

UFRRJ
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO

TESE

**Modelagem Matemática Aplicada no
Planejamento da Agricultura Irrigada,
Utilizando Informações Georreferenciadas**

Wilson Araújo da Silva

2007



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

**MODELAGEM MATEMÁTICA APLICADA NO PLANEJAMENTO
DA AGRICULTURA IRRIGADA, UTILIZANDO INFORMAÇÕES
GEORREFERENCIADAS**

WILSON ARAÚJO DA SILVA

Sob a Orientação do Professor

Daniel Fonseca de Carvalho

e Co-orientação dos Professores

Marcos Bacis Ceddia

e

Angel Ramon Sanchez Delgado

Tese submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de **Doutor em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Ciência do Solo.

Seropédica, RJ
Fevereiro de 2007

631.587

S586m

T

Silva, Wilson Araújo da, 1974-

Modelagem matemática aplicada no planejamento da agricultura irrigada, utilizando informações georreferenciadas. - 2007.

xi, 98 f. : il.

Orientador: Daniel Fonseca de Carvalho.

Tese (doutorado)- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Agronomia.

Inclui bibliografia.

1. Irrigação agrícola - Teses. 2. Irrigação agrícola - Modelos matemáticos - Teses. 3. Irrigação agrícola - Planejamento - Teses. 4. Sistemas de informação geográfica - Teses. I. Carvalho, Daniel Fonseca de, 1968- II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Instituto de Agronomia. III. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO**

WILSON ARAÚJO DA SILVA

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Agronomia área de concentração em Ciência do Solo.

TESE APROVADA EM 28/02/2007

Daniel Fonseca de Carvalho. Dr. UFRRJ.
(Orientador)

Teodorico Alves Sobrinho. Dr. UFMS.

Luiz Fernando Coutinho de Oliveira. Dr. UFG.

Leonardo Duarte Batista da Silva. Dr. UFRRJ.

Carlos Alberto Alves Varella. Dr. UFRRJ.

DEDICATÓRIA

Aos meus familiares, principalmente à minha mãe Fátima, meu irmão Willian e à minha tia Jesus e de uma forma especial à minha esposa Cristiane, pelo companheirismo, cumplicidade e dedicação e ao meu filho Matheus, com quem aprendi muito durante esses quatro anos de vida.

dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar, pela a saúde, proteção e pelas oportunidades concedidas durante minha vida acadêmica;

Aos meus familiares, que sempre me incentivaram na busca do conhecimento e acreditaram na minha capacidade;

A CAPES pela oportunidade e concessão da bolsa de estudos;

Ao Curso de Pós-graduação em Agronomia – Ciência do Solo, principalmente à professora Lúcia Helena Cunha dos Anjos, pela contribuição essencial para a realização deste e também por disponibilizar a base de dados utilizada no estudo;

Ao professor e orientador Daniel Fonseca de Carvalho, pelos conselhos, ensinamentos e orientação segura, durante essa fase tão importante da minha vida;

Ao grande amigo e co-orientador Marcos Bacis Ceddia, pela valorosa contribuição na realização desse trabalho;

Aos amigos do grupo de pesquisa Água e Solo em Sistemas Agrícolas, Claudinei Montebeller, Eleandro, Elenilson, Wanderlei e de uma forma especial aos colegas Rodrigo e Vinícius do DEMAT/UFRRJ, pelo apoio e dedicação, imprescindíveis para a realização deste;

Ao Curso de Pós-graduação em Agronomia – Ciência do Solo, principalmente à Maria Luciene e ao Roberto, pela eficiência e atenção dispensada.

À inesquecível UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO, por proporcionar os melhores momentos de toda a minha vida estudantil, pela excelente formação e pela experiência humana e profissional aqui adquiridas;

A todos aqueles que de uma maneira ou de outra contribuíram para que esse trabalho fosse realizado com êxito.

BIOGRAFIA

Wilson Araújo da Silva, filho de João Marcelino da Silva e Maria de Fátima Araújo, nasceu na cidade de Imperatriz no Estado do Maranhão no dia 22 de março de 1974. cursou o segundo grau no Centro Federal de Educação Tecnológica - CEFET, em Imperatriz-MA recebendo o título de Técnico em Edificações no ano de 1994. Em março de 1996 ingressou no curso de Agronomia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ, concluindo-o em abril de 2001. Durante a graduação foi monitor da disciplina de construções rurais no período de 1998 a 2000. Em agosto de 2001, ingressou no curso de Pós-graduação da UFRRJ em nível de Mestrado no curso de Fitotecnia, área de concentração em produção vegetal, defendendo a Dissertação intitulada “Planejamento de Áreas Irrigadas em Assentamentos Rurais Utilizando o Sistema de Informações Geográficas”, concluindo-o em fevereiro de 2003. Em março de 2003, ingressou no curso de Pós-graduação da UFRRJ em nível de Doutorado no curso de Agronomia, área de concentração em Ciência do Solo, submetendo-se à defesa em 28 de fevereiro de 2007. Foi bolsista do CNPq em nível de Mestrado no período de 2001 a 2003 e da CAPES em nível de Doutorado no período de 2003 a 2007. Foi professor substituto das disciplinas de Hidrologia e, Irrigação e Drenagem do Instituto de Tecnologia do Departamento de Engenharia da UFRRJ, no período de junho a novembro de 2006.

RESUMO GERAL

SILVA, Wilson Araújo da. **Modelagem matemática aplicada no planejamento da agricultura irrigada, utilizando informações georreferenciadas.** 2007. 98f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do solo). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2007.

A potencialidade do pólo de fruticultura irrigada no Norte Fluminense do Estado do Rio de Janeiro é enorme. Tal fato associado à retomada do crescimento da cultura da cana-de-açúcar, principalmente nos últimos anos, devido ao aumento das demandas energéticas mundiais e diminuição das fontes de combustíveis não renováveis, e também influenciada pelos preços do açúcar no mercado internacional, fizeram dessa região um local estratégico para o desenvolvimento e expansão da agricultura irrigada. Entretanto, por se tratar de uma atividade que demanda um volume considerável de água, deve ser planejada à luz da gestão ambiental, como forma de garantir o uso sustentável dos recursos naturais, principalmente a água e o solo. Portanto, a viabilidade de projetos hidroagrícolas dependerá de uma utilização adequada dos seus recursos naturais. Baseado nessas premissas, e considerando o novo modelo de gerenciamento dos recursos hídricos do País, o presente estudo teve como objetivo planejar a agricultura irrigada, em uma área que é parte da bacia do rio Muriaé, contida no PROJIR (Projeto de irrigação e drenagem da cana-de-açúcar na região norte fluminense), projeto executado em 1982 pelo Instituto do Açúcar e do Alcool, através do PLANALSUCAR. As ferramentas utilizadas para se atingir o objetivo proposto, foram: a regionalização de vazão visando caracterizar o potencial hídrico superficial da região, a modelagem matemática, através do desenvolvimento de um modelo construído com base em funções de resposta das culturas à água, obtidas na região para as culturas da cana-de-açúcar, abacaxi, maracujá e mamão; e um algoritmo de sistema de informações geográficas desenvolvido utilizando informações georreferenciadas referentes aos dados edafo-climáticos e as funções de produção das culturas. Os resultados obtidos utilizando a metodologia proposta mostraram que na área estudada, considerando os critérios de outorga do uso da água adotados pela ANA, existia uma vazão outorgável de cerca de $15,83 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. O modelo matemático desenvolvido foi capaz de selecionar os melhores planos de cultivo que possibilitaram obter a renda máxima das culturas. O algoritmo criado se mostrou eficiente na espacialização da renda maximizada dos cultivos irrigados de cada uma das culturas estudadas.

Palavras-chave: Funções de produção. Agricultura irrigada. SIG.

GENERAL ABSTRACT

SILVA, Wilson Araújo da. **Mathematical modeling applied to the planning of the irrigated agriculture, using georeferenced information**. 2007. 98p. Thesis (Doctor in Agronomy, Soil Science) Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2007.

The potential of the irrigated fruit production the North Fluminense region of Rio de Janeiro is large. This fact associated to the retaking of the growth of the sugarcane crop, mainly in the last years, due to the increase of world energy demands, and decrease of non renewable sources of fuels, influenced also by the prices of the sugar in the international market, made this area a strategic place for development and expansion of irrigated agriculture. However, the viability of irrigated agriculture projects will depend on an appropriate use of the natural resources, mainly water and soil. Based on those facts, and considering the new model of management of natural resources in Brazil, the present study had as objective the planning of the irrigated agriculture in an area that is part of the Muriaé river basin, inserted in the PROJIR (irrigation and drainage project of sugarcane of the North Fluminense region), project executed in 1982 by the Institute of Sugar and Alcohol, through PLANALSUCAR. The tools used to reach the proposed objective were: the stream flow regionalization, to characterize the hydric potential of the region; the mathematical modeling, developed utilizing response functions of the crops to the amount of water applied, for sugarcane, pineapple, passion fruit and papaya crops; and a geographic information system algorithm developed using georeferenced data related to edaphic and climatic conditions, and the crop production functions. The results obtained using the proposed methodology showed that in the studied area, considering the criteria of concession of water usage adopted by ANA (Water National Association), there was a water right concession available to be used of about $15.83 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. The mathematical modeling developed was capable of indicating the best cultivation plans to maximize the net income of the crops. The mathematical algorithm developed was efficient in the spacialization of the maximized net income of irrigated plots of each crop studied.

Key words: Production functions. Irrigated agriculture. GIS.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	1
CAPITULO I – CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO MURIAÉ VISANDO A ESTIMATIVA DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA SUPERFICIAL	3
RESUMO	4
ABSTRACT	5
1. INTRODUÇÃO	6
2. REVISÃO DE LITERATURA	8
2.1 A Bacia do Rio Muriaé	8
2.2 Gestão dos Recursos Hídricos no Brasil	9
2.2.1 Lei 9.433	9
2.2.2 Cobrança pelo uso da água	10
2.2.3 Outorga do uso da água	11
2.3 Regionalização de Vazão	12
2.3.1 Método tradicional	12
2.3.2 Métodos alternativos	13
2.4 Precipitação Média Anual	13
2.5 Coeficiente de Deságüe	14
3. MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1 Localização e Características da Área de Estudo	15
3.2 Dados da Bacia do Rio Muriaé Utilizados no Estudo.	15
3.3 Precipitação Média Anual	18
3.4 Cálculo da Vazão Mínima de Sete Dias Consecutivos e Período de Retorno de 10 Anos ($Q_{7,10}$)	18
3.5 Cálculo das Vazões Mínimas Associadas à Duração de 90 e 95% no Tempo ($Q_{90\%}$ e $Q_{95\%}$)	19
3.6 Coeficiente de Deságüe Médio Anual	20
3.7 Regionalização da Vazão pelo Método da Razão de Área de Drenagem.	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
4.1 Precipitação Média ao Longo da Bacia	22
4.2 Coeficiente de Deságüe Médio Anual	23
4.3 Regionalização da Vazão pelo Método da Razão de Área de Drenagem	24

5. CONCLUSÕES	26
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27
CAPITULO II – MODELO DE MAXIMIZAÇÃO DA RENDA PARA A AGRICULTURA IRRIGADA NO NORTE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO.	30
RESUMO	31
ABSTRACT	32
1. INTRODUÇÃO	33
2. REVISÃO DE LITERATURA	35
2.1 A Importância da Água e dos Nutrientes na Produção Vegetal	35
2.2 Função de Produção	35
2.2.1 Modelagem das funções de produção	37
2.2.2 Funções de produção água-cultura	38
2.2.3 Análise econômica usando funções de produção água-cultura	39
2.3 Fundamentos de Programação Matemática	41
2.3.1 Programação linear na agricultura irrigada	41
2.3.2 Programação linear separável	42
2.3.3 Programação não linear e o método Lagrangiano Aumentado	44
3. MATERIAL E MÉTODOS	46
3.1 Localização e Características da Área de Estudo	46
3.2 Instrumento Analítico	46
3.3 Formulação do Modelo Matemático Utilizando Funções de Produção das Culturas à Água.	47
3.3.1 Parâmetros utilizados na formulação do modelo matemático	48
3.3.2 Função de resposta das culturas à água	49
3.3.3 Requerimento mensal de água	49
3.4 Solução Matemática do Problema	53
3.4.1 Solução utilizando programação linear separável	53
3.4.2 Solução utilizando Lagrangiano Aumentado	53
3.5 Tratamento Computacional do Problema	54
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1. Maximização da Renda por Cultura	55
4.2. Maximização da Renda Utilizando Programação Linear Separável	55
4.3. Maximização da Renda Utilizando Lagrangiano Aumentado	57
5. CONCLUSÕES	58
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

CAPITULO III – ALGORITMO PARA O MAPEAMENTO DA RENDA UTILIZANDO O PRINCÍPIO DO SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS, APLICADO NO PLANEJAMENTO DA AGRICULTURA IRRIGADA.	63
RESUMO	64
ABSTRACT	65
1. INTRODUÇÃO	66
2. REVISÃO DE LITERATURA	68
2.1. A importância da Agricultura Irrigada	68
2.2. Sistema de Informação Geográfica	68
2.2.1 Histórico e conceito	68
2.2.2 Aplicação do SIG na agricultura	69
2.3 Modelos para Representação do Mundo Real	71
3. MATERIAL E MÉTODOS	73
3.1 Localização e Características da Área de Estudo	73
3.2 Parâmetros Utilizados na Maximização da Renda das Culturas	73
3.2.1 Custos do processo produtivo e preço de venda dos produtos	73
3.2.2 Custo de adubação e calagem das culturas	74
3.2.3 Funções de resposta das culturas a água.	74
3.3 Obtenção dos Planos de Informações	75
3.4 Desenvolvimento do Algoritmo Utilizando os Princípios do SIG.	77
3.4.1 Geração da imagem raster georreferenciada.	78
a) Definição da resolução espacial da imagem raster.	78
b) Definição das dimensões do arquivo matricial	78
c) Georreferenciamento da imagem raster.	78
3.4.2 Renda líquida maximizada	78
3.4.3 Apresentação das classes de renda pelo algoritmo	79
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
5. CONCLUSÕES	90
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
CONCLUSÕES GERAIS	93
CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
ANEXO	95

INTRODUÇÃO GERAL

A utilização adequada dos recursos naturais tem sido uma preocupação constante de técnicos e cientistas das mais diferentes áreas do conhecimento, principalmente, de forma mais intensa nas últimas décadas, quando o homem percebeu que estava destruindo a capacidade de suporte dos ecossistemas.

O regulamento do uso dos recursos hídricos, por determinadas atividades econômicas, reflete a constatação de que o uso do solo, entre outros fatores, traz conseqüências imediatas para estes recursos e para o meio ambiente de maneira geral, tanto qualitativa, como quantitativamente. Por isso, o controle do uso do solo deve ser planejado à luz da gestão econômica e ecológica, pois estas permeiam a gestão dos recursos hídricos.

A realidade brasileira, infelizmente, mostra um quadro adverso com relação à ocupação do solo e com conseqüências diretas sobre os corpos hídricos. As águas superficiais são o espelho do que é feito com os outros recursos naturais e, no Brasil, refletem o descaso com que os mesmos são tratados. As águas subterrâneas, em alguns pontos do País, também já vêm sinalizando a desorganização territorial e a falta de planejamento da ocupação do solo.

O acelerado crescimento demográfico do país, associado à opção por um modelo econômico que privilegia a concentração populacional em núcleos urbanos e desvaloriza a vida rural e seus aspectos culturais e de tradição tem, como conseqüência, a pouca importância que é dada, por parte da população, à disponibilidade dos recursos naturais, fazendo com que essa população detenha um conhecimento apenas parcial, ou até mesmo o desconhecimento sobre a riqueza do país. A palavra riqueza aqui é entendida como a abundância de recursos e não conforme o conceito econômico que denota valor de mercado. Assim, não existe o conhecimento sobre como utilizar esses recursos de forma sustentável, conhecimento este que, de outra forma, poderia estar sendo perpetuado com base na tradição e na valorização da cultura da terra e do contato com a natureza.

Especificamente com relação aos recursos hídricos, os mesmos são uma necessidade crescente nas regiões onde predomina a grande metrópole que, além do próprio consumo, induz a outros de grande vulto, direcionados aos grandes empreendimentos agrícolas e usinas geradoras de energia hidrelétrica. A água indisponível em quantidades adequadas torna cada vez mais caótica a situação de regiões que sofrem com a disputa e a restrição de seu uso.

A água útil às plantas é reconhecida como recurso vulnerável, finito e escasso em qualidade e quantidade. Como é exatamente isso que faz a distinção entre bem dotado de valor econômico e riqueza no sentido mais amplo da palavra, a água, nessas condições, deixou de ser uma riqueza para ser considerada um bem econômico. O uso da água na agricultura tem sido considerado como o mais alto dentre todos os outros usos (Seckler, 1998). A literatura recente mostra a importância da aplicação do conceito de “economia de água”, não apenas para o uso doméstico e industrial, mais principalmente para fins agrícolas (Droogers et al., 2000). O mesmo autor relata que ultimamente, também, tem sido dada importância à economia de água na agricultura irrigada.

As regiões Norte e Noroeste Fluminense são compostas por nove e por treze municípios que ocupam as áreas de 9.767,8 km² e 5.385,4 km², respectivamente, que correspondem a 22,3 e 12,3 % da área total do Estado do Rio de Janeiro (CIDE, 2001). A cultura da cana-de-açúcar e a pecuária constituem as principais atividades de importância econômica do setor agrícola desta região. Entretanto, deve-se ressaltar o crescimento da fruticultura, nos últimos anos, sobretudo na região norte do Estado.

