A-II-2-NO-A; SF.24-Y-A-II-2-NO-B; SF.24-Y-C-Y-3-SE-A.

_____, 1984a, **Estudos de agronomia – Relatório técnico setorial**. In: Projeto de irrigação e drenagem da cana-de-açúcar na região Norte Fluminense, v.1, Tomo 2.

_____, 1984b, **Estudos e levantamentos pedológicos – Relatório técnico setorial**. In: Projeto de irrigação e drenagem da cana-de-açúcar na região Norte Fluminense, v.1, Tomo 3.

_____, 1984c, **Estudos sócio-econômicos**. In: Projeto de irrigação e drenagem da cana-de-açúcar na região Norte Fluminense, v.1. Tomo 3.

STEWART, J. I.; HAGAN, R. M., 1973, “Functions to predict effects of crop water deficits”. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, ASCE, v.99, n.1R4, pp.421-439.

STEWART, J. I.; HAGAN, R. M.; PRUITT, W. O., 1974, “Functions to predict irrigation problems”. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, ASCE, v.100, 1R2, pp.179-199.

TAO, T.; LENNOX, W. C., 1991, “Reservoir operations by successive linear programming”. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.117, n.2, pp.274-280.

TECNORTE (Parque de Alta Tecnologia do Norte Fluminense), no prelo, **Projeto de revitalização dos canais da Baixada Campista**. Secretaria de Estado de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio de Janeiro/FENORTE, Campos do Goytacazes - RJ.

TELLES, D. A., 1986, “Métodos de irrigação” In: Telles, D. D. (ed). **Elaboração de projetos de irrigação**, capítulo 3, Brasília, Programa Nacional de Irrigação.

- THOMAS, P. T., 2002, **Proposta de uma metodologia de cobrança pelo uso da água vinculada à escassez**. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 153p.
- THORNTON, C. W., 1948, "An approach toward a rational classification of climate". **Geograph. Rev.**, v.38, pp.55-94.
- TYAGI, N. K., 1986, "Optimal water management strategies for salinity control". **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, v.112, n.2, pp.81-97.
- VIEIRA, D. B., 1986, **Relação água, solo e planta** In: Telles, D. D. (ed). **Elaboração de projetos de irrigação**, capítulo 1, Brasília, Programa Nacional de Irrigação.
- VON NEUMANN, J., 1928, "Zur Theorie der Gessellschaftsspiele", **Mathematische Annalen**, v. 100, pp. 295-320.
- WARDLAW, R.; BARNES, J., 1999, "Optimal allocation of irrigation water supplies in real time". **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, v.125, n.6, pp.345-354.
- WURBS, R. A., 1993, "Reservoir-system simulation and optimization models". **Journal of Water Resources Planning and Management**, ASCE, v.119, n.4, pp. 455-472.
- YEH, W. W-G., 1985, "Reservoir management and operation models: a state-of-the-art review". **Water Resources Research**, v.21, n.12, pp.1797-1818.
- _____, 1992, "Systems Analysis in ground-water planning and management". **Journal of Water Resources Planning and Management**, ASCE, v.118, n.3, pp.224-237.
- ZEKRI, S.; EASTER, W., 2005, "Estimating the potential gains from water markets: a case study from Tunisia". **Agricultural Water Management**, n.72, pp.161-175.

ANEXOS

Tabelas

Tabela A.1 – Precipitação efetiva média mensal em relação à *ETp* da cultura e precipitação média mensal.

ETp mensal (mm/mês)	Precipitação média mensal (mm/mês)															
	12,5	25	37,5	50	62,5	75	87,5	100	112,5	125	137,5	150	162,5	175	187,5	200
25	8	16	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	8	17	25	32	39	46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
75	9	18	27	34	41	48	56	62	69	-	-	-	-	-	-	-
100	9	19	28	35	43	52	59	66	73	80	87	94	100	-	-	-
125	10	20	30	37	46	54	62	70	76	85	92	98	107	116	120	-
150	10	21	31	38	49	57	66	74	81	89	97	104	112	119	127	133
175	11	23	32	42	52	61	69	78	86	95	103	111	118	126	134	141
200	11	24	33	44	54	64	73	82	91	100	109	117	125	134	142	150
225	12	25	35	47	57	68	78	87	96	106	115	124	132	141	150	159
250	12	25	37	50	61	72	84	92	102	112	121	132	140	150	158	167

Fonte: DOOREMBOS e PRUITT (1974)

Tabela A.2 – Equações da precipitação efetiva (*P_{Pe}*) quando a capacidade total de água no solo é de 75mm.