Considerando a competição internacional na oferta de alimentos devido à economia globalizada, precisamos, cada vez mais, aumentar nossa produtividade agrícola e reduzir os

custos de produção, a fim de se ter condições de competir no mercado nacional e internacional. Deste modo, é de suma importância que se forneça aos produtores rurais, ferramentas que possibilitem as tomadas de decisões técnico-econômicas.

Dentre as ferramentas que podem ser utilizadas para se atingir esses objetivos, destacam-se a programação matemática com base nas funções de produção água-cultura, e o uso de sistemas de informação geográfica (SIG), que permitem a partir da sobreposição de informações edafoclimáticas de uma determinada região, gerar novos dados que permitirão um planejamento adequado, otimizando o uso dos recursos naturais e insumos.

Tendo em vista a importância do planejamento agro-econômico de uma região, o presente trabalho teve como objetivo geral obter informações que contribuam para o planejamento da agricultura irrigada, utilizando técnicas de programação matemática, com base em funções de resposta à água das culturas da cana-de-açúcar, do maracujazeiro, do abacaxizeiro e do mamoeiro, em uma área abrangida pelo PROJIR (Projeto de Irrigação e Drenagem da Cana-de-açúcar na Região Norte-fluminense), realizado em 1982 pelo Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), dentro do plano nacional de melhoramento da cana-de-açúcar (PLANALSUCAR).

Para a realização desse estudo, utilizou-se a carta 67B, que faz parte do levantamento pedológico detalhado, referente ao banco de dados do PROJIR, que é composto de diversos relatórios e mapas pedológicos, de aptidão agrícola das terras e levantamentos planialtimétricos, dentre outros, de uma área de aproximadamente 230 mil hectares, cujo acervo é de propriedade da UFRRJ, campus Leonel Miranda.

O trabalho foi desenvolvido em três capítulos, o primeiro visou estimar a disponibilidade hídrica superficial da área estudada, o segundo objetivou desenvolver um modelo matemático que permitisse obter a renda máxima de cultivos irrigados e o terceiro capítulo teve como meta o desenvolvimento de um algoritmo para a espacialização da renda máxima das culturas estudadas.

Além disso, pretendeu-se testar a hipótese de que as informações obtidas a partir de funções de produção de culturas à água acopladas ao sistema de informação geográfica, possam ser utilizadas com eficácia no planejamento da agricultura irrigada.

Os objetivos específicos do estudo foram:

a) Estimar a disponibilidade hídrica superficial da área estudada, visando o planejamento da agricultura irrigada.

b) Desenvolver um modelo matemático baseado em funções de resposta à lâmina de água das culturas da cana-de-açúcar, do abacaxizeiro, do maracujazeiro e do mamoeiro, que permita maximizar a renda de cultivos irrigados.

c) Espacializar a renda líquida de cultivos irrigados, utilizando um algoritmo de sistema de informação geográfica (SIG), desenvolvido com base em funções de produção das culturas a água.

CAPITULO I

CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO MURIAÉ VISANDO A ESTIMATIVA DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA SUPERFICIAL

RESUMO

A estimativa da disponibilidade hídrica de uma região é uma das informações mais importantes para o gerenciamento dos recursos hídricos. A oferta de água superficial é, normalmente, estimada através de vazões mínimas de referência, que representam as menores vazões das séries históricas. Com o crescimento da agricultura irrigada na região norte do Estado do Rio de Janeiro e com a necessidade, cada dia mais acentuada, de se gerenciar de forma sustentável o uso da água, torna-se essencial uma adequada caracterização da disponibilidade hídrica dessa região. Essa iniciativa deve levar em consideração o novo modelo de gerenciamento de recursos hídricos implementados no Estado, principalmente por meio do CEIVAP – Comitê Executivo para Integração da Bacia do Rio Paraíba do Sul, e de leis Federais e Estaduais, permitindo-se conhecer o potencial hídrico da região norte fluminense e dando subsídios para um adequado gerenciamento dos seus recursos naturais e implantação de projetos hidroagrícolas. Com base nesses fatos, o presente estudo foi elaborado com o objetivo de estimar a disponibilidade hídrica superficial em uma região localizada na bacia do rio Muriaé, utilizando a técnica de regionalização de vazão. A área em estudo é abrangida pelo Projeto de Irrigação e Drenagem da Cana-de-açúcar na Região Norte-Fluminense (PROJIR), desenvolvido pelo extinto Instituto do Açúcar e do Alcool IAA/PLANALÇUCAR, parte do acervo bibliográfico da UFRRJ. A partir da análise dos resultados encontrados, foi possível verificar que a região estudada possui um grande potencial hídrico, tendo o rio Muriaé um papel importante na sua disponibilidade hídrica. Na seção de interesse desse estudo, próximo à sua seção de deságüe no rio Paraíba do Sul, foram encontrados valores para $Q_{7,10}$ anual, $Q_{7,10}$ do primeiro trimestre, $Q_{7,10}$ do segundo trimestre, $Q_{7,10}$ do terceiro trimestre e $Q_{7,10}$ do quarto trimestre de $13,74 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, $37,64 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, $28,35 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, $15,43 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e $15,33 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente. Além disso, foram estimadas as vazões mínimas anuais associadas às permanências de 90 % ($Q_{90\%}$) e 95% ($Q_{95\%}$), cujos valores foram de $27,46 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e $22,62 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente. Com base nos critérios adotados pela Agência Nacional de Águas (ANA), a vazão máxima de captação possível de ser utilizada ao longo do ano na área estudada é de aproximadamente $15,83 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

ABSTRACT

The estimate of the readiness water of an area is most important information for the administration of the water resources. The offer of superficial water is, usually, obtained through minimum flows of reference, which represent the smallest flows of the historical series. With the growth of the agriculture irrigated in the North Fluminense region of Rio de Janeiro and with the need, every day more accentuated, of managing in a maintainable way the use of the water, is essential an appropriate characterization of the readiness water of that area. That initiative should take into account the new model of administration of water resources implemented in the State, mainly through CEIVAP - Executive Committee for Integration of the Basin of Paraíba do Sul River, and the Federal and State laws, allowing to know the potential water for the North Fluminense region, giving subsidies for an appropriate administration of their natural resources and implantation of irrigation projects. With base in those facts, the present study was elaborated with the objective of estimating the available superficial water in a located area in the basin of the Muriaé River, using the technique of flow regionalization. The area studied is included in the Project of Irrigation and Drainage of the Sugarcane the North Fluminense region (PROJIR), developed by the extinct Institute of the Sugar and the Alcohol (IAA/PLANALÇUCAR). The results obtained using the proposed methodology showed that the studied area possesses a great hydric potential, and the Muriaé River represents an important paper in availability of water. In the section of interest of the study, they were found values for annual $Q_{7,10}$, $Q_{7,10}$ of the first quarter, $Q_{7,10}$ of the second quarter, $Q_{7,10}$ of the third quarter and $Q_{7,10}$ of the fourth quarter of $13.74 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $37.64 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $28.35 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $15.43 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ and $15.33 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, respectively. The values obtained to the annual minimum flows associated to the permanence of 90% ($Q_{90\%}$) and 95% ($Q_{95\%}$), were of $27.46 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ and $22.62 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, respectively. Considering the criteria of concession of water usage adopted by ANA (Water National Association), in the studied area there was a water right concession available to be used of about $15.83 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

1 INTRODUÇÃO

No final dos anos 90 havia mais de um bilhão de pessoas sem suficiente disponibilidade de água para consumo doméstico e as estimativas apontavam que, em 30 anos, 5,5 bilhões de pessoas estariam vivendo em áreas com moderada ou séria falta de água (Demanboro et al., 1999).

Analisando a distribuição dos volumes armazenados nos principais reservatórios da Terra, verifica-se que 97,5% do volume total de água da terra são de água salgada, formando os oceanos, e somente 2,5% são de água doce, sendo que 68,7 % desta está armazenada nas calotas polares e geleira. A forma onde a água está mais acessível ao uso humano e de ecossistemas é a água doce contida em lagos e rios, o que corresponde a apenas 0,27% do volume de água doce da Terra e cerca de 0,007 do volume total de água (Lima, 2000).

Embora o Brasil detenha 11% da água doce superficial do planeta, ela é mal distribuída. Na região Norte, onde vivem apenas 7% dos brasileiros, encontra-se 68% do volume de água disponível, enquanto na região Sudeste, onde vivem 43% dos brasileiros existe apenas 6% de água (CPT, 2006). Enquanto a disponibilidade hídrica per capita para o estado de Roraima é de 18 milhões de litros de água por ano, em Pernambuco este valor é de pouco mais de 1.000 litros. Atualmente, no Nordeste e no Sudeste do Brasil, algumas localidades já enfrentam racionamentos regulares. Este quadro se agrava quando se constata que a maior parte dos rios desta região já tem a qualidade da água comprometida pela poluição e por desequilíbrios ambientais resultantes do desmatamento e do uso indevido do solo.

A utilização adequada dos recursos naturais tem sido uma preocupação constante de técnicos e cientistas das mais diferentes áreas do conhecimento, principalmente, de forma mais intensa nas últimas décadas, quando o homem percebeu que estava destruindo a capacidade de suporte dos ecossistemas (Silva, 2003).

O regulamento do uso da água por determinadas atividades econômicas, reflete a constatação de que o uso inadequado do solo, entre outros fatores, traz conseqüências imediatas para estes recursos e para o meio ambiente de maneira geral, tanto qualitativa, como quantitativamente. Por isso, o controle do uso do solo deve ser planejado à luz da gestão econômica e ecológica, pois estas permeiam a gestão dos recursos hídricos.

A realidade brasileira, infelizmente, mostra um quadro adverso com relação à ocupação do solo e com conseqüências diretas sobre os corpos hídricos. As águas superficiais são o espelho do que é feito com os outros recursos naturais e, no Brasil, refletem o descaso com que os mesmos são tratados (Silva, 2003). As águas subterrâneas, em algumas regiões do País, também já vêm sinalizando para uma desorganização territorial e para a falta de planejamento da ocupação do solo.

No estado do Rio de Janeiro a agricultura irrigada tem recebido incentivos do governo estadual, como forma de desenvolver essa atividade agrícola, principalmente nas regiões norte e noroeste, onde se destacam as culturas da cana-de-açúcar, do maracujazeiro, do abacaxizeiro e do mamoeiro, além de outras fruteiras. Como a agricultura irrigada é uma atividade que consome um grande volume de água, torna-se necessária a utilização de ferramentas que possibilitem a caracterização e o estudo da disponibilidade hídrica dessa região. Essas ferramentas contribuiriam para garantir sua utilização de forma sustentável, fornecendo subsídios para um planejamento adequado de seus usos múltiplos, principalmente nas atividades que demandam um grande volume de água, como é o caso da agricultura irrigada.

A fruticultura irrigada no norte Fluminense tem se destacado, pelo fato desta região apresentar enormes vantagens comparativamente a outras, como condições edafoclimáticas

propícias, mão-de-obra abundante, uma infra-estrutura estadual para exportação, além de contar com um grande mercado consumidor interno (região metropolitana do Rio de Janeiro). Entretanto, a sustentabilidade de qualquer sistema de produção depende de um adequado manejo do uso da água, sendo necessário, para isso, estudos que caracterizem a disponibilidade hídrica da região, e que leve em consideração o atual modelo de gestão de recursos hídricos implementado no estado do Rio de Janeiro, no qual os comitês de bacia hidrográfica, entre eles o Comitê para Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (CEIVAP), desempenham um papel de extrema importância.

Tendo em vista a importância do uso racional da água de uma região e levando-se em consideração o novo paradigma de gestão dos recursos hídricos no Brasil, o presente trabalho teve como objetivo principal estimar, por meio da técnica de regionalização de vazão, a disponibilidade hídrica superficial de uma área drenada pelo rio Muriaé, abrangida pelo PROJIR.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A Bacia do Rio Muriaé

O rio Muriaé é afluente da margem esquerda do Rio Paraíba do Sul e nasce da confluência dos ribeirões Samambaia e Bonsucesso, nas proximidades da cidade de Mirai, no estado de Minas Gerais. De sua nascente até a foz, o rio Muriaé apresenta uma extensão de aproximadamente 300 km e drena uma área de 8230 km². Seus principais afluentes são os rios Glória, no território mineiro, e o Carangola, no estado do Rio de Janeiro. No trecho mineiro, a bacia do rio Muriaé drena diversos núcleos urbanos destacando-se Mirai, Muriaé e Carangola. No território fluminense, a cidade de maior porte às margens do Rio Muriaé é Itaperuna. Seu afluente, o rio Carangola, atravessa, no trecho fluminense, centros urbanos de médio porte como Natividade e Porciúncula (CIRABM, 2003).

O trecho do alto curso do rio Muriaé, que vai até a foz do rio Glória, junto à cidade de Muriaé, apresenta algumas quedas e corredeiras e se desenvolve em uma região de relevo ondulado, com grandes áreas de várzeas. O médio curso estende-se desde a foz do rio Glória até a localidade de Italva, em regiões de relevo colinoso, com extensas áreas de várzeas margeando o rio e seus afluentes, e apresentando diversas corredeiras em seu leito rochoso. O baixo curso estende-se desde a cidade de Italva até sua foz no rio Paraíba do Sul, em região de topografia plana onde se destaca a cultura da cana-de-açúcar e a fruticultura. Suas declividades médias são da ordem de 2,6 m km⁻¹ no alto curso, 1,1 m km⁻¹ no médio e 0,3 m km⁻¹ no inferior (CIRABM, 2003).

A bacia do rio Muriaé possui características eminentemente agrícolas. A região noroeste fluminense tem na pecuária bovina leiteira sua atividade econômica mais importante, destacando-se também a pecuária de corte. A região da baixada campista tem na lavoura canavieira e na fruticultura suas mais relevantes atividades econômicas, fazendo parte da bacia duas usinas de cana-de-açúcar. Tal fato pode ser comprovado pelo fato de 95 % da água consumida na bacia ser destinada ao setor agropecuário (ANA, 2006).

No território mineiro, os municípios localizados na bacia do rio Muriaé se caracterizam pela cultura do arroz e do café. A pecuária bovina leiteira é uma atividade em expansão voltada para o mercado consumidor da cidade do Rio de Janeiro, além de atender também, ao norte fluminense. O setor elétrico também encontra neste trecho sua maior expressão, com 4 pequenas usinas já instaladas na região e mais uma já licenciada para instalação.

As condições ambientais da bacia do rio Muriaé foram marcadas pela forma de ocupação do solo, que remonta à época de sua colonização até os dias atuais. A substituição quase que total da floresta primitiva pela lavoura do café e posteriormente pela pecuária, o plantio da cana-de-açúcar com suas queimadas periódicas e a derrubada da mata de forma indiscriminada, são alguns exemplos das causas do empobrecimento do solo, do seu alto grau de erosão e da desproteção a que ficaram sujeitos os cursos de água (CIRABM, 2003). Segundo a mesma fonte, a ausência do tratamento prévio de esgotos domésticos, além dos efluentes provenientes das atividades agrícolas e industriais, lançados *in natura* nos cursos de água, contribuem para o agravamento das condições de qualidade da água na bacia.

O histórico de vazões do rio Muriaé revela que, em intervalos de tempo da ordem de 10 anos, ocorrem cheias capazes de provocar inundações nos centros urbanos situados ao longo do rio e de seus afluentes, principalmente no estado do Rio de Janeiro.

Segundo Carneiro (2004) a baixada campista apresenta um histórico que revela conflitos em torno do uso da água, principalmente após a introdução da irrigação na década de

70 para garantir água à indústria canavieira. Segundo o mesmo autor, dois tipos de conflitos pelo uso da água nessa região podem ser destacados: conflitos internos ao segmento agroindustrial, envolvendo especificamente, usinas e produtores rurais e produtores rurais entre si; e conflitos entre os segmentos dos pescadores e produtores rurais.

2.2 Gestão dos Recursos Hídricos no Brasil

A gestão dos recursos hídricos no Brasil pode ser dividido em duas fases: a primeira teve início em 1934, ano em que foi promulgado o Código de Águas, e estende-se até 1988, quando da promulgação da nova Constituição Federal. Nesta fase prevaleceu um modelo de gestão de recursos hídricos setorial, centralizado e insuficiente. A segunda fase inicia-se após a promulgação da nova Constituição Federal em 1988, e estende-se até os dias atuais. A nova fase caracteriza-se por um novo paradigma de gestão de recursos hídricos, baseado na gestão descentralizada e participativa, no uso múltiplo, na bacia hidrográfica como unidade de planejamento e no valor econômico da água (Thomas, 2002). Segundo o autor, no início do século passado, o desenvolvimento do setor elétrico, impulsionado pelo desenvolvimento industrial, gerou uma demanda por um marco regulatório que lhe desse amparo. Esse marco foi criado através da promulgação, após 27 anos de tramitação no Congresso Nacional, do decreto 24.643 de 10/07/1934, denominado de “Código das Águas”. Este documento é considerado extremamente avançado para a sua época, pois continha elementos de conceitos atuais como o princípio usuário-pagador e o princípio poluidor-pagador. Os primeiros passos para o rompimento com o velho paradigma ocorreram nas décadas de 40 e 50, com a implantação do modelo de gestão do Tennessee Valley Authority (TVA) nas bacias do rio São Francisco e Paraíba do Sul.

A partir de 1978, as novas idéias que predominavam entre os especialistas levaram à criação de mais de 10 comitês executivos nas bacias mais críticas do país. Deve-se ressaltar o importante papel exercido pela Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), promovendo a discussão e disseminação das novas idéias. Contudo, a nova fase começa somente a partir da nova Constituição Federal de 1988, pois a partir desta data, as novas idéias começaram a ser implementada de fato. Assim, foram criados outros marcos legais significativos para a gestão de recursos hídricos, como a Lei 9433, em 1997, denominada Lei das Águas, a Lei 9984 criada no ano 2000 ou “Lei da ANA” e as Leis estaduais de águas (Thomas, 2002).

2.2.1 Lei 9433

Em 1997, após cinco anos de tramitação no Congresso e discussão intensa com envolvidos e interessados pela gestão das águas, foi sancionada a Lei Federal 9.433. Esta Lei regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, instituindo a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e criando o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SNGRH). A PNRH baseia-se nos fundamentos e princípios descritos a seguir, que em sua maioria também estão previstos nas leis estaduais de águas.

A água é um bem de domínio público e um recurso natural limitado, dotado de valor econômico e em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é para o consumo humano e a dessedentação de animais. A gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas. A bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e atuação do Sistema Nacional de Gestão de Recursos Hídricos (SNGRH). A gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades.

A partir da implantação do novo modelo de gerenciamento dos recursos hídricos no Brasil, toda a sociedade, e não apenas o governo, passa a ser responsável por cuidar dos rios. Atualizam-se alguns conceitos, como o do poluidor pagador, cobrança pelo uso da água, outorga de uso da água, dentre outros, e todos os usuários significantes da água dos diferentes setores produtivos (industrial, saneamento e irrigação) passam a pagar pela água captada nos rios brasileiros. A unidade de planejamento desse novo modelo de gerenciamento dos recursos hídricos é a bacia hidrográfica e sua base está nos comitês, que são órgãos colegiados com poder de decisão, que congregam o setor público, usuários de água e organizações civis e nas agências de bacia, seu braço técnico e executivo (CEIVAP, 2003).

No Rio de Janeiro, o Decreto Federal nº 1842 de 22 de março de 1996, criou o Comitê para a Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (CEIVAP), tendo sido instalado no dia 18 de dezembro de 1997. Desde então, o CEIVAP vem se firmando como fórum de debate e decisões sobre as questões do rio Paraíba do Sul. O comitê tem a atribuição de gerenciar os recursos hídricos da bacia de forma descentralizada e participativa, de acordo com a lei. A meta primeira do CEIVAP é promover a articulação dos três estados onde a bacia do Paraíba do Sul se situa (São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro), na busca de soluções conjuntas para os problemas comuns relativos à sua degradação (CEIVAP, 2003).

2.2.2 Cobrança pelo uso da água.

Segundo a Lei 9.433 de 08 de janeiro de 1997 os instrumentos da política nacional de recursos hídricos são: os planos de recursos hídricos; o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água; a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos; a cobrança pelo uso de recursos hídricos; a compensação aos municípios e informações sobre recursos hídricos. Desses instrumentos de gestão, a cobrança é talvez aquele que provoque maior polêmica em virtude da diversidade de objetivos e mecanismos existentes e, principalmente, da dúvida sobre o destino e a transparência na aplicação dos recursos arrecadados, que gera, por vezes, desconfiança e a falsa idéia de que se trata de mais um imposto (Thomas, 2002).

A cobrança da água na bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul tem como base a metodologia elaborada pelo CEIVAP e pode ser obtida segundo a fórmula de composição da cobrança descrita abaixo (Equação 1).

Fórmula da composição da cobrança (Cobrança total mensal)

$$C = Q_{\text{cap}} k_0 \text{PPU} + Q_{\text{cap}} k_1 \text{PPU} + Q_{\text{cap}} (1 - k_1)(1 - k_2 k_3) \text{PPU} \quad (1)$$

(1ª Parcela) (2ª Parcela) (3ª Parcela)

em que:

C = valor mensal (R\$);

Q_{cap} = volume de água captado durante um mês (m³ mês⁻¹)

K₀ = expressa o multiplicador de preço unitário para captação (inferior a 1,0 (um) definido pelo CEIVAP);

K₁ = coeficiente de consumo para a atividade do usuário em questão, ou seja, a relação entre o volume consumido e o volume captado pelo usuário (ou o índice correspondente à parte do volume captado que não retorna ao manancial);

K₂ = percentual do volume de efluentes tratados em relação ao volume total de efluentes produzidos (ou o índice de cobertura de tratamento de efluentes doméstico ou industrial), ou seja, a relação entre a vazão efluente tratada e a vazão efluente bruta;

K₃ = expressa o nível de eficiência de redução de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) na estação de tratamento de efluentes;

PPU = Preço Público Unitário correspondente à cobrança pela captação, pelo consumo e pela diluição de efluentes, para cada m³ de água captada (R\$ m⁻³);

1ª Parcela: cobrança pelo volume de água captada no manancial;

2ª Parcela: cobrança pelo consumo (volume captado que não retorna ao corpo hídrico);

3ª Parcela: cobrança pelo despejo do efluente no corpo receptor.

Logo: **Cobrança = captação + consumo + tratamento**

Para irrigação: PPU irrigação = R\$ 0,0005 por m³ e Captação irrigação = R\$ 0,0002 por m³.

Vale lembrar que, para outras atividades, como indústria e saneamento, esses valores são mais elevados, pois são atividades consideradas mais poluidoras do que a agricultura.

Devido à importância que a bacia do rio Paraíba do Sul tem para o estado do Rio de Janeiro, é necessário que a sociedade civil organizada participe das decisões nos comitês de bacia, principalmente no que se refere à implantação de um programa de manejo adequado, que tenha como objetivo garantir a produção de água de boa qualidade e em quantidade suficiente para abastecer a população da bacia.

Entende-se como manejo adequado, aquele que tem uma visão holística, em que o manejo é feito em toda a bacia e não apenas na calha do rio, e também considere o homem como o principal ator que vive na bacia hidrográfica e que tem o poder de direcionar ações concretas no sentido de manejar a bacia de forma sustentável.

2.2.3 Outorga do uso da água

O termo outorga significa aprovação, licença ou concessão. Trata-se, de fato, de uma concessão para o uso da água. Porém, não deve ser confundida com concessão de serviço público, como é o caso do abastecimento de água ou fornecimento de energia elétrica, que possuem suas próprias regras. Segundo Kelman (2000), a outorga dá ao usuário apenas o direito de uso da água, sem aliená-la, devendo também se constituir numa garantia de acesso à água. Como a água é um bem escasso, esta garantia passa a ter valor econômico.

Segundo Baena et al. (2004), a outorga de direito de uso de recursos hídricos é considerada atualmente uma ferramenta indispensável para a obtenção de licenciamento de diversas atividades junto aos órgãos ambientais e obtenção de financiamentos. É ainda um documento necessário para obtenção de certificação de qualidade, quando se trata de empreendimento industrial.

Existem grandes diferenças nos critérios para outorga entre os estados federados em relação às águas superficiais. A vazão a ser outorgada varia com o regime do rio e em função da legislação Federal e Estadual. Em rios perenes, a outorga é usualmente feita com base na Q_{7,10}, Q_{95%} ou Q_{90%}, atribuindo-se valores percentuais a elas, ou seja, outorgando-se apenas parte destes valores de vazões mínimas. Para rios intermitentes, o processo de outorga torna-se mais complexo, pois em determinada época do ano o rio deixa de apresentar vazão (Garrido, 2003).

Para um bom planejamento de uso racional da água de uma determinada região, é necessária informação consistente sobre as vazões mínimas dos rios ao longo do ano, servindo de base para os critérios de outorga do uso da água dos mananciais da região (Brasil, 1997).

Uma das principais limitações encontradas na determinação das vazões mínimas de referência a serem utilizadas nos processos de outorga de uso da água, diz respeito às inconsistências nas bases de dados fluviométricos. Pela análise do estudo realizado por Ramos & Pruski (2003) sobre o comportamento das vazões médias, máximas e mínimas em diversas estações fluviométricas situadas na bacia do São Francisco, é possível evidenciar, a partir da comparação entre as vazões calculadas nas diversas estações fluviométricas, várias

inconsistências, inclusive com grandes reduções na magnitude destas variáveis para as estações com maior área de drenagem. Além disso, as perdas de água por evaporação nos reservatórios de regularização caracterizam-se como um outro fator de grande importância na análise da vazão máxima permissível para a concessão de outorga.

Segundo Novaes (2005), um índice muito utilizado para a representação das vazões mínimas em estudos de disponibilidade hídrica e que considera a sua magnitude, duração e frequência de ocorrência é a vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$). Outros índices muito utilizados em estudos de disponibilidade hídrica, principalmente em processos de concessão de outorga, são as vazões mínimas obtidas da curva de permanência, que representa a parcela de tempo que uma determinada vazão é igualada ou superada durante o período analisado, sendo as vazões associadas às permanências de 90% ($Q_{90\%}$) e 95% ($Q_{95\%}$), as mais utilizadas em diversos estados brasileiros.

A vazão de referência é um valor de vazão estabelecido que passa a representar o limite superior de utilização da água em um curso de água. A aplicação do critério de vazão de referência, segundo Harris et al. (2000), se constitui em procedimento adequado para a proteção dos rios, pois as alocações para derivações são feitas, geralmente, a partir de uma vazão de base de pequeno risco.

2.3 Regionalização de Vazão

Segundo Tucci (1997), a regionalização de vazão é uma técnica utilizada para suprir a carência de informações hidrológicas, em locais com pouca ou nenhuma disponibilidade de dados, sendo considerada uma ferramenta de suma importância no gerenciamento dos recursos hídricos. Em sentido amplo, entende-se como regionalização hidrológica, qualquer processo de transferência de informações das estações pluvio e fluviométricas para outros locais, em geral, sem observações.

A regionalização consiste num conjunto de ferramentas que exploram ao máximo as informações existentes, visando à estimativa das variáveis hidrológicas em locais sem dados ou informações insuficientes. Esta técnica pode ser utilizada para melhor explorar as amostras pontuais, verificar a consistência das séries hidrológicas e identificar a falta de postos de observação. Os postos selecionados devem ter pelo menos cinco anos de dados. A amostra não é necessariamente representativa para séries curtas na vizinhança de cinco anos, mas o conjunto dos postos pode ser representativo do comportamento das vazões em estudo para a região (Tucci, 2001; Chaves et al., 2002; Tucci, 1998).

No estudo de regionalização devem ser consideradas as características morfométricas e climáticas das bacias que mais explicam a distribuição da vazão e que sejam mais facilmente mensuráveis. Segundo os mesmos autores, são usados como características físicas, a área da bacia, o comprimento do curso d'água principal e a densidade de drenagem. Além dessas variáveis, podem ser incluídos também, o tempo de concentração, a altitude média da bacia e a precipitação.

Os modelos de regionalização de vazão buscam uma melhor estimativa das vazões em seções que não possuem medições fluviométricas, não sendo recomendada a utilização destes modelos em seções que possuem medições, pois os mesmos não substituem as informações reais (Silva Júnior et al., 2002). Segundo os autores, dentre os métodos existentes destacam-se o método tradicional e outros métodos alternativos.

2.3.1 Método tradicional

O método tradicional consiste na identificação de regiões hidrologicamente homogêneas e no ajuste de equações de regressão, entre as diferentes variáveis a serem regionalizadas e as características físicas e climáticas das bacias de drenagem para cada região homogênea. Apesar de ser muito eficiente, necessita de um grande número de informações.

Como a maioria das bacias hidrográficas brasileiras possui escassez de informações e limitação na base de dados, a precisão e o uso deste método podem não torná-lo recomendável (Silva Júnior et al., 2002).

2.3.2 Métodos alternativos

Segundo Silva et al. (2006), na falta de dados medidos, estudos hidrológicos devem ser realizados a fim de fornecer estimativas confiáveis de disponibilidade hídrica. Dentre os possíveis métodos, o de proporção de áreas de drenagem e os interpolativos constituem as técnicas expeditas com ampla utilização, que merecem avaliação quanto à aplicabilidade, para suprir a deficiência de dados e estimar a disponibilidade hídrica para a outorga de uso dos recursos hídricos.

Segundo Pereira (2004), o método de razão de área de drenagem, tem sido comumente utilizado no cálculo de vazões regionais, visando à estimativa das vazões nas seções de deságüe das sub-bacias no rio São Francisco. Este método permite estimar a vazão em uma seção qualquer da bacia utilizando a razão entre a área de drenagem da seção de interesse e a área de drenagem da seção de vazão conhecida, multiplicada pelo valor da vazão da seção conhecida.

Com o objetivo de superar as limitações existentes na base de dados de grande parte das bacias hidrográficas brasileiras, diversas metodologias têm sido desenvolvidas, dentre elas a metodologia baseada na interpolação linear, descrita pela ELETROBRÁS (1985), na qual as vazões relativas à seção de interesse são obtidas utilizando as vazões correspondentes às seções fluviométricas mais próximas. Assim, quando a seção de interesse encontra-se entre dois postos fluviométricos, a vazão na seção de interesse é igual à vazão na seção de montante mais um incremento da vazão proporcional ao aumento da área de drenagem entre a estação de montante e a de jusante.

Quando isto não acontece, ou seja, quando a seção de interesse está a montante ou a jusante de apenas um posto fluviométrico, considera-se que a vazão específica das duas seções é igual. Neste caso, a aplicação desta metodologia é recomendada somente quando a diferença das áreas de drenagem das duas seções analisadas for inferior a três vezes uma em relação a outra (Novaes, 2005).

Também com a finalidade de propor um método que fosse condizente com a realidade da maioria das bacias hidrográficas brasileiras, Chaves et al. (2002) desenvolveram metodologia de interpolação e extrapolação de vazões mínimas cujas soluções dependiam da posição relativa da seção de interesse em relação aos postos fluviométricos mais próximos, sendo a área de drenagem e a distância entre a seção de interesse e o posto fluviométrico, as variáveis utilizadas para a estimativa das vazões nas seções de interesse.

2.4 Precipitação Média Anual

A precipitação média em uma bacia mostra o comportamento espacial das precipitações, além de servir de referência para o planejamento da agricultura irrigada e outros usos, fornecendo subsídios para a estimativa de outros parâmetros hidrológicos, como por exemplo o coeficiente de deságüe.

Segundo Euclides et al. (1999), a estimativa da precipitação média em uma bacia hidrográfica pode ser realizada utilizando-se varias metodologias, dentre elas, o método do Polígono de Thiessen. Esse método atribui um fator de ponderação aos totais precipitados em cada pluviômetro proporcional à área de influência de cada um. As áreas de influência ou pesos são determinadas no mapa da bacia contendo as estações, unindo-se os pontos adjacentes por linhas retas e, em seguida, traçando-se as mediatrizes dessas retas, formando polígonos. Os lados dos polígonos são os limites das áreas de influência de cada estação. A

precipitação média é calculada pela média ponderada entre a precipitação (P_i) de cada estação e o peso a ela atribuído (A_i) que é a área de influência de P_i .

Vários trabalhos têm sido realizados adotando a precipitação média anual como um dos parâmetros para o estudo do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas. Como exemplo, pode ser citado o trabalho desenvolvido por Pruski et al. (2004) na bacia do rio São Francisco. Os autores verificaram que as precipitações médias anuais naquela bacia apresentam um comportamento decrescente da foz para a nascente do rio, podendo essa informação ser utilizada para melhor planejamento do uso da água na bacia.

Pereira et al. (2003) utilizaram esse parâmetro hidrológico no estudo da distribuição espacial das variáveis hidrológicas na bacia do rio São Francisco e verificaram que as precipitações médias anuais ajudaram no entendimento do comportamento hidrológico da bacia.

2.5 Coeficiente de Deságüe

Do volume total precipitado sobre uma bacia hidrográfica, apenas uma fração atinge a seção de deságüe, uma vez que parte da água é interceptada, outra preenche as depressões e outra infiltra no solo, umedecendo-o e abastecendo o lençol freático. Portanto, o volume escoado representa apenas uma parcela do volume precipitado, sendo a relação entre os dois, denominada coeficiente de deságüe. As quantidades interceptadas, armazenadas na superfície, infiltradas e escoadas podem variar consideravelmente de uma precipitação para outra e, conseqüentemente, o coeficiente de escoamento superficial. A porcentagem de chuva convertida em escoamento superficial aumenta com o crescimento da intensidade e duração da precipitação (Pruski et al., 2003). O coeficiente de deságüe tem sido utilizado no estudo do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas, uma vez que permite inferir sobre como os recursos naturais da bacia estão sendo tratados, principalmente o solo e a água.

Diversos trabalhos foram desenvolvidos utilizando o coeficiente de deságüe no estudo do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas. Pereira et al. (2003) verificaram que na bacia do rio São Francisco as estações fluviométricas com as menores áreas de drenagem e com as maiores quantidades precipitadas apresentaram os maiores valores de coeficiente de deságüe. Pereira et al. (2005), verificaram que o coeficiente de deságüe contribuiu para o melhor entendimento do comportamento hidrológico da bacia do rio Verde Grande.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e Características da Área de Estudo

O trabalho foi realizado para uma área localizada no município de Campos dos Goytacazes, no norte do estado do Rio de Janeiro, e faz parte da área do PROJIR, realizado em 1982 pelo Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA/PLANALSUCAR),

A área está inserida na microbacia hidrográfica do rio Muriaé, entre as coordenadas geográficas de $21^{\circ}37'30''$ e $21^{\circ}39'54''$ de Latitude Sul e $41^{\circ}22'30''$ e $41^{\circ}26'15''$ de longitude Oeste (Figura 1). Apresenta relevo de topografia plana em sua maioria, com colinas suave onduladas muito características nesse ambiente conhecido como tabuleiros costeiros. Os solos estão representados principalmente por Neossolos, Cambissolos e Latossolos, apresentam argila de atividade baixa, média e alta, de textura bastante variável. A temperatura média varia de 26 a 32 °C, a precipitação média varia de 31 a 180,5 mm e a umidade relativa média varia de 72 a 92%.

Além da estimativa da disponibilidade hídrica superficial, utilizando uma técnica de regionalização de vazão conhecida como razão de área de drenagem, também foram determinadas as precipitações média e anual da bacia e o coeficiente de deságüe.