ETp (mm/mês)	P _{Pe} (mm/mês)	R ²
25	0,64.PP	1,0000
50	$- 0,0016.PP^2 + 0,7411.PP - 0,8$	0,9996
75	$- 0,0009.PP^2 + 0,708.PP + 0,7857$	0,9993
100	$- 0,0007.PP^2 + 0,7258.PP + 0,8531$	0,9997
125	$- 0,0005.PP^2 + 0,7213.PP + 2,2615$	0,9992
150	$- 0,0006.PP^2 + 0,785.PP + 1,5661$	0,9997
175	$- 0,0007.PP^2 + 0,8295.PP + 1,9464$	0,9998
200	$- 0,0007.PP^2 + 0,8738.PP + 1,5268$	0,9998
225	$- 0,0007.PP^2 + 0,9258.PP + 1,7393$	0,9998
250	$- 0,0009.PP^2 + 1,0142.PP + 0,4982$	0,9997

Tabela A.3 – Coeficientes de ajuste de precipitação efetiva para *CAD* diferentes de 75mm.

Armazenamento efetivo (mm)	20	25	37,5	50	62,5	75	100	125	150	175	200
Fator de armazenamento (<i>fa</i>)	0,73	0,77	0,86	0,93	0,97	1,00	1,02	1,04	1,07	1,07	1,08

Fonte: DOOREMBOS e PRUITT (1974)

Tabela A.4 – Coeficientes de cultura (*kc*) adotados para os cultivares propostos.

Cultura	Coeficientes de Cultura (<i>kc</i>)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Cana-de-açúcar	1,0	1,0	0,9	0,8	0,6	0,4	0,4	0,4	0,6	0,8	0,9	1,0
Abacaxi	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0
Maracujá	0,8	0,8	1,2	1,2	1,2	1,2	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7
Goiaba	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7
Coco	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Tomate	-	-	-	-	-	0,3	0,5	0,9	1,2	0,6	-	-
Cenoura	0,5	0,9	0,9	0,8	-	-	-	-	-	-	-	0,4

Tabela A.5 – Profundidade efetiva das raízes (*Zr*) das culturas selecionadas.

Cultura	<i>Zr</i> (cm)
Cana-de-açúcar	120
Abacaxi	60
Maracujá	120
Goiaba	120
Coco	120
Tomate	120
Cenoura	60

Tabela A.6 – Eficiência de aplicação de água (*ef*) das culturas consideradas.

Cultura	Método	Eficiência (%)
Cana-de-açúcar	Aspersão	60
Abacaxi	Aspersão	60
Maracujá	Gotejamento	85
Goiaba	Aspersão	60
Coco	Gotejamento	85
Tomate	Aspersão	60
Cenoura	Aspersão	60

Tabela A.7 – Déficits hídricos das culturas (*ETp* – *Pp*) por classe de aptidão das terras.

Cultura	Classe de Aptidão da Terra	Necessidade de irrigação líquida (m ³ /ha)												Total Anual
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Cana-de-açúcar	1	773	1.071	990	782	323	100	207	207	200	615	181	270	5.717
	2	773	1.071	990	782	323	100	207	207	200	615	181	270	5.717
	3	781	1.075	994	785	325	102	208	209	204	619	190	280	5.774
	4	812	1.093	1.011	796	337	112	214	218	222	636	229	322	6.001
Abacaxi	1	870	1.341	1.356	1.171	923	738	754	691	440	716	238	406	9.645
	2	870	1.341	1.356	1.171	923	738	754	691	440	716	238	406	9.645
	3	876	1.344	1.360	1.173	925	740	755	693	443	720	246	415	9.690
	4	915	1.366	1.380	1.187	939	751	762	704	465	740	293	466	9.968
Maracujá	1	543	855	1.445	1.252	987	879	633	654	389	393	0	0	8.030
	2	543	855	1.445	1.252	987	879	633	654	389	393	0	0	8.030
	3	550	859	1.450	1.255	990	881	634	657	394	397	0	0	8.068
	4	580	875	1.469	1.268	1.003	892	641	667	413	413	0	0	8.219
Goiaba	1	0	205	240	236	135	418	633	624	367	514	0	0	3.372
	2	0	205	240	236	135	418	633	624	367	514	0	0	3.372
	3	0	209	244	239	138	420	634	627	372	518	0	0	3.401
	4	0	225	259	250	150	430	641	638	392	537	28	21	3.569
Coco	1	543	855	871	755	564	515	633	654	389	564	99	119	6.560
	2	543	855	871	755	564	515	633	654	389	564	99	119	6.560
	3	550	859	874	758	567	518	634	657	394	568	108	129	6.616
	4	580	875	890	770	578	527	641	667	413	585	144	168	6.838
Tomate	1	0	0	0	0	0	1	297	769	760	330	0	0	2.156
	2	0	0	0	0	0	1	297	769	760	330	0	0	2.156
	3	0	0	0	0	0	3	298	772	765	334	0	0	2.171
	4	0	0	0	0	0	12	304	782	784	350	0	0	2.232
Cenoura	1	169	983	1.032	706	0	0	0	0	0	0	0	0	2.890
	2	169	983	1.032	706	0	0	0	0	0	0	0	0	2.890
	3	175	987	1.035	708	0	0	0	0	0	0	0	0	2.905
	4	209	1.008	1.056	722	0	0	0	0	0	0	0	0	2.995