Figura 1. Localização da área de estudo e foz do rio Muriaé. (Acesso em 28/01/2007)

3.2 Dados da Bacia do Rio Muriaé Utilizados no Estudo

A disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica pode ser avaliada pela análise de elementos hidrológicos, como as vazões mínimas observadas ao longo do ano, refletindo o potencial natural disponível para o abastecimento de água de populações, indústrias, irrigação,

navegação, geração de energia elétrica e lançamento de efluentes, sendo as vazões mínimas caracterizadas pela sua duração e frequência de ocorrência.

Foram analisados os dados de quatro estações fluviométricas (Tabela 1 e Figura 2) e de vinte e nove estações pluviométricas (Tabela 2 e Figura 3), pertencentes à rede hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas (ANA).

Tabela 1. Estações fluviométricas localizadas na bacia do Rio Muriaé

Código	Estação	Latitude (Graus)	Longitude (Graus)	Área de drenagem (km²)	Altitude (m)
58915000	Muriaé	-21,1333	-42,3666	1120	-
58920000	P. do Muriaé	-21,1486	-42,2155	2659	167
58940000	Itaperuna	-21,2077	-41,8933	5812	113
58960000	C. Moreira	-21,4872	-41,6166	7270	28

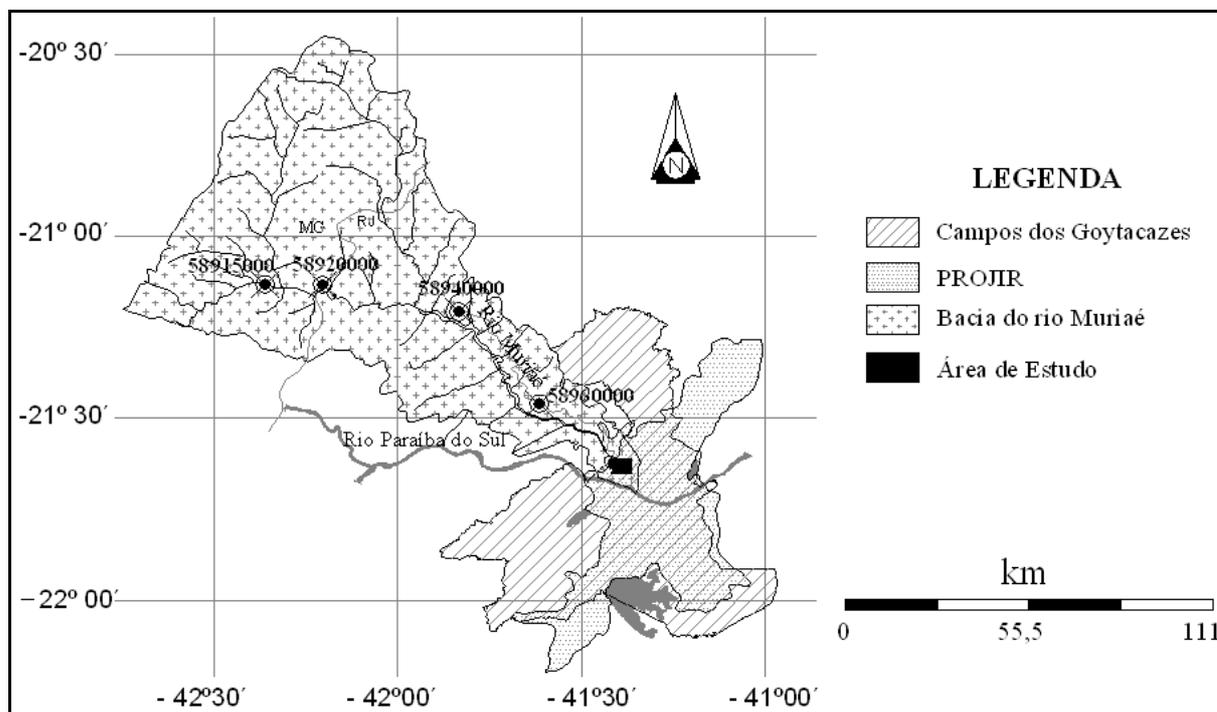


Figura 2. Localização das estações fluviométricas na bacia do Rio Muriaé.

Tabela 2. Estações Pluviométricas localizadas na bacia do Rio Muriaé e vizinhas

Estação	Código	Localização		Precipitação média anual (mm)	Série histórica (anos)
		Latitude	Longitude		
Caiana	02041005	-20,6939	-41,9219	1268,4	14
Natividade	02041046	-20,9308	-41,8500	1504,6	30
Jequeri	02042001	-20,4500	-42,6500	1229,4	22
S.M. do Anta	02042016	-20,6825	-42,8067	1173,1	14
Matipo	02042017	-20,2772	-42,3256	1198,1	14
Porciúncula	02042027	-20,9633	-42,0338	1192,28	32
S. J. Barra	02141001	-21,4828	-41,1033	1484,83	27
Campos	02141002	-21,7500	-41,3333	1030,29	30
Campos	02141003	-21,4919	-41,6136	983,49	14
Itaperuna	02141004	-21,2052	-41,9150	1103,33	40
S. Fidélis	02141005	-21,6452	-41,7625	926,97	19
Cambuci	02141007	-21,6267	-41,8858	1054,43	14
Campos	02141008	-21,4167	-41,7000	1163,26	18
Campos	02141009	-21,7500	-41,4833	916,21	19
Usina Barcelos	02141012	-21,7167	-41,1833	830,7	27
P. Itabapoana	02141014	-21,2061	-41,4628	1030,8	14
S.J. Calado	02141016	-21,0367	-41,6522	1383,9	14
S. A. de Pádua	02142058	-21,5419	-42,1694	1139,38	31
Carangola	02042000	-20,7400	-42,0239	1166,4	14
Manhuaçu	02042002	-20,2500	-42,0333	1862,2	14
S.F Glória	02042014	-20,7694	-42,3011	1423,3	14
A. Dutra	02142000	-21,3069	-42,8606	1468,7	14
Cataguases	02142001	-21,3894	-42,6964	1462,8	14
P. Muriaé	02142002	-21,1486	-42,2156	1480,8	14
Muriaé	02142004	-21,0503	-42,5156	1352,0	14
I. de Minas	02142006	-21,4714	-42,8131	1503,8	14
Pirapetinga	02142007	-21,6581	-42,3428	1196,2	14
V. Redonda	02142008	-21,7692	-42,5397	1300,10	14
Miradouro	02142009	-20,9114	-42,3494	1339,4	14

Para a regionalização da vazão foi utilizada a estação pluviométrica Cardoso Moreira (58960000) por ser a que está localizada à montante e mais próxima da seção onde se deseja conhecer as vazões mínimas de referência.

Sendo assim, nesse estudo foram calculadas e analisadas as vazões mínimas de sete dias de duração (Q_7), as vazões mínimas de sete dias de duração e período de retorno de dez anos ($Q_{7,10}$) utilizando-se médias diárias anuais e trimestrais e também, as vazões mínimas anuais, associadas à 90% ($Q_{90\%}$) e 95% ($Q_{95\%}$) de permanência. Tanto para os dados pluviométricos como para os fluviométricos, foi adotado o período base de dados da série histórica de 1954 a 2002.

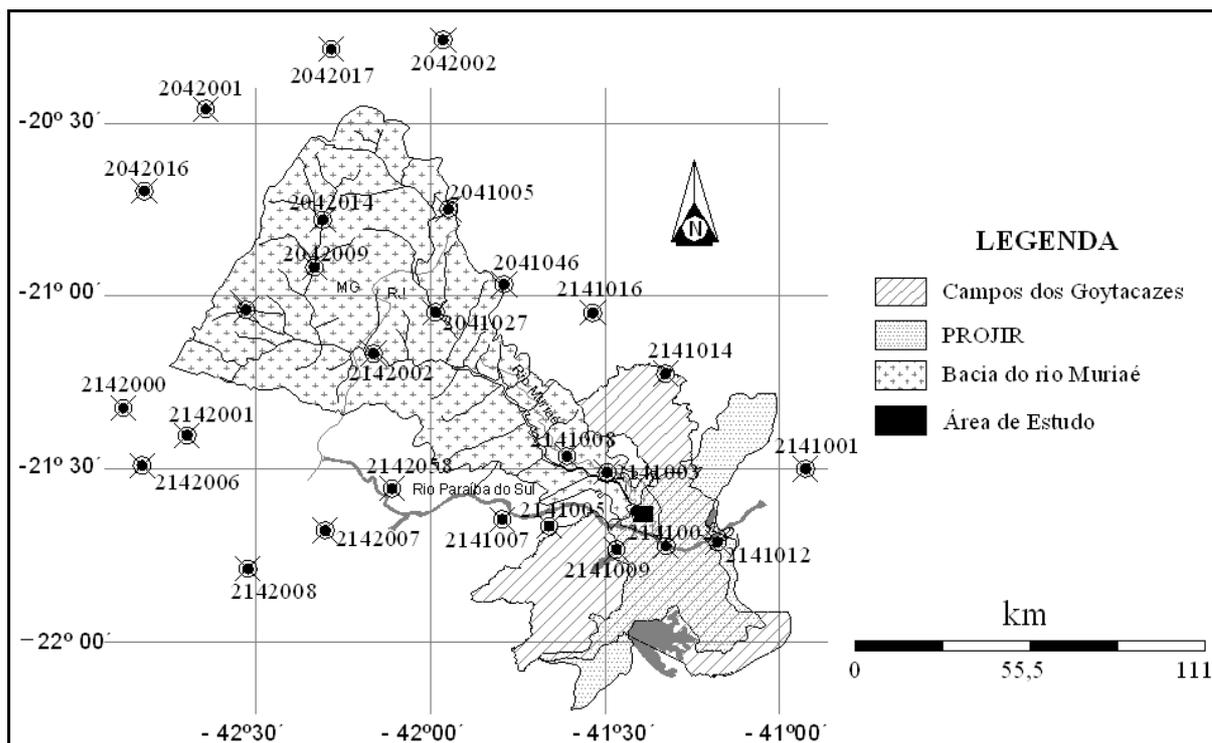


Figura 3. Localização das estações pluviométricas utilizadas.

3.3 Precipitação Média Anual

Para a análise da distribuição espacial das precipitações anuais ao longo da bacia e o cálculo da precipitação média na bacia, foi utilizado o método do Polígono de Thiessen, que atribui um fator de peso aos totais precipitados em cada aparelho proporcional à área de influência de cada um. Essa rotina computacional está inserida no programa RH 3.0 (Euclides et al., 1999).

3.4 Cálculo da Vazão Mínima de Sete Dias Consecutivos e Período de Retorno de 10 Anos ($Q_{7,10}$)

Primeiramente foram calculadas as vazões mínimas de sete dias consecutivos (Q_7). Para isso, a série completa de dados diários de vazão no período de 1954 a 2002 foi organizada e com auxílio do programa “ $Q_{7,10}$ ”, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos da UFV (GPRH), foram calculadas as vazões mínimas de sete dias consecutivos (Q_7). Nesse pacote computacional, o arquivo que continha o banco de dados no formato Access (extensão mdb) foi selecionado pelo código da estação de interesse. O programa calculou a Q_7 em cada mês, em cada semestre, em cada trimestre e no ano. Após a escolha dos parâmetros necessários, o programa calculou as vazões mínimas para diferentes períodos do ano.

Para o cálculo da $Q_{7,10}$ na estação de interesse, foi utilizado o pacote computacional RH 3.0, desenvolvido por Euclides et al. (1999), com base nas vazões mínimas de sete dias consecutivos previamente obtidas. Assim, foi possível calcular as Q_7 para diferentes períodos de retorno (2, 5, 10, 20, 50, 100 anos) e utilizando várias funções de distribuição de probabilidade. Segundo Novaes (2005), deve ser escolhido o modelo que apresentar o melhor desempenho, pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, e menor CV (coeficiente de variação). A Figura 4 apresenta um exemplo de estimativa da $Q_{7,10}$ utilizando o pacote computacional.

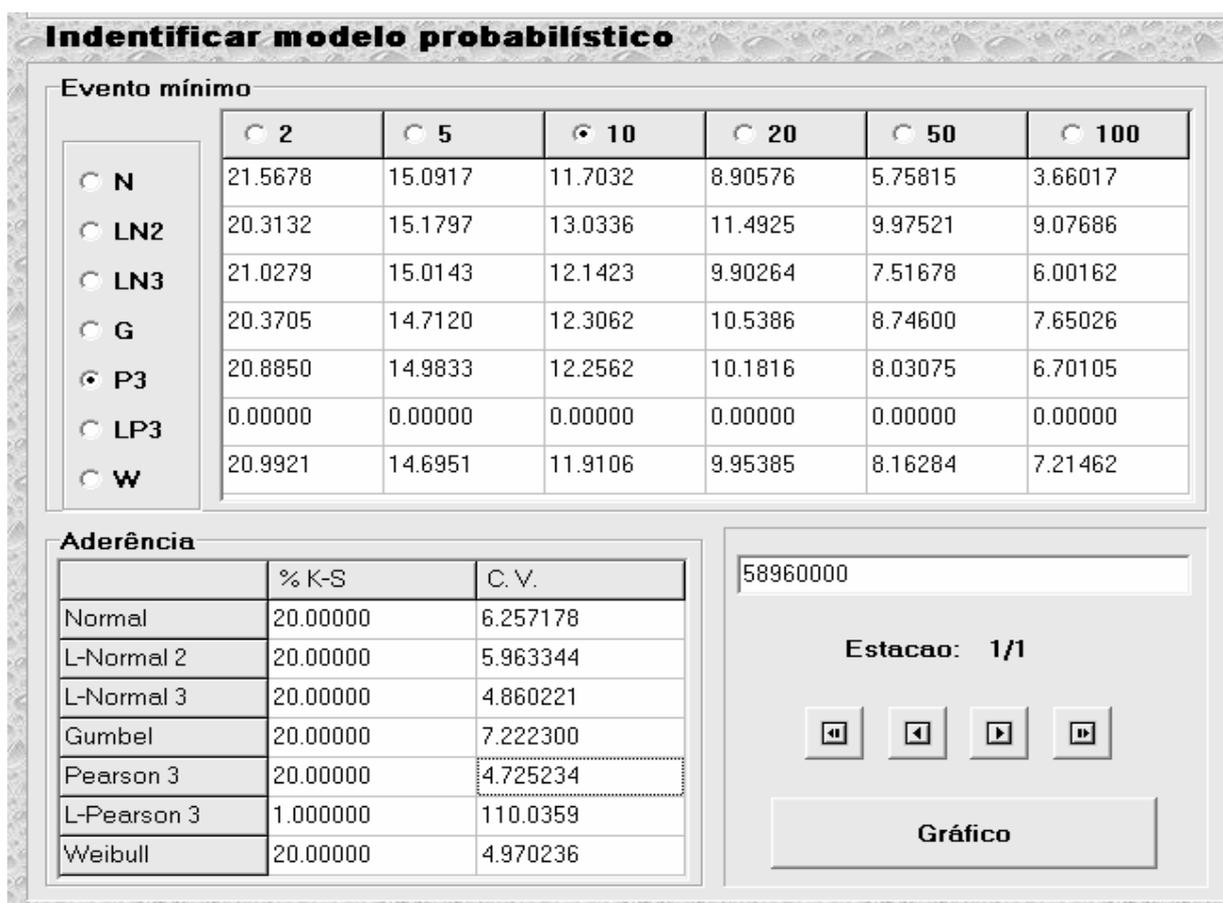


Figura 4. Tela do RH 3.0 mostrando o cálculo da $Q_{7,10}$ na primeira estação a montante do ponto de interesse (estação 58960000)

3.5 Cálculo das Vazões Mínimas Associadas à Duração de 90 e 95% no Tempo ($Q_{90\%}$ e $Q_{95\%}$)

Para o cálculo da $Q_{90\%}$ e $Q_{95\%}$ o arquivo com os valores diários de vazão obtidos no banco de dados da ANA, referente à estação 58960000, foi importado utilizando o pacote computacional PSF, desenvolvido pelo GPRH. Nesse pacote, os dados diários foram organizados e o cálculo das vazões mínimas associadas a diferentes durações no tempo e frequências de ocorrências foi efetuado. A Tabela 3 apresenta um exemplo de cálculo para estação 58960000.

Tabela 3. Vazões mínimas associadas a diversas frequências e durações no tempo.

Frequência (%)	Fmax (%)	Fmin (%)	Vazão (m³ s⁻¹)
50	53,5674	48,9335	56,0671
55	58,208	53,5674	50,5546
60	63,2966	58,208	45,7336
65	68,4453	63,2966	41,6264
70	74,1558	68,4453	38,0212
75	79,9799	74,1558	34,9501
80	84,1324	79,9799	32,1604
85	87,4423	84,1324	28,5242
90	90,5048	87,4423	24,5161
95	95,3327	93,1528	20,2041

Como esse estudo está sendo realizado em uma área pertencente à bacia do rio Muriaé, de domínio da união, foi considerado, para fins de outorga, o critério de 70% da Q_{95%}, e para efeitos de cobrança do uso da água, foi utilizada a equação 1 proposta pelo CEIVAP.

3.6 Coeficiente de Deságüe Médio Anual

O coeficiente de deságüe médio anual foi estimado utilizando os princípios apresentados na equação 2, através do programa PSF. A área de drenagem utilizada na estimativa foi de 8230 km², uma vazão média anual de 106,41 m³ s⁻¹ e uma precipitação média anual de 1267,4 mm. O valor da vazão média anual, na seção de interesse, foi estimado com base na metodologia de regionalização da vazão pelo método da área de drenagem.

$$C = \frac{VT(\text{escoado})}{VT(\text{precipitado})} \quad (2)$$

3.7 Regionalização da Vazão pelo Método da Razão de Área de Drenagem.

A regionalização da vazão na seção de interesse foi calculada utilizando o método alternativo, conhecido como razão de área de drenagem e apresentada na equação 3, conforme Pereira (2004):

$$Q_r = \left(\frac{A_y}{A_x} \right) \cdot Q_{rp} \quad (3)$$

em que:

Q_r = vazão de referência em um ponto da bacia, m³ s⁻¹;

Q_{rp} = vazão de referência em um posto fluviométrico próximo, m³ s⁻¹;

A_y = Área de drenagem da seção de interesse, a jusante da seção de vazão conhecida, km².

A_x = Área de drenagem da seção de vazão conhecida, km²; e

Para o cálculo da vazão de referência em um ponto qualquer da bacia (Q_r), o valor da área de drenagem da seção de vazão conhecida (A_x) utilizado foi de 7270 km², correspondente à área de drenagem da estação 58960000, obtida a partir dos dados da ANA.

A área de drenagem da seção de interesse, a jusante da seção de vazão conhecida (Ay), foi obtida por vetorização sobre carta topográfica, utilizando-se o módulo AREA, do pacote computacional Topo EVN 5.0, cujo valor foi de 8146,59 km².

A seção de interesse onde se desejava estimar a Qr se localiza à jusante da estação 58960000, próximo à foz rio Muriaé, com coordenadas geográficas do ponto são 21°39'46'' de latitude sul e 41°22'30'' de longitude oeste, conforme Figura 5.

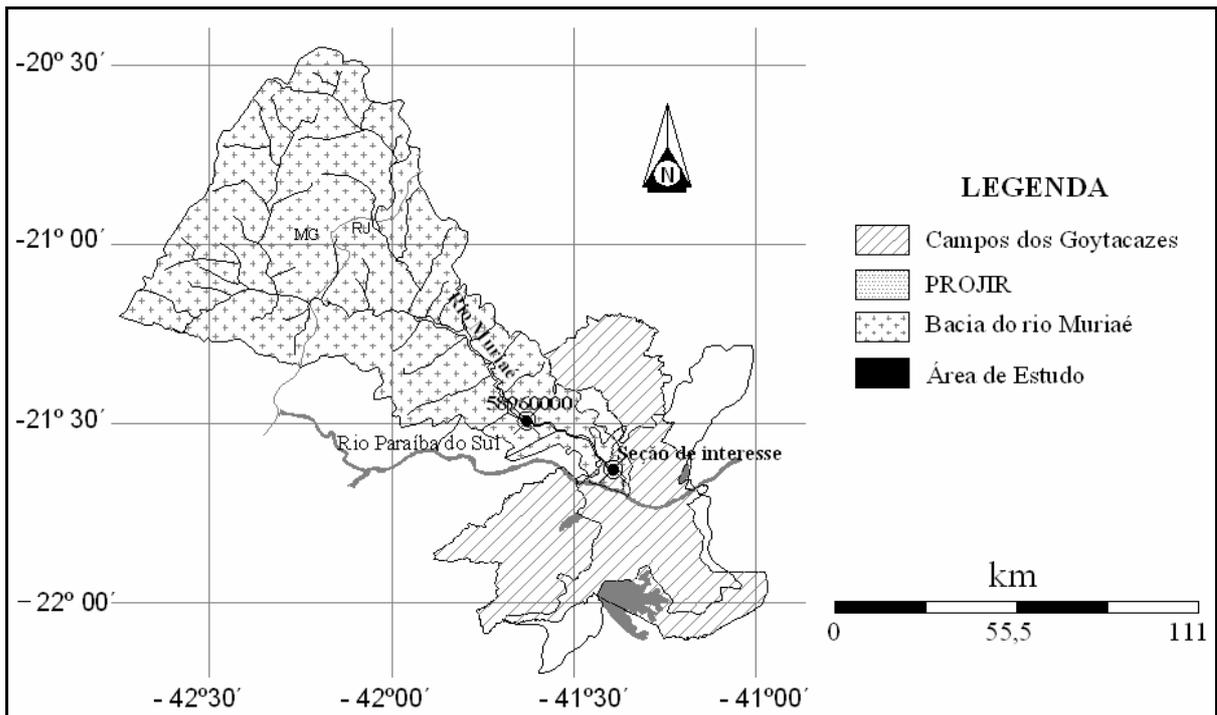


Figura 5. Bacia do rio Muriaé e localização da seção de interesse.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Precipitação Média ao Longo da Bacia

A estimativa da precipitação média ao longo da bacia mostra o comportamento espacial das precipitações e serve de referência para o planejamento da agricultura irrigada e outros usos. Além disso, fornece subsídios para a estimativa do coeficiente de deságüe. Nesse estudo, a precipitação média anual ao longo da bacia do rio Muriaé foi de cerca de 1267,4 mm. A Figura 6 apresenta uma das telas de saída do programa RH 3.0 e a Tabela 4 apresenta os resultados obtidos.

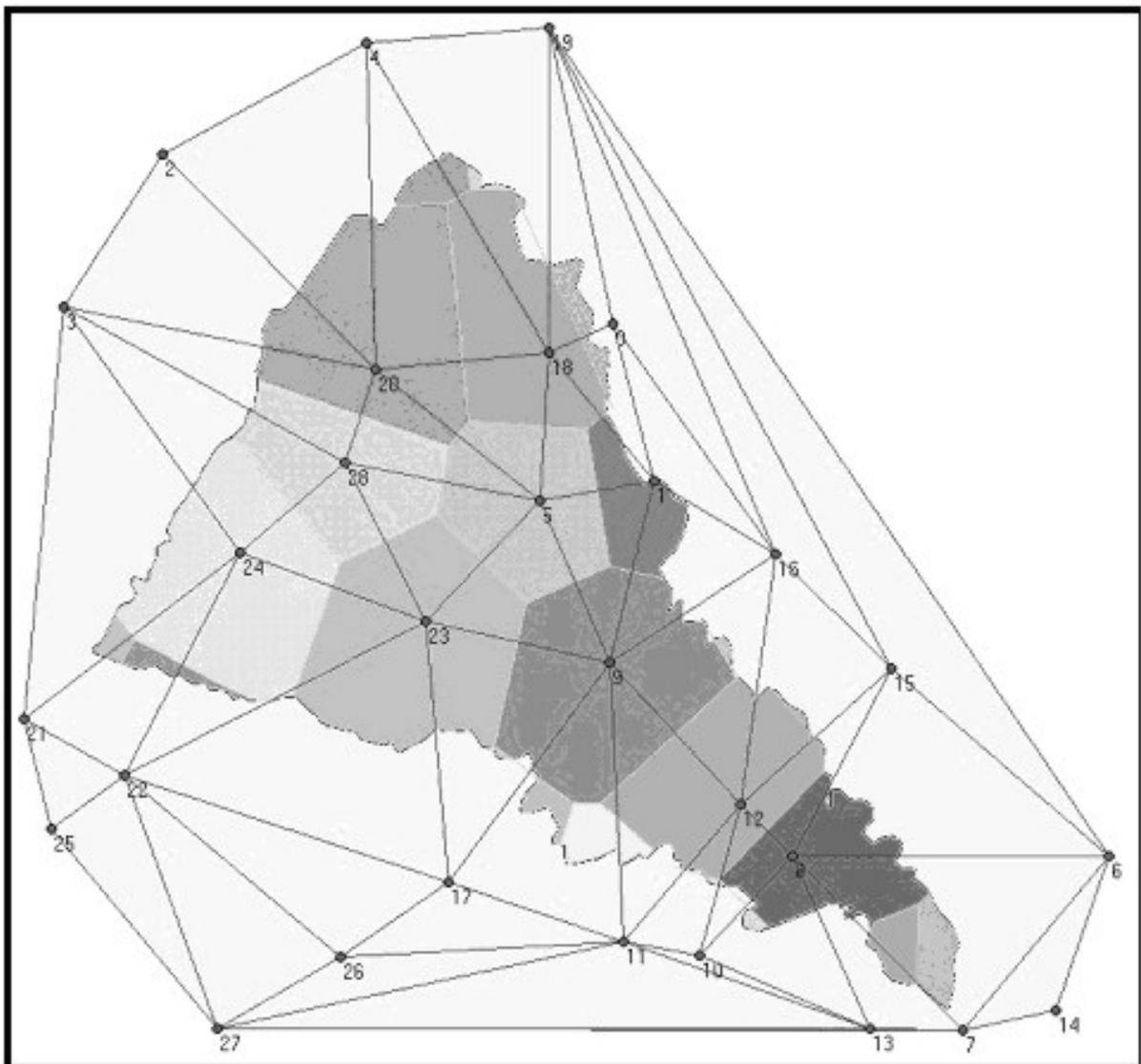


Figura 6. Estimativa da precipitação média utilizando os polígonos de Thiessen.

Tabela 4. Cálculo da precipitação média utilizando o programa Thiessen.

Cálculo da Precipitação Média pelo Método de Thiessen				
Arquivo Editar Operações Exibir				
Mapa da Bacia Planilha de Resultados				
Precipitação Média = 1267,4 mm				
Estação Meteorológica	Área (km ²)	Precipitação (mm)	Fração da Área	Contribuição (mm)
0	60,5153	1268,0	0,0077	9,8
1	242,8556	1505,0	0,0309	46,6
4	68,5218	1198,0	0,0087	10,5
5	640,4316	1192,0	0,0816	97,3
7	87,5499	1030,0	0,0112	11,5
8	473,1172	983,50	0,0603	59,3
9	1019,0530	1103,0	0,1298	143,2
10	10,2495	927,0	0,0013	1,2
11	100,6895	1054,0	0,0128	13,5
12	685,9586	1163,0	0,0874	101,7
13	78,7308	916,2	0,0100	9,2
15	2,8140	1031,0	0,0004	0,4
16	6,1960	1384,0	0,0008	1,1
17	39,3105	1139,0	0,0050	5,7
18	684,3308	1166,0	0,0872	101,7
19	8,9324	1862,0	0,0011	2,1
20	960,5317	1423,0	0,1224	174,2
21	26,7301	1469,0	0,0034	5,0
22	42,9665	1463,0	0,0055	8,0
23	1038,9962	1481,0	0,1324	196,0
24	947,2344	1352,0	0,1207	163,2
28	623,2520	1339,0	0,0794	106,4
Total	7848,9673			

Analisando a Tabela 4 e a Figura 6 é possível verificar uma tendência de aumento das precipitações médias ao longo da bacia, no sentido da foz em direção à nascente. Observando os valores de precipitação média das estações 13 e 5 representativas da região próxima à foz do rio Muriaé e do limite interestadual, respectivamente, nota-se que esses resultados estão de acordo Davis & Naghettini (2000), que encontraram valores de precipitação média, para esta região, variando de 900mm próximo ao litoral do Norte do estado do Rio de Janeiro, até 1200mm próximo à divisa com o estado de Minas Gerais, utilizando o método das isoietas.

4.2 Coeficiente de Deságüe Médio Anual

Os valores de coeficientes de deságüe para bacias agrícolas, de acordo com Goldenfum e Tucci (1996), variam de 0,08 a 0,30 em função da cobertura, textura e declividade do solo. Para a bacia estudada o valor encontrado para o coeficiente de deságüe foi de 0,32. O alto valor do coeficiente de deságüe encontrado confirma alguns indicadores ambientais que revelam a maneira inadequada como vêm sendo tratados os recursos naturais da bacia, principalmente o solo e a cobertura vegetal, repercutindo na qualidade e disponibilidade da água.

A substituição quase que total da floresta primitiva pela lavoura do café e posteriormente pela pecuária, o plantio da cana-de-açúcar com queimadas periódicas, a derrubada da mata, de forma indiscriminada, são alguns exemplos das causas do empobrecimento dos solos, do seu alto grau de erosão e da desproteção a que ficaram sujeitos os cursos de água. Tais condições favorecem uma menor capacidade de infiltração da água no solo e um maior escoamento superficial e, conseqüentemente, um maior coeficiente de deságüe, culminando em graves conseqüências ambientais para a bacia, como a perda de solo e o assoreamento dos rios.

4.3 Regionalização da Vazão pelo Método da Razão de Área de Drenagem

Os valores obtidos para as vazões mínimas de referência (Q_r) no ponto de interesse situado próximo à foz do rio Muriaé e à jusante da estação Cardoso Moreira (58960000) estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Vazões mínimas na seção de interesse para diversos períodos

Período	Vazão mínima ($m^3.s^{-1}$)
$Q_{7,10}$ anual	13,74
$Q_{7,10}$ primeiro trimestre	37,64
$Q_{7,10}$ segundo trimestre	28,35
$Q_{7,10}$ terceiro trimestre	15,43
$Q_{7,10}$ quarto trimestre	15,33
$Q_{90\%}$ anual	27,46
$Q_{95\%}$ anual	22,62

Os valores de vazão mínima são bastante variáveis ao longo do ano na seção estudada. Verifica-se também que, os valores mais altos correspondem aos períodos do primeiro e segundo trimestre do ano. Os valores do terceiro e quarto trimestre são mais próximos do valor calculado com base na média anual.

Os resultados mostraram também que ao se adotar o critério de outorga fixo de 70% da $Q_{95\%}$, estaria disponível para fins de outorga uma vazão de cerca de $15,83 m^3.s^{-1}$, na seção estudada, porém, se o critério de outorga adotado pela União fosse com base na $Q_{7,10}$ variável ao longo do ano, poder-se-ia maximizar os volumes a serem outorgados nos períodos de maiores valores de vazões mínimas, como por exemplo no primeiro e segundo trimestre do ano. Para os demais períodos do ano poderia ser adotado o critério de outorga com base na média da $Q_{7,10}$ anual, uma vez que seu valor é muito próximo dos valores do terceiro e quarto período.

A vantagem de se trabalhar com critérios de outorga variáveis ao longo do ano, para o caso da bacia do rio Muriaé, é o aumento dos volumes a serem outorgados, exatamente nos períodos de maior demanda hídrica pelas culturas e dessedentação humana e animal, sem comprometer a vazão ecológica do curso hídrico, garantindo, dessa maneira, uma maior disponibilidade de água, permitindo a expansão dos setores produtivos.

Os resultados obtidos utilizando a metodologia de proporção de área de drenagem, para a seção considerada, que está localizada próximo à foz do rio Muriaé, são bastante coerentes quando comparados com os resultados encontrados no Plano de Recursos Hídricos na Bacia do rio Paraíba do Sul, que utilizando dados de 199 estações fluviométricas, apresenta o valor de $28,79 m^3.s^{-1}$ para a $Q_{95\%}$ na foz do rio Muriaé (ANA, 2006).

Quando se faz comparações entre os métodos de regionalização da vazão, pode-se obter resultados bem diferentes quanto a eficiência dos métodos alternativos em relação ao método tradicional, como os obtidos por Chaves et al. (2002) que compararam a metodologia tradicional com a metodologia proposta pelos próprios autores para a estimativa da $Q_{7,10}$ na bacia do rio Itapicuru, situada no Estado da Bahia. Os autores constatam que a metodologia proposta apresentou resultados melhores quando comparada com o método tradicional de regionalização de vazões, sendo obtido um erro relativo médio de 45% para o modelo proposto e de 289% para o método tradicional.

AZEVEDO (2004) aplicou e comparou as metodologias da interpolação linear, tradicional e a proposta por Chaves et al. (2002) na sub-bacia do rio Paranã, situada no estado do Tocantins, e concluiu que a melhor metodologia para a regionalização de vazões mínimas para a bacia estudada foi a tradicional, com erro relativo médio de 13,6%, seguida pelas metodologias da interpolação linear de Chaves et al. (2002), com erros relativos médios de 55,2 e 59,6%, respectivamente. O autor ainda observou que as vazões obtidas pelo método de Chaves et al. (2002), em certas situações em que foram utilizados os dados das seções fluviométricas de montante e de jusante, foram superiores às vazões na seção de jusante.

5 CONCLUSÕES

Com base nas análises dos resultados obtidos no estudo aqui desenvolvido, foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

a) A região estudada possui um grande potencial hídrico, tendo o rio Muriaé um papel importante na disponibilidade hídrica dessa região;

b) Com base nas leis que regulamentam a outorga do uso da água na bacia do rio Muriaé, a vazão outorgável na seção considerada é $15,83 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, porém, se os critérios de outorga fossem com base na $Q_{7,10}$ esse valor seria maior no primeiro e segundo trimestres do ano.

c) A precipitação média anual na bacia apresentou um crescimento da foz em direção à nascente;

d) O alto valor do coeficiente de deságüe calculado para a bacia confirma a maneira inadequada como vem sendo historicamente tratados os recursos naturais, principalmente o solo e a cobertura vegetal.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA, 2006. **Nota técnica nº 002/2006/SAG-ANA**. Disponível em: <www.ana.gov.br/CobrancaUso/_ARQS-Estudos>. Acesso em: 20 jun. 2006.

AZEVEDO, A. A. **Avaliação de metodologias de regionalização de vazões mínimas de referência para a sub-bacia do rio Paranã**. 2004. 108f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa - MG, 2004.

BAENA, L. G. N.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; CALIJURI, M. L. Espacialização da Q7,10, Q90% e Q95% Visando à Gestão dos Recursos Hídricos: Estudo de caso para a bacia do rio Paraíba do Sul. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.12, n.1, 24-31, 2004.

BRASIL. **Política Nacional de Recursos Hídricos: Lei nº 9.433**, de 8 de janeiro de 1997, MMA/SRH, 1997.

CARNEIRO, P. R. F. Uso da água e conflito na Baixada dos Goytacazes. In: ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS POPULACIONAIS, 14., 2004. Caxambu-MG. (**Anais da Associação Brasileira de Estudos Populacionais - ABEP**) Caxambú-MG: ABEP, 2004. p. 125-128.