Tabela A.8 – Atributos dos solos encontrados na unidade hidrológica do canal Coqueiros.

Aptidão do solo	Classe do solo	Profundidade até a areia (cm)	Textura até 60cm	Ph até 90cm	CE até 90cm	Sodicidade (PSI) até 60cm	CAD até 60cm (mm/m)	Velocidade de infiltração	Declividade do terreno (%)
1	Ce1	100	argilosa	5,9	0,3	2,1	167	lenta a mod. rápida	0
1	Ce3	100	média e argilosa	6,3	0,5	1,6	167	lenta a rápida	0
2	Ce4	100	argilosa e muito argilosa	5,4	0,2	2,8	167	lenta a mod. rápida	0
3	Ae1	100	muito argilosa	5,3	0,8	5,1	167	lenta a mod. rápida	0
3	Ad1	65	argilosa sobre arenosa	4,9	0,5	3,8	108	lenta a rápida	0
3	Ce5	100	argilosa e muito argilosa	5,9	1	6,8	167	lenta a mod. rápida	0
3	Ce6	75	argilosa e muito argilosa	6,3	0,7	6,8	125	lenta a mod. rápida	0
3	Ce7	75	argilosa	6,5	0,2	4,4	125	lenta a mod. rápida	0
3	Ce8	70	argilosa sobre arenosa	6	0,2	1,8	117	lenta a mod. rápida	0
3	GP1	100	muito argilosa	5	1,4	6,1	167	lenta a mod. rápida	0
3	GP2	75	muito argilosa sobre arenosa	5,3	2,3	7,3	125	lenta a mod. rápida	0
3	GP3	100	argilosa	4,6	1,9	3,4	167	lenta a mod. rápida	0
3	GP4	100	argilosa e muito argilosa	4,7	1,5	6,3	167	lenta a mod. rápida	0
3	GP6	100	muito argilosa	5	2	6,6	167	lenta a mod. rápida	0
3	GP8	100	argilosa e muito argilosa	4,7	1,2	4,1	167	lenta a mod. rápida	0
3	GP9	100	argilosa e muito argilosa	5	0,5	3,1	167	lenta a mod. rápida	0
4	Ae3	60	argilosa sobre arenosa	6,3	0,9	2,9	100	lenta a rápida	0
4	Ad2	45	arenosa	5,1	0,4	2	75	lenta a muito rápida	0
4	Aed1	70	argilosa sobre arenosa	5,3	0,2	3,6	117	lenta a rápida	0
5	Ce9	100	muito argilosa	6,3	2,1	19	167	lenta a mod. rápida	0
5	Ce10	100	muito argilosa	6,2	1,2	23	167	lenta a mod. rápida	0
5	AQ1	45	arenosa	5,2	0,4	2	75	extremamente rápida	0
6	GS1	100	argilosa e muito argilosa	5,7	7,7	7,4	167	lenta a mod. rápida	0
6	GS2	75	argilosa e muito argilosa	5,9	3,4	15	125	lenta a mod. rápida	0
6	GS3	100	muito argilosa	6,5	4	12	167	lenta a mod. rápida	0
6	GS4	60	argilosa sobre arenosa	6,7	29	15	100	lenta a mod. rápida	0
6	GS6	70	argilosa sobre arenosa	3,6	11	2,6	117	lenta a rápida	0

Fonte: SONDOTÉCNICA (1984b).

Tabela A.9 – Arrecadações, despesas fixas e balanço financeiro relacionadas a cada cultura proposta em seis anos de projeto.