CEIVAP, 2003. **Cobrança pelo Uso da Água na Bacia do Rio Paraíba do Sul**. Disponível em: <http://www.ceivap.org.br/ceivap_1.php>. Acesso em: 17 ago. 2003.

CIDE – Centro de Informações e Dados do Rio de Janeiro. ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO 1999-2000., FAGUNDES, G. R. et al. **Sazonalidade do abacaxi “pérola” nas CEASAS**., Rio de Janeiro. 589p. 2001.

CIRABM, 2003. Disponível em: <http://www.inbo-news.org/ag98_disc/muriae.htm>. Acesso em: 15 set. 2003.

CHAVES, H. M. L.; ROSA, J. W. C.; VADAS, R. G.; OLIVEIRA, R. V. T. Regionalização de Vazões Mínimas em Bacias Através de Interpolação em Sistemas de Informações Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.7, n. 3, p. 43-51. 2002.

CPT, 2006. Disponível em: <<http://www.cpt.org.br/system=news&action=read&id=216>>. Acesso em: 14 fev. 2006.

DAVIS, E. G.; NAGHETTINI, M. C. **Estudo de Chuvas Intensas no Estado do Rio de Janeiro**. 2ª ed. revisada e ampliada. CD-ROM – Brasília: CPRM, 2000.

ELETROBRÁS. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Manual de minicentrais hidrelétricas**. Rio de Janeiro, 205p. 1985.

EUCLYDES, H. P. et al. **RH 3.0 - Regionalização Hidrológica; manual do programa**. Viçosa, MG: UFV/DEA; Brasília, DF: MMA; Belo Horizonte, MG: RURALMINAS. 149p. 1999.

GARRIDO, R. J. S. Subprojeto 4.2B – Avaliação dos mecanismos financeiros para o gerenciamento sustentável da bacia do rio São Francisco. In: **Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco**. Brasília: ANA/GEF/PNUMA/OEA,. 335 p. (Relatório Final). 2003.

GOLDENFUN, J. A.; TUCCI, C. E. M. **Hidrologia de Águas Superficiais**. Brasília, DF: ABEAS, Viçosa, MG, UFV, 128p, 1996.

HARRIS, N. M.; GURNELL, A. M.; HANNAH, D. M.; PETTS, G. E. Classification of river regimes: a context for hydroecology. In: **John Wiley & Sons, Hardcover: Hydrological Processes**. v.14. p.2831-2848. 2000.

KELMAN, J. Outorga e Cobrança de Recursos Hídricos. In: Thame, A. C. de M.(org.): **A Cobrança pelo Uso da Água**: 2. ed. São Paulo: IQUAL, 2000. cap. 5, p.105.

LIMA, J. E. F. W. Determinação e simulação da evapotranspiração de uma bacia hidrográfica do cerrado. FAV/UnB. Brasília-DF. (Dissertação de Mestrado). 75p. 2000.

NOVAES, L. F. **Modelo para a quantificação da disponibilidade de água na sub-bacia do Paracatu**. 2005. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – UFV, Viçosa – MG, 2005.

PEREIRA, S.B.; PRUSKI, F. F.; NOVAES, L. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Distribuição espacial das variáveis hidrológicas na bacia do São Francisco. **Revista de Engenharia na Agricultura**, Viçosa-MG, v.11, n.1-4, p.32-42, 2003.

PEREIRA, S. B. **Disponibilidade hídrica no rio São Francisco**. 2004. 121 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – UFV, Viçosa-MG, 2004.

PEREIRA, S. B.; PRUSKI, F. F.; NOVAES, L. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Análise do comportamento hidrológico no rio Verde Grande. **Revista de Engenharia na Agricultura**, Viçosa-MG, n.1, p.55-60, 2005.

DEMANBORO, A. C.; MARIOTONI, C. A. O conceito de escala e o desenvolvimento sustentável, implicações sobre os recursos hídricos e energéticos. **Revista Brasileira de Energia**. Rio de Janeiro, v.7, n.2, p. 56 – 68, 1999.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D.; **Escoamento superficial**. Viçosa-MG: UFV, 2003. 88p.

PRUSKI, F. F.; PEREIRA, S. B.; NOVAES, L. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Precipitação média anual e vazão específica média de longa duração, na Bacia do São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v.8, n.2, p.247-253, 2004.

RAMOS, M. M.; PRUSKI, F. F. Subprojeto 4.3 - quantificação e análise da eficiência do uso da água pelo setor agrícola na Bacia do São Francisco. In: Projeto gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco. ANA/GEF/PNUMA/OEA. **Relatório final**. Viçosa, MG, 190 p. 2003.

SECKLER, D.; AMARASINGHE, U.; MOLDEN, D.; SILVA, R.; BARKER, R. World water demand and supply, 1990-2025: Scenarios and Issues. **Research report nº 19**, International Water Management Institute, Colombo Sri Lanka, 40p. 1998.

SILVA JÚNIOR, O. B.; BUENO, E. O.; TUCCI, C. E. M.; CASTRO, N. M. R. Extrapolação espacial na regionalização da vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.8, n. 1, p. 21-37. 2002

SILVA, W. A. **Planejamento de áreas irrigadas em assentamentos rurais utilizando os sistemas de informações geográficas**. 2003. 83f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - UFRRJ, Seropédica - RJ, 2003.

SILVA, A. M.; OLIVEIRA, P. M.; MELLO, C. R.; PIERANGELI, C. Vazões mínimas e de referência para outorga na região do Alto Rio Grande, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande – PB, v.10, n.2, p.374–380, 2006.

THOMAS, P. T. **Proposta de uma metodologia de cobrança pelo uso da água vinculada à escassez**. 2002. 139 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.

TUCCI, C. E. M. **Regionalização de vazões**. In: TUCCI, C. E. M. (Org). Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: Ed da Universidade/ ABRH/EDUSP, cap.1. 1997.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: UFRGS, ABRH, 669p. 1998.

TUCCI, C. E. M. Regionalização de vazões. In: **Tucci, C. E. M. (Org.) Hidrologia: ciência e aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: ABRH/UFRGS, p.573 – 620, 2001.

CAPÍTULO II

MODELO DE MAXIMIZAÇÃO DA RENDA PARA A AGRICULTURA IRRIGADA NO NORTE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

RESUMO

O êxito econômico da agricultura irrigada é dependente da lâmina de água e insumos que proporcione a maior renda dos cultivos irrigados. A modelagem matemática vem sendo utilizada como uma importante ferramenta que permite determinar, baseados em funções de produção das culturas à lâmina de água aplicada, as melhores estratégias de aplicação de água e insumos, de forma a se obter a máxima renda das culturas. A produção agrícola tem como fatores importantes na rentabilidade econômica, a água e os nutrientes, e o uso eficiente desses recursos constitui fator preponderante para o êxito da agricultura irrigada. O objetivo do trabalho aqui desenvolvido foi construir um modelo matemático para obtenção da renda maximizada, utilizando funções de produção das culturas à água, obtidas na região estudada para as culturas do maracujazeiro, cana-de-açúcar, abacaxi e mamão. O estudo também visou comparar diferentes metodologias para obtenção da renda utilizando o modelo matemático proposto. O trabalho foi desenvolvido em uma área drenada pelo rio Muriaé, contida no PROJIR (Projeto de irrigação e drenagem da cana-de-açúcar na região Norte-fluminense do Estado do Rio de Janeiro), projeto executado em 1982 pelo Instituto do Açúcar e do Alcool, pelo PLANALSUCAR, e faz parte do acervo bibliográfico da UFRRJ. Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que o modelo matemático desenvolvido foi capaz de indicar o melhor padrão de cultivo que proporcionou os melhores rendimentos econômicos dos cultivos irrigados na área estudada, além disso, se mostrou capaz de determinar a renda líquida máxima das culturas estudadas; os resultados encontrados mostraram também que o método “Lagrangiano Aumentado” foi eficaz na resolução da função objetivo do modelo matemático desenvolvido, podendo ser uma alternativa interessante aos métodos tradicionais.

ABSTRACT

The success of the irrigated agriculture is dependent of the sheet of water and inputs that it provides the largest net income of the irrigated cultivations. Mathematical models have been used as an important tool to reach this aim based in answer functions of the cultures to the water, the best strategies of application of water and inputs, for to obtain the maximized net income of the cultures. The agricultural production has as important factors in the economical profitability, the water and the nutrients, the efficient use of those resources constitutes preponderant factor for the success of the irrigated agriculture. The objective this study was to build a mathematical model for obtaining of the maximized net income, using answer functions of the cultures to the water obtained in the area studied for the cultures of the passion fruit plant, sugarcane, pineapple and papaya. The study also sought to compare two methodologies for obtaining of the maximized net income using the proposed mathematical model. The work was developed in an area drained by the Muriaé River, located in PROJIR (irrigation and drainage project of the sugarcane in the North Fluminense region of Rio de Janeiro State), project executed in 1982 by the Institute of the Sugar and of the Alcohol, through PLANALSUCAR. With base in the obtained results can be ended that the developed mathematical model it was efficient in the determination of the maximized net income of the cultures and that "Lagrangiano Aumentado" method was effective in the resolution of the proposed problem could be used as an alternative to the traditional methods.

1 INTRODUÇÃO

No ano 6000 a.C. a população do planeta era de 5 milhões de habitantes; em 1650, de 500 milhões, com uma taxa de crescimento de 0,3% ao ano e vida média de 30 anos. Em 1850 era de 1 bilhão; em 1930, de 2 bilhões e em 1970, de 3,6 bilhões, com uma taxa de crescimento anual de 2,1%. No ano 2000 as estimativas apontaram para cerca de 6 bilhões de pessoas. Em função deste crescimento, supõe-se que a cada 20 anos dobrem-se os volumes de água consumidos pela humanidade e, na Europa, há uma previsão de que no ano 2050 os volumes captados e disponíveis sejam semelhantes, relação esta que, em 1970 era de 1 para 9 (Freitas, 2000).

A água útil às plantas é reconhecida como recurso vulnerável, finito e escasso em qualidade e quantidade. Como é exatamente isso que faz a distinção entre bem dotado de valor econômico e riqueza no sentido mais amplo da palavra, a água, nessas condições, deixou de ser uma riqueza para ser considerada um bem econômico. O uso da água na agricultura tem sido considerado como o mais alto dentre todos os outros usos (Seckler, 1998). A literatura recente mostra a importância da aplicação do conceito de “economia de água”, não apenas para o uso doméstico e industrial, mais principalmente para fins agrícolas (Droogers et al., 2000). Os mesmos autores relatam que ultimamente, também tem sido dada importância à economia de água na agricultura irrigada.

Embora a nível mundial se disponha de uma situação privilegiada em relação à disponibilidade total de água doce, o Brasil também apresenta um número crescente de problemas quanto à carência deste recurso em diversas regiões, tendo em vista o fato da maior abundância de água estar justamente nas regiões em que há menor concentração populacional e de atividades econômicas. Tendo em vista essa nova realidade, cresce o interesse pelo adequado uso da água e, conseqüentemente, ampliam-se os estudos relacionados à gestão de recursos hídricos, o que pode ser claramente evidenciado pelo surgimento, inclusive, de leis específicas para esta finalidade, as quais passam a tratar a água como um recurso escasso e finito, sendo a ela atribuído um valor econômico (Silva & Pruski, 2000).

No Estado do Rio de Janeiro a agricultura irrigada tem recebido incentivos do governo estadual como forma de desenvolver essa atividade agrícola, principalmente no norte e noroeste do Estado, onde se destacam as culturas da cana-de-açúcar, do maracujazeiro, do abacaxizeiro e do mamoeiro, além de outras fruteiras. Como são atividades que consomem um grande volume de água, torna-se necessária a utilização de ferramentas que maximizem a eficiência do seu uso e minimizem os custos de produção, como forma de garantir a lucratividade desses investimentos, e também causar o menor impacto possível ao meio ambiente.

Considerando a competição internacional na oferta de alimentos devido à economia globalizada, o Brasil necessita, cada vez mais, aumentar nossa produtividade agrícola e reduzir os custos de produção, a fim de se ter condições de competir no mercado nacional e internacional. Deste modo, é de suma importância que se forneça aos produtores rurais, ferramentas que possibilitem as tomadas de decisões técnico-econômicas.

A programação matemática é uma técnica utilizada para resolver determinadas classes de problemas em que se procura alocar recursos limitados a atividades ou decisões diversas, de maneira ótima (Dantas Neto, 1994).

Dentre as ferramentas utilizadas para se atingir esses objetivos, destaca-se a programação matemática, que permite indicar as melhores estratégias de lâmina de água e área cultivada para se obter a maximização da renda, considerando os insumos utilizados.

Esse procedimento permite que seja feita uma análise agro-econômica detalhada, possibilitando indicar padrões de cultivo em áreas irrigadas.

Tendo em vista a importância do planejamento agro-econômico de uma região, o presente estudo teve como objetivo principal criar um modelo matemático baseado em funções de resposta à lâmina de água das culturas do maracujazeiro, cana-de-açúcar, abacaxi e do mamão.

O trabalho foi fundamentado na seguinte hipótese: A programação linear separável é a técnica mais apropriada para resolver problemas de planejamento de áreas irrigadas?

Os objetivos específicos foram:

a) Comparar duas soluções do problema de maximização da função objetivo criada pelo modelo matemático.

b) Obter a renda máxima utilizando o modelo desenvolvido quando da implantação de sistemas irrigados;

c) Determinar os planos ótimos de cultivos calculados pelos modelos, considerando restrições de água e terra.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A Importância da Água e dos Nutrientes na Produção Vegetal

A água é um fator fundamental na produção vegetal. Sua falta ou excesso afeta de maneira decisiva o desenvolvimento das culturas e, devido a isto, seu manejo racional é um imperativo fundamental na maximização da produção agrícola.

Durante seu ciclo de desenvolvimento, qualquer cultura consome um grande volume de água, sendo que cerca de 98% deste volume apenas passa pela planta, perdendo-se posteriormente na atmosfera pelo processo de transpiração. Entretanto, este fluxo de água é, porém, necessário para o desenvolvimento vegetal. Por esse motivo, sua taxa deve ser mantida dentro dos limites ótimos para cada cultura, que além disso, necessita de uma combinação favorável de fatores ambientais como a luz, suporte mecânico, o calor e nutrientes. Com exceção da luz, o solo é capaz de fornecer cada um destes fatores, mas o crescimento vegetal desejável será alcançado mediante uma adequada combinação dos mesmos (Reichardt, 1978).

O solo agrícola é uma importante fonte de nutrientes minerais para as raízes. As culturas necessitam encontrar no solo, sob forma e quantidade adequadas, 14 nutrientes reconhecidos como essenciais aos vegetais. A ausência de qualquer um deles na solução do solo pode se tornar um fator limitante ao desenvolvimento e à produção das plantas. Os nutrientes, além de atender as demandas nutricionais necessárias ao crescimento e desenvolvimento das plantas, participam de atividades fisiológicas relacionadas com a movimentação de água, como por exemplo, a abertura e fechamento dos estômatos presentes nas folhas, necessários para garantir o controle das perdas de água para atmosfera pela transpiração (Filgueira, 2003).

Além da importância fisiológica que a água e os nutrientes desempenham na produção vegetal, suas aplicações no momento oportuno e nas quantidades necessárias, são de fundamental importância para se conseguir maximizar a produtividade e para se obter o rendimento líquido máximo. Portanto, como esse recurso é essencial à existência humana e é considerado escasso e finito, torna-se cada dia mais importante a realização de estudos que visem o planejamento adequado de sua utilização a fim de garantir seu uso sustentável, principalmente nas áreas irrigadas, onde um volume considerável de água é utilizado.

2.2 Função de Produção

Vários fatores referentes ao solo, à planta e à atmosfera interagem entre si, determinando a produtividade das culturas agrícolas. Certamente existe uma relação funcional entre esses fatores e a produção das culturas, características de cada condição ambiental. A resposta das culturas à irrigação pode variar em diferentes tipos de solos, climas e também em decorrência da quantidade e frequência de aplicação de água. O efeito da água na produção pode ainda interagir com fertilizantes e uma série de outros insumos (Frizzone & Andrade Júnior, 2005). O conceito econômico de função de produção, segundo os mesmos autores, é a relação física entre as quantidades utilizadas de certo conjunto de insumos e as quantidades físicas máximas que podem ser obtidas do produto, para uma dada tecnologia conhecida.

Para estabelecer a resposta das culturas à precipitação e/ou irrigação, muitas pesquisas foram realizadas. Segundo Howell et al. (1992), os primeiros relatos datam do final do século XVII, sendo que nos Estados Unidos esses estudos tiveram início no final do século XIX. A partir do início do século XX, os pesquisadores envidaram esforços no estudo das relações

água-productividade e consumo de água pelas culturas. Segundo Vaux & Pruitt (1983) e Howell et al. (1992), os primeiros experimentos foram realizados nos anos de 1910 e 1919.

Desde o início do século XX, muitos pesquisadores relacionaram crescimento de plantas e umidade do solo. Focalizando este tema, Veihmeyer & Hendrickson (1950) apresentaram uma revisão sobre os ensaios de crescimento das plantas em campo e em vasos em função da lâmina de água aplicada. Taylor (1952) observou uma redução linear na produção de alfafa e cana-de-açúcar com o aumento da tensão da água no solo e uma relação curvilínea para a batata. O autor propôs, então, que a integral do estresse de água no solo durante a estação de crescimento seria um bom previsor do crescimento das plantas. Stanhill (1957), após revisar 810 trabalhos de pesquisa, também observou que em 80% dos casos, o crescimento das plantas foi afetado pelas diferenças na quantidade de água disponível no solo. Denmead & Shaw (1962), em estudo realizado com o milho, demonstraram que a demanda evaporativa da atmosfera é o fator determinante das relações entre umidade do solo e evapotranspiração.

De acordo com Frizzone (1998), os objetivos destes primeiros estudos foram determinar o conteúdo mínimo de água no solo ou o seu potencial para o qual se poderia obter a máxima produção. Tais trabalhos constituíram-se na experiência necessária aos estudos atuais sobre as relações água-cultura.

Na agricultura irrigada, o fator água deve ser otimizado possibilitando, sem maiores riscos, aumentar a utilização dos demais insumos de produção e, por consequência, obter maiores produtividades com uma melhor combinação dos insumos empregados. Para tanto, o conhecimento das funções de produção ou superfícies de resposta é fundamental para auxiliar as tomadas de decisão, uma vez que estas funções representam as interações entre os diversos fatores que afetam a produtividade, e escolher as soluções mais condizentes com a realidade regional permitindo, assim, um manejo racional da irrigação e conseqüentemente uma melhor utilização da água (Bernardo, 1998).

O êxito esperado da agricultura irrigada depende, além da água, de muitos outros fatores complementares, dentre os quais destacam-se os fertilizantes, defensivos e herbicidas, sementes de bom potencial genético, maquinaria e implementos agrícolas adequados, facilidade de créditos e comercialização dos produtos, disponibilidade de mão-de-obra durante todo o ciclo da cultura, pesquisa aplicada e assistência técnica contínua e permanente, capacitação e organização dos agricultores (Frizzone, 1998). Segundo o mesmo autor, ao exigir que a função de produção represente o máximo que se pode obter, para um determinado nível tecnológico, com o uso de cada uma combinação de insumos, está se constituindo uma relação funcional entre os insumos e o produto, ou seja, esta definição permite escrever uma função de produção por meio de uma função matemática da forma:

$$Y = Y(U_1, U_2, \dots, U_n) \quad (1)$$

sendo Y a quantidade produzida e U_1, U_2, \dots, U_n os “n” insumos que participam do processo e se transformam em Y . Esta representação simbólica significa que Y é uma função de U_1, U_2, \dots, U_n . Porém, como está escrita, não indica de que modo este processo se desenvolve nem quais são os insumos e o produto considerado, sendo, portanto, necessário fixar alguns parâmetros e variar outros.

Os estudos agro-econômicos, de experimentos utilizando-se funções de produção são bastante difundidos em alguns países. Sua utilização para determinar os níveis ótimos econômicos dos fatores de produção é um dos principais pontos críticos. No Brasil, as poucas pesquisas realizadas até então, se concentram quase que exclusivamente, na determinação das dosagens mais econômicas de fertilizantes. Exemplos disso são os trabalhos de Silva (1978),

utilizando dados de experimentos conduzidos na Zona da Mata de Minas Gerais. O autor determinou a quantidade ótima de fertilizantes para a produção de feijão, nos diferentes níveis de preços, bem como os lucros correspondentes, utilizando os modelos Cobb-Douglas e o quadrático. Concluiu que para o município de Viçosa, MG, as estimativas obtidas a partir da função quadrática são mais reais do que aquelas obtidas pela função Cobb-Douglas, pois são mais coerentes do ponto de vista agrônomo.

Winkler & Sfredo (1979) utilizaram o modelo polinomial quadrático para estimar a produtividade do trigo como função da adubação fosfatada em diferentes unidades de solo do estado de Santa Catarina. Verificaram que as produtividades físicas máximas variaram com a calagem e tipo de solo. Baseadas nestas informações, os autores determinaram as doses de máxima eficiência econômica para a cultura do trigo, e concluíram que foi mais viável o uso do adubo fosfatado sem calcário quando a exploração foi realizada em monocultura.

Thame & Hoffmann (1980), buscando a otimização do uso de fertilizantes em eucalipto nos solos do cerrado do estado de São Paulo, encontraram uma função polinomial quadrática com um coeficiente de determinação de 0,88. Os autores concluíram, no entanto, que o fertilizante potássico por ter apresentado na função o único termo quadrático positivo, fez com que ela não apresentasse pontos de máximo nem de mínimo e sim pontos de sela, indesejáveis para a análise pretendida.

2.2.1 Modelagem das funções de produção

Os modelos matemáticos que melhor se ajustam à relação água-produtividade e que são mais comumente utilizados nas análises econômicas das pesquisas agrícolas são o quadrático, raiz quadrada, Mitscherlich-Spillman e potência $3/2$ (Hexem & Heady, 1978). Entre esses se destaca o modelo quadrático que, na maioria das vezes, melhor representa a estimativa de produção em estudos de agricultura irrigada (Silva, 1992; Oliveira, 1993).

Para melhor representar a resposta ao uso da água, as funções de produção devem envolver a resposta fisiológica e/ou agrônoma das culturas, assim como os princípios econômicos (Vaux & Pruitt, 1983). Segundo os autores, as funções de produção podem ser classificadas em dois grandes grupos: funções fisiológicas e funções empíricas e semi-empíricas. O tipo de formulação necessita ser justificado em termos biológicos, agrônomicos e econômicos (Yaron & Bresler 1983).

Diversos trabalhos têm sido realizados e mostram as diferenças entre os modelos matemáticos utilizados nas análises econômicas das pesquisas agrícolas, como por exemplo o trabalho realizado por Tarsitano & Hoffmann (1985), que ao fazerem a análise econômica do emprego de fertilizantes na cultura do milho para a região dos cerrados, utilizaram os modelos quadráticos, raiz quadrada e o de Mitscherlich. Concluíram que nas doses econômicas de N, P e K, a amplitude foi menor para o modelo raiz quadrada, ou seja, este modelo permitiu obter, neste estudo, estimativas de doses econômicas mais precisas.

Malavolta (1967) utilizando o modelo quadrático e o de Mitscherlich, determinou o nível ótimo econômico do nitrogênio para dez ensaios com milho no Triângulo Mineiro e concluiu que, as doses econômicas estimadas pelo modelo quadrático são superiores àquelas estimadas pela equação de Mitscherlich. Recomenda o autor, no entanto, a utilização do polinômio do segundo grau desde que grupos de ensaios isolados e com diversas repetições sejam empregados.

Como pode ser observado, os modelos quadráticos utilizados para a otimização do uso de fertilizantes, em geral, são os que melhor representam as estimativas de produção, permitindo uma análise que define as doses de máxima eficiência econômica, usando a produtividade máxima ou o lucro máximo.

Independente das culturas instaladas, um planejamento adequado de áreas irrigadas deve efetivamente estar integrado com as informações de clima, de solo e também com as funções de resposta das culturas em relação à lâmina de água aplicada, além de recursos de capital, de trabalho e de tecnologia agrícola, mantendo as condições de umidade e nutrientes no solo favoráveis ao bom desempenho da cultura (Bowman et al., 1991).

2.2.2 Funções de produção água-cultura

A avaliação econômica da irrigação, freqüentemente envolve a quantificação da produtividade em resposta ao total de água aplicada. A caracterização da resposta da cultura à aplicação de água tem sido amplamente conhecida como função de produção água-cultura, que se caracteriza pela relação entre a lâmina de água aplicada durante o ciclo da cultura versus a produtividade comercial. Outra maneira de expressar funções de produção água-cultura é relacionar lâminas aplicadas por estádios de desenvolvimento da cultura, ou evapotranspiração, ou tensão de água no solo versus produtividade (Martins, 1998).

As expressões matemáticas das funções de produção água-cultura normalmente são do tipo linear, potencial ou exponencial, e em geral, é expressa da seguinte forma:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2)$$

em que:

Y = representa a produtividade da cultura; e

X₁, X₂, X_n - representa os fatores que afetam esta produtividade.

Trata-se de uma relação empírica, obtida normalmente por análise de regressão entre a variável dependente (produtividade) e uma ou mais variáveis independentes (entre elas a lâmina de água aplicada), conforme o modelo proposto.

A literatura tem demonstrado que para a função de produção água-cultura, quando se trabalha com lâmina total aplicada, normalmente se usa um modelo polinomial de segundo grau, da forma:

$$Y = a + b.W + c.W^2 \quad (3)$$

em que:

Y – produtividade, em kg ha⁻¹ ou t ha⁻¹;

W - lâmina total de água aplicada, em mm; e

a, b, e c - coeficientes de ajuste.

Pode-se ainda, ao se trabalhar com evapotranspiração (ET), utilizar o modelo linear (polinômio do primeiro grau) da forma:

$$Y = a + b.ET \quad (4)$$

Segundo Martins (1998), alguns autores têm sugerido trabalhar com um mínimo de seis lâminas distintas, distribuídas uniformemente ao longo do ciclo da cultura na obtenção dos dados de campo para se ajustar a função de produção. Além disso, vale lembrar que há diferenças com relação à sensibilidade na variação de umidade por parte das culturas. Para a cana-de-açúcar, por exemplo, é possível quantificar a produtividade em termos de toneladas por hectare (t ha⁻¹), de colmo ou de açúcar, sendo esta última a mais correta, pois ela depende da primeira (tonelada de colmo ha⁻¹) e da concentração de açúcar na cana. Segundo a

literatura, geralmente se consegue o máximo rendimento quando a lâmina aplicada atende de 70 a 80% da evapotranspiração potencial da cultura (ET_{pc}).

Nos casos específicos em que a água e o nitrogênio são os fatores de produção, as informações ainda são escassas. Grande parte dos trabalhos realizados utilizaram modelos polinomiais, como usado por Frizzone (1987), com o intuito de determinar os níveis ótimos econômicos de água e nitrogênio para a cultura do feijoeiro. A função de produção apresentou um coeficiente de determinação de 0,9460, indicando assim um ótimo ajustamento dos fatores à estimativa da produtividade.

Algumas pesquisas também foram realizadas para estudar os efeitos das lâminas de água na produtividade, como os desenvolvidos por Sousa (1997) e por Bassioi et al. (2002). Maciel (2006) estudou os efeitos de diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio, aplicados via fertirrigação na produtividade da goiabeira variedade Paluma, irrigada por microaspersão e também determinou os níveis econômicos de lâmina de água e nível de nitrogênio que proporcionasse a máxima receita .

Tendo em vista a escassez dos recursos ou fatores de produção e como conseqüência seus elevados custos, estudos que visem otimizar economicamente, a utilização desses fatores, são de extrema importância para o desenvolvimento da agricultura brasileira e no caso específico desse estudo para a agricultura do Norte Fluminense .

2.2.3 Análise econômica usando funções de produção água-cultura.

Segundo Martins (1998), os princípios econômicos podem ser aplicados às funções de produção e, com base nesta premissa, os custos de produção podem ser classificados em quatro categorias: os custos fixos, que não dependem da quantidade de água aplicada (preparação do solo e plantio); custos que dependem indiretamente da quantidade de água aplicada (fertilizantes, controle de pragas e doenças); custos diretamente dependente da quantidade de água aplicada (custo da água e da mão de obra para irrigação); custos que dependem diretamente da quantidade produzida (colheita, transporte, manuseio, etc.)

Em termos econômicos, a implantação e a operação de sistemas de irrigação envolvem custos elevados e normalmente a máxima produtividade física não corresponde à maior receita , em virtude da natureza complexa da resposta das culturas à irrigação, variabilidade climática e flutuações das condições econômicas (Algozin et al., 1998). Segundo o autor, para o êxito de uma atividade agrícola, a determinação de uma lâmina de água que proporcione a maior receita é fundamental, e para isso, devem ser utilizados modelos matemáticos que possibilitem determinar, com base nas funções de produção, as melhores estratégias de utilização de água e insumos, de forma a se obter a máxima receita .

Qualquer sistema de exploração agrícola somente será economicamente viável se seus benefícios econômicos forem maiores do que os seus respectivos custos. O lucro da agricultura irrigada (L_w) pode ser obtido pela diferença entre o resultado da multiplicação da produtividade (Y) pelo valor do produto produzido (P_y) e o resultado da multiplicação do preço do fator água (P_w) pela lâmina total aplicada (W), acrescidos dos outros custos da produção (C), ou seja:

$$L_w = Y \cdot P_y - (W \cdot P_w + C) \quad (5)$$

A viabilidade de um sistema de produção dependerá do adequado manejo que se implementará na condução do mesmo, carecendo de análises econômicas dos insumos aplicados e resultados obtidos para que se possa estabelecer um caminho a seguir (Almeida, 2000).

Os estudos ora citados potencializam a viabilidade econômica dos sistemas de produção, baseados em estimativas de mercado e parâmetros econômicos das culturas.

Entretanto, não definem o manejo a ser aplicado para se obter a maximização do retorno financeiro destas, carecendo de análises econômicas de pesquisas aplicadas.

2.3 Fundamentos de Programação Matemática

A programação matemática trata do estudo de problemas de otimização e o desenvolvimento de métodos para resolvê-los. Nos últimos anos esse processo de otimização tem sido utilizado em diversas áreas da ciência. Em função dos avanços computacionais, cada vez mais se tem buscado utilizar as ferramentas de otimização para maximizar lucros e minimizar custos tornando a otimização uma área de pesquisa bastante atraente. Como a maior parte dos problemas de otimização é resolvida por meio de computadores e os problemas gerados são cada vez maiores e de resolução complexa, deve-se procurar algoritmos cada vez mais eficientes para resolvê-los (Jussiane, 2004).

Os problemas de otimização são compostos de três elementos básicos: uma função objetivo que se queira minimizar ou maximizar, um conjunto de incógnitas ou variáveis, que afetam o valor da função objetivo, e um conjunto de restrições, que permitem as variáveis assumirem determinados valores e excluam outros, ou seja, os problemas procuram encontrar valores ótimos para as variáveis a fim de minimizarem ou maximizarem a função objetivo, satisfazendo determinadas restrições (Steffens, 2005).

Problemas que procuram maximizar ou minimizar uma função numérica de uma ou mais variáveis (funções), em que as variáveis estão sujeitas à determinadas restrições, podem ser chamados de problemas de otimização. Muitos desses problemas surgiram nas ciências físicas e na geometria. De acordo com Fritzsche (1978), essas técnicas clássicas de otimização são conhecidas a mais de 150 anos.

Nos últimos 50 anos surgiu uma nova classe de problemas de otimização, muitas vezes chamados de problemas de programação, os quais normalmente não podem ser resolvidos por meio dos métodos clássicos de cálculo. Os problemas de programação normalmente encarregam-se de alocar recursos escassos (como mão-de-obra, máquinas, matéria-prima) na produção de tal forma que os produtos obedeçam a certas especificações técnicas (conteúdo de matérias-primas, utilização de certos equipamentos), observem certas restrições (disponibilidade de tempo de máquina, capacidade de aceitação do mercado consumidor, etc.) e, finalmente, tentem maximizar ou minimizar a função objetivo como lucro e custo.

Em virtude da possível escassez de alguns recursos naturais, como a água por exemplo, nas últimas décadas os problemas de programação têm atraído muito interesse porque surgem na forma de importantes problemas práticos na indústria, no comércio, no governo e na agricultura, tornando o seu uso otimizado cada vez mais importante.

A aplicação de técnicas de otimização orientadas por computador para dimensionamento e operação de sistemas de recursos hídricos, pode ser dividida em duas categorias principais: simulação e modelos matemáticos. A técnica de modelos matemáticos envolve métodos analíticos, e duas destas técnicas freqüentemente utilizadas são a programação dinâmica e a programação linear (Afshar & Marino, 1989).

2.3.1 Programação linear na agricultura irrigada

Quintana & Tovar (1987) definem programação linear como um método matemático que melhor permite selecionar, entre um conjunto de atividades viáveis, as que entre si combinadas em certas proporções asseguram o máximo resultado líquido compatível com dadas disponibilidades de recursos fixos. Para Baltra (1982), os modelos de programação linear nos projetos de irrigação podem ser utilizados nos seguintes tipos de planejamento agrônômico:

- otimização de planos de cultura, podendo-se utilizar como função econômica, a maximização do lucro, a otimização do uso da mão-de-obra, a otimização do uso da água e a otimização do uso das máquinas agrícolas; neste caso, o modelo usa as restrições volume de água disponível, demanda de água pelas culturas, custos de produção, terra disponível, receita e custos de mercado;

- lâmina e intervalos de irrigação;
- previsões meteorológicas; e
- potencial de bacias de captação e balanços hidrológicos.

A programação linear (PL) é uma técnica utilizada para resolver determinadas classes de problemas em que se procura alocar recursos limitados a atividades ou decisões diversas, de maneira ótima (Dantas Neto, 1994). Segundo Schardong (2006), embora tenha sido concebida para representar problemas tipicamente lineares, a PL é amplamente utilizada em planejamento e manejo de recursos hídricos, que possuem uma série de não-linearidades ao serem representados matematicamente.

Para um adequado planejamento da agricultura irrigada, devido à distribuição irregular dos recursos hídricos e a escassez de capital, torna-se necessária a utilização de técnicas de programação matemática, as quais permitem aumentar a lucratividade nas áreas irrigadas.

No planejamento de áreas irrigadas, diversos trabalhos foram realizados utilizando programação linear, como o apresentado por Dantas Neto (1994), que desenvolveu e comparou dois sistemas de equações matemáticas, baseados nas funções de resposta das culturas à água, adaptando-os a modelos de programação linear.

A Secretaria de Recursos Hidráulicos do México propôs um modelo de programação linear para o planejamento da operação do distrito de irrigação de Santo Domingo, Baixa Califórnia. Este modelo apresentou um plano ótimo de culturas que aumentava a receita e reduzia o volume de extração do aquífero de abastecimento. Evia (1975) comenta que 83% dos distritos de irrigação do México adotaram modelos similares.