Culturas	Balanço Econômico Anual (R\$/ha)												Receita Total
	Ano 1		Ano 2		Ano 3		Ano 4		Ano 5		Ano 6		
	Custo	Benefício	Custo	Benefício	Custo	Benefício	Custo	Benefício	Custo	Benefício	Custo	Benefício	
Cana-de-açúcar	4607	3080	1357	3360	2214	3640	2047	3920	1915	4200	1217	4480	9323
Abacaxi	11909	0	0	15075	7524	0	1908	15075	7524	0	1908	15075	14452
Maracujá	9348	10800	10207	12600	9348	10800	10207	12600	9348	10800	10207	12600	11535
Goiaba	4985	0	4224	5280	5278	10560	6254	18480	7099	26400	7099	26400	52181
Coco	3634	0	2767	0	4568	4860	6074	9720	6074	9720	6074	9720	4829
Tomate	5562	6500	5562	6500	5562	6500	5562	6500	5562	6500	5562	6500	5628
Cenoura	6978	8191	6978	8191	6978	8191	6978	8191	6978	8191	6978	8191	7278

Fontes: Adaptado de Projeto Moeda Verde Frutificar - 2004 e Agrianual - 2003.

Tabela A. 10– Critérios adotados nos cenários propostos.

Critérios	Cenários											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cultura	Mono	Mono	Mono	Poli	Poli	Poli	Mono	Mono	Mono	Poli	Poli	Poli
Distribuição	Quota	Quota	Quota	Quota	Quota	Quota	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima
Condutividade Hidráulica	com restrições	sem restrições	com intervenções	com restrições	sem restrições	com intervenções	com restrições	sem restrições	com intervenções	com restrições	sem restrições	com intervenções
Usuários Priorizados com o Acordo	Montante	Jusante	Todos	Montante	Jusante	Todos	Montante	Jusante	Todos	Montante	Jusante	Todos

Tabela A.11 - Renda líquida gerada por usuário no projeto em cada cenário pós-otimização.

Usuários	Quotas						Otimizada					
	Monocultura			Policultura			Monocultura			Policultura		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	9,54	8,44	7,85	9,54	12,76	16,80	9,54	9,54	9,54	9,54	9,54	9,54
2	20,73	18,28	16,98	23,23	50,97	37,05	20,73	20,73	20,73	23,30	23,35	24,72
3	5,42	4,70	4,37	6,81	7,95	4,89	5,42	2,96	1,61	5,42	15,59	13,33
4	19,21	14,59	15,74	19,21	27,54	39,31	19,21	16,54	19,21	19,21	18,64	22,91
5	8,66	7,51	6,98	8,66	12,70	7,82	8,66	4,73	2,58	10,04	24,91	21,30
6	0,11	0,23	0,21	0,81	0,34	0,45	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
7	10,84	21,17	21,39	78,91	35,68	44,28	15,34	24,00	26,10	59,13	27,04	31,13
8	1,17	1,73	2,30	1,31	1,89	2,58	0,00	1,09	0,85	0,00	5,74	7,02
9	5,00	8,30	9,86	5,60	12,83	11,69	7,07	9,41	12,03	27,26	10,60	14,35
10	3,92	7,77	7,72	4,39	8,62	9,18	0,00	4,89	2,85	0,00	25,76	23,57
11	2,13	4,52	4,20	4,42	6,98	9,16	3,01	5,12	5,12	11,61	5,77	6,11
12	2,38	5,06	4,70	2,67	5,66	5,27	0,00	3,19	1,74	0,00	16,78	14,34

Tabela A.12 – Área produtiva por usuário no projeto em cada cenário pós-otimização.

Usuários	Quotas						Otimizada					
	Monocultura			Policultura			Monocultura			Policultura		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1074	951	883	1074	1074	1074	1074	1074	1074	1074	1074	1074
2	2334	2058	1913	2334	2334	2334	2334	2334	2334	2334	2334	2334
3	611	531	493	611	611	531	611	334	182	611	611	497
4	2163	1643	1773	2163	1863	2163	2163	1863	2163	2163	1863	2163
5	977	848	788	977	977	848	977	534	291	977	977	794
6	12	25	24	23	29	29	29	29	29	29	29	29
7	1221	2384	2409	2478	2704	2903	1728	2704	2940	2589	2704	2940
8	132	195	260	142	225	280	0	123	96	0	225	262
9	563	935	1110	606	1060	1317	797	1060	1355	1193	1060	1355
10	442	876	872	476	1010	805	0	552	322	0	1010	879
11	240	509	473	289	577	577	339	577	577	508	577	577
12	269	571	531	290	658	571	0	360	196	0	658	535

Tabela A.13 – Restrições de disponibilidade de água e áreas máximas de cada propriedade em cada cenário.

Usuário	Cenários ¹³											
	1 e 7		2 e 8		3 e 9		4 e 10		5 e 11		6 e 12	
	Vazão (m³/s)	Área (ha)	Vazão (m³/s)	Área (ha)	Vazão (m³/s)	Área (ha)	Vazão (m³/s)	Área (ha)	Vazão (m³/s)	Área (ha)	Vazão (m³/s)	Área (ha)
1	1,03	1074	0,65	1074	0,61	1074	1,03	1074	0,65	1074	0,61	1074
2	2,24	2334	1,42	2334	1,32	2334	2,24	2334	1,42	2334	1,32	2334
3	0,59	611	0,37	611	0,35	611	0,59	611	0,37	611	0,35	611
4	1,63	2163	1,14	1863	1,23	2163	1,63	2163	1,14	1863	1,23	2163
5	0,74	977	0,60	977	0,55	977	0,74	977	0,60	977	0,55	977
6	0,01	29	0,02	29	0,02	29	0,01	29	0,02	29	0,02	29
7	0,75	2940	1,65	2704	1,67	2940	0,75	2940	1,65	2704	1,67	2940
8	0,08	322	0,14	225	0,18	322	0,08	322	0,14	225	0,18	322
9	0,35	1355	0,65	1060	0,77	1355	0,35	1355	0,65	1060	0,77	1355
10	0,28	1081	0,62	1010	0,61	1081	0,28	1081	0,62	1010	0,61	1081
11	0,15	577	0,35	577	0,33	577	0,15	577	0,35	577	0,33	577
12	0,17	658	0,40	658	0,37	658	0,17	658	0,40	658	0,37	658
Total	8,00	14122	8,00	13123	8,00	14122	8,00	14122	8,00	13123	8,00	14122

Figuras

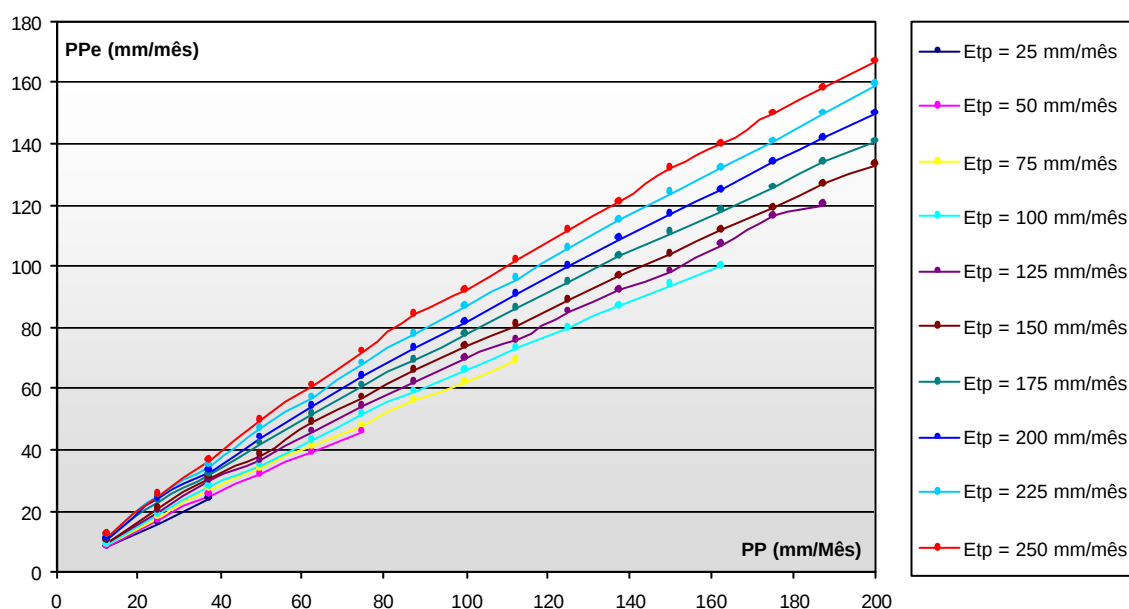


Figura A.1 – Representação da relação entre *PPe* e *PP* mensais para diferentes valores de *Etp* (USDA-SCS).

¹³ As vazões referem-se apenas aos cenários de 1 à 6, que são os que ocorrem a distribuição por quota. Os cenários de 7 à 12 não têm restrições quanto à vazão.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)