Frizzone et al. (1994) desenvolveram um modelo de programação linear para simular os níveis das atividades do processo de produção na fazenda Lagoa do Fogão, localizada no município de Guaíra, SP. A função objetivo consistiu em maximizar o lucro da propriedade agrícola, utilizando as culturas de inverno tradicionalmente cultivadas nessa propriedade, sob regime de irrigação.

Dantas Neto et al. (1997) desenvolveram um estudo com objetivo de determinar o padrão de cultivo do Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho, utilizando um modelo de programação linear. O modelo estudado foi uma formulação-padrão de programação linear, cuja função-objetivo consistiu em maximizar a receita do projeto, utilizando-se as culturas mais cultivadas nessa área, sob regime de irrigação. As restrições à função-objetivo foram volume de água mensal, volume de água anual, terra e mercado. Carvalho et al. (2000) selecionaram as culturas e os meses de plantio que proporcionaram a maximização da renda do agricultor e da utilização de recursos hídricos no Perímetro Irrigado do Gorutuba – MG, utilizando um modelo de programação linear cuja função-objetivo visou maximizar as receitas mensais em função da área cultivada com as culturas normalmente utilizadas na região, tendo como restrição a área irrigável do lote e a quantidade de água disponível.

2.3.2 Programação linear separável

Na agricultura irrigada, freqüentemente se defronta com funções de produção não lineares, mostrando retornos decrescentes ao fator variável. Essas funções não lineares podem ser tratadas por aproximações lineares e a otimização pode ser feita utilizando-se a técnica de programação separável. Essa abordagem permite transformar um problema de programação não linear em um problema de programação linear, possível de ser solucionado pelo Método

Simplex (Frizzone & Andrade Junior, 2005). Em programação separável, uma função não linear é aproximada por meio de um conjunto de segmentos de retas, não se restringindo as funções do segundo grau, como em programação quadrática, nem limitando as restrições lineares. O desenvolvimento desse tipo de programação tem início por um equacionamento cujo esquema permite aproximar, por partes, funções não lineares de funções lineares, conforme citado por (Frizzone & Andrade Junior, 2005) e ilustrado na Figura 1.

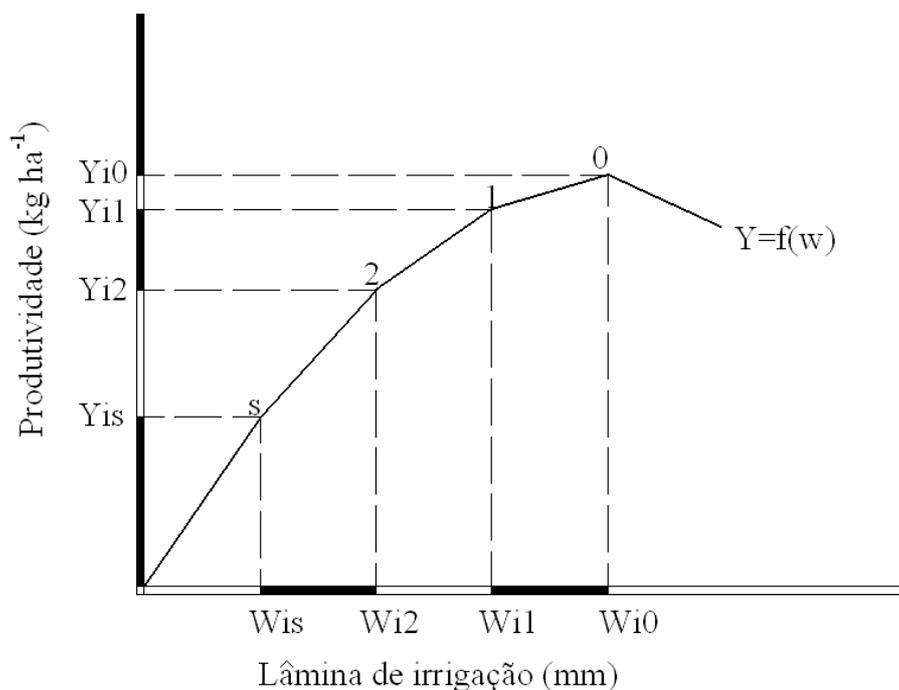


Figura 1. Representação esquemática de uma função de resposta linearizada por partes (adaptado de Frizzone et al. 2005).

A programação separável é brevemente citada em Loucks et al. (1981), Braga (1987) e Labadie (2004) e sua aplicabilidade a sistemas de recursos hídricos é discutida. Existem poucas aplicações de programação separável em sistemas de recursos hídricos confirmando a observação de Marins (1996) e Marins et al. (1997) que notaram a pouca importância dada à metodologia.

Crawley e Dandy (1993) aplicaram com sucesso a técnica de programação separável e linearização da função de custo de bombeamento ao sistema de abastecimento de Adelaide, Austrália. Os autores verificaram uma economia de 5 a 10% na energia elétrica consumida após a otimização realizada. No Brasil, alguns estudos foram realizados utilizando programação linear separável aplicada a otimização de projetos hidroagrícolas, podendo citar como exemplo o trabalho de Santana (1998), que utilizou a programação separável e linearização da função objetivo aplicada ao dimensionamento de um sistema de recursos hídricos de grande porte no nordeste brasileiro.

Frizzone et al. (1997) desenvolveram um modelo de programação linear separável, considerando um conjunto de fatores técnicos que influenciavam na rentabilidade de um projeto de irrigação. O modelo teve como função objetivo a maximização da receita líquida e foi assumido que as funções de resposta das culturas à irrigação disponíveis representavam adequadamente as relações água-produção. O modelo de programação linear separável foi equacionado genericamente de forma a indicar o uso racional do recurso hídrico num projeto de irrigação e foram desenvolvidas equações específicas e aplicadas a um caso específico no Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho (PSNQ), localizado em Petrolina – PE.

Dantas Neto et. al (1994) desenvolveram um sistema de equações matemáticas, baseado na função de resposta das culturas à água, adaptando-o a um modelo de programação linear separável. Com isso, os autores conseguiram quantificar as variáveis ou as atividades do processo de produção que otimizaram a demanda de água e o padrão de cultivo do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina, PE, de forma a maximizar o lucro da área irrigada pelos colonos.

O uso de programação linear exige o conhecimento de todos os fatores que possam influenciar o funcionamento do sistema a ser otimizado. No caso de projetos de irrigação, Albuquerque Filho (1986) comenta que os seguintes fatores estão entre os que mais comumente afetam a operação e os custos dos sistemas, influenciando diretamente nos seus benefícios: disponibilidade de recursos naturais (solo / água) adequados; disponibilidade de capital; políticas operacionais adequadas (quando e quanto irrigar); uso de insumo (fertilizantes e defensivos); disponibilidade de mão-de-obra; disponibilidade de equipamentos apropriados; comercialização da produção (armazenamento, preços etc.); energia e custo compatível; restrições legais (concessões) e outros.

2.3.3 Programação não linear e o método Lagrangiano Aumentado

Segundo Jussiane (2004), o método Lagrangiano Aumentado na sua forma original, foi concebido para resolver problemas com restrições de igualdade e posteriormente, generalizados para problemas com restrições de desigualdade. De acordo com o mesmo autor, em geral o método de Lagrangiano Aumentado é usado para resolver problemas de programação não linear com restrições e apresentam metodologia relativamente simples. Consiste em resolver o problema restrito através de uma seqüência de subproblemas irrestritos. Os processos são iterativos, sendo que cada iteração consiste em resolver um subproblema irrestrito, que pode ser resolvido por qualquer método de minimização irrestrita e atualização dos parâmetros (multiplicadores e parâmetro de penalização). Os subproblemas irrestritos resolvidos geram uma seqüência, cujo nome é primal. Uma outra seqüência gerada pelo método é a de multiplicadores, definida como uma seqüência dual. Assim, são geradas duas seqüências: a primal (x_k) e a dual (μ_k).

Uma das vantagens de utilizar o método de Lagrangiano Aumentado é que a sua convergência não exige nenhuma restrição quanto ao parâmetro de penalidade, podendo diminuir, aumentar ou manter-se constante. Ao contrário, nos métodos de penalidades clássicos isso não ocorre, exigindo restrições sobre o parâmetro de penalidade para obter convergência. Os métodos de Lagrangiano Aumentado têm por objetivo conciliar os aspectos de mal-condicionamento e evitar perda de estrutura de minimização proveniente do método de penalização (Jussiane, 2004).

Em qualquer área de aplicação, a otimização procura converter um problema complexo em outro, cuja solução é conhecida. Com este intuito, o método Lagrangiano Aumentado aplica o procedimento de “penalização”, em que o risco de não satisfação ou a não satisfação de uma restrição é sancionado com um acréscimo na função objetivo, de modo que a função que define a restrição é eliminada e substituída por um outro termo introduzido na função objetivo (Steffens, 2005). Para o mesmo autor, este método tem por objetivo conciliar dois aspectos: contornar o mal condicionamento proveniente do parâmetro de penalização e evitar a perda de estrutura de minimização original.

Para Mendonça (2006), os métodos tipo Lagrangiano Aumentado, em linhas gerais, consiste na eliminação de algumas ou todas as restrições por meio da adição à função objetivo, de uma função de penalização que depende das restrições, do vetor de multiplicadores de Lagrange e do parâmetro de penalização. Tais métodos resolvem uma seqüência de subproblemas com restrições simples, em que os vetores de multiplicadores de

Lagrange e os parâmetros de penalização são fixos durante a resolução dos subproblemas, e atualizados a cada iteração externa.

No Brasil, este método de otimização tem sido aplicado no desenvolvimento de alguns trabalhos na área de energia. No entanto, praticamente não existe na literatura trabalhos desenvolvidos aplicando os métodos de Lagrangiano Aumentado na resolução de problemas não lineares de otimização da renda em projetos hidroagrícolas, podendo ser uma alternativa interessante aos métodos tradicionais, como por exemplo, o método de programação linear separável.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e Características da Área de Estudo

O estudo foi desenvolvido considerando uma área de aproximadamente 2500 ha, pertencente ao Projeto de Irrigação e Drenagem da Cana-de-açúcar na Região Norte-Fluminense (PROJIR), concluído em 1982 pelo então Instituto do Açúcar e do Alcool - IAA/PLANALSUCAR, sendo utilizadas as bases cartográfica e pedológica (Figura 2).

A área faz parte dos tabuleiros costeiros e apresenta relevo de topografia plana em sua maioria, com colinas suave onduladas muito características nesse ambiente. As principais classes de solos que predominam nesse ambiente são os Neossolos, Cambissolos e Latossolos, os quais apresentam argila de atividade variada e textura variando de arenosa a muito argilosa. Os Neossolos Flúvicos que ocorrem nesse ambiente, geralmente apresentam boa fertilidade natural.

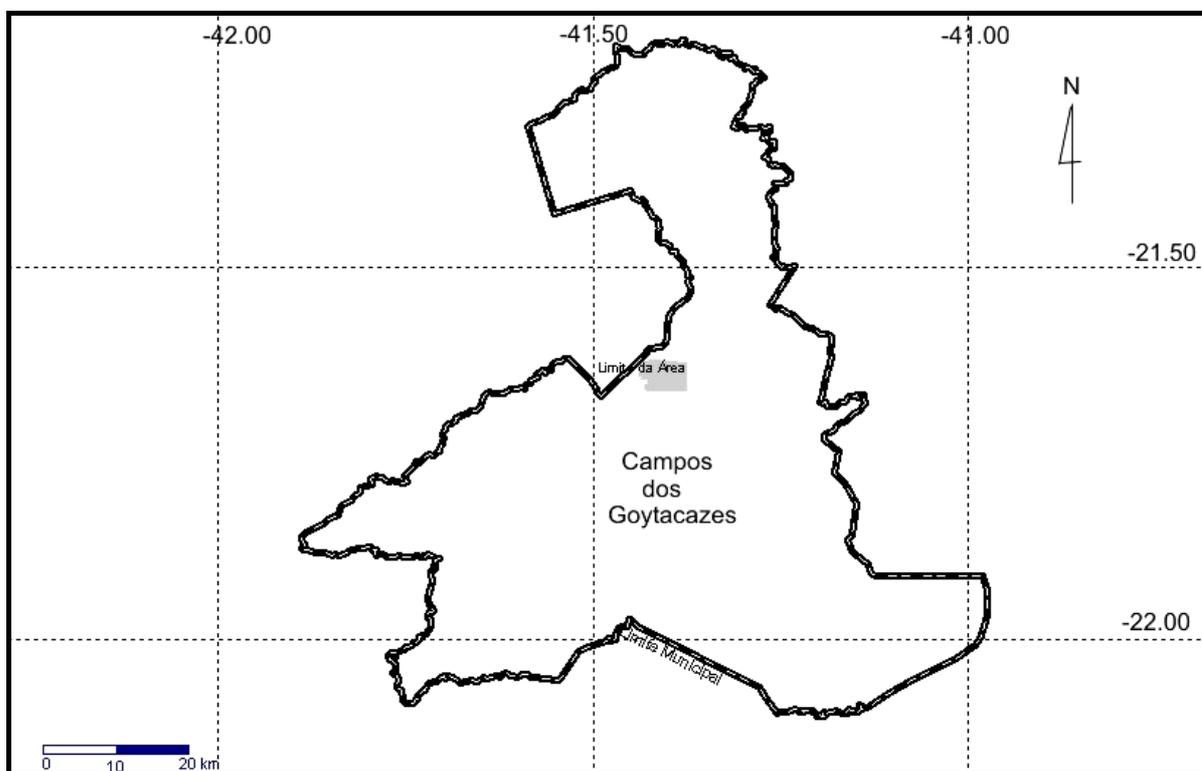


Figura 2. Localização da área de estudo no município de Campos dos Goytacazes - RJ.

3.2 Instrumento Analítico

As técnicas analíticas de otimização utilizadas neste trabalho foram a programação linear separável e a programação não linear utilizando o método de Lagrangiano Aumentado. A primeira, que é um procedimento amplamente empregado para a solução de problemas referentes à otimização do uso dos recursos em agricultura, consiste em linearizar por partes um problema de programação não linear (PPNL), sendo tratado como um problema de programação linear separável, possibilitando a utilização do método simplex para a sua solução (McMillan Junior, 1970). A segunda técnica, utilizando o método Lagrangiano

Aumentado, apesar de ser bastante conhecida é pouco utilizada em problemas de otimização agrícola, sendo muito empregado na maximização da função objetivo de problemas da área de energia (Steffens, 2005).

3.3 Formulação do Modelo Matemático Utilizando Funções de Produção das Culturas à Água

Com o objetivo de determinar o padrão de cultivo que proporcione a renda líquida máxima de quatro culturas irrigadas foi criado um modelo matemático utilizando funções de produção das culturas à água. A função objetivo foi especificada como sendo a maximização da renda líquida decorrente dos cultivos irrigados das culturas do maracujá, cana-de-açúcar, abacaxi, e mamão, sujeitas às restrições na disponibilidade de água e área para cultivo. Segundo Frizzone & Andrade Júnior (2005), o modelo geral pode ser apresentado conforme descrito abaixo:

$$\text{Maximizar RL} = \sum_{i=1}^n (P_i Y_i(W_i) - CP_i - C_{ai} W_i) X_i \quad (6)$$

em que:

- RL = receita líquida decorrente do cultivo de n culturas, R\$;
- i = número inteiro representando a cultura;
- n = número de culturas consideradas;
- P_i = preço médio de venda do produto da cultura i, R\$ t⁻¹;
- Y_i(W_i) = produtividade da cultura i em função da lâmina de irrigação, t ha⁻¹;
- X_i = área cultivada com a cultura i, ha;
- CP_i = custo de produção (sem considerar a água), por unidade de área, para a cultura i, R\$ ha⁻¹;
- C_{ai} = custo da água de irrigação para a cultura i, para todo o ciclo; R\$. mm⁻¹ ha⁻¹; e
- W_i = lâmina de irrigação total do ciclo aplicada à cultura i, mm.ha⁻¹;

As restrições a que está sujeita a função objetivo estão descritas abaixo:

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n W_i X_i \leq W_{\text{supciclo}} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n w_{ij} X_i \leq W_{\text{supj}} \quad j = 1, \dots, 27; \quad (8)$$

$$X_i \leq A_{\text{supi}} \quad i = 1, \dots, 4; \quad (9)$$

$$W_{\text{supciclo}} = \sum_{j=1}^m W_{\text{supj}} \quad (10)$$

em que:

- j = número inteiro representando o mês de cultivo;
- W_{supj} = disponibilidade máxima de água no mês j, m³;
- w_{ij} = Necessidade hídrica da cultura i no mês j, m³ ha⁻¹ mês⁻¹;

A_{supi} = Área máxima a ser plantada da cultura i , ha; e
 $W_{supciclo}$ = Disponibilidade máxima de água durante o ciclo, m^3 ;

A disponibilidade máxima de água no mês j (W_{supj}) foi calculada considerando a vazão possível de ser outorgada na seção do rio Muriaé localizada na área de estudo. Considerando o critério de outorga sugerido pela ANA para rios de domínio da União e com base na caracterização hidrológica da bacia realizada previamente, foi encontrado um valor de vazão máximo outorgável de $15,83 m^3 s^{-1}$. O valor de W_{supj} foi então estimado em $17096400 m^3 m\acute{e}s^{-1}$, considerando um bombeamento médio de $10 h.d^{-1}$.

A restrição de área máxima cultivada com cada cultura i (A_{supi}) foi estimada com base na área máxima cultivada com cada cultura no município de Campos dos Goytacazes, em função das características de solo. Para a estimativa dos valores máximos foram consideradas as áreas das classes de solo semelhantes àquelas utilizadas para a obtenção das funções de produção das culturas na área de estudo. Portanto, os valores utilizados para A_{supj} foram de $756,73$ ha para a cultura do maracujá; $1191,0$ ha para a cana-de-açúcar; $158,5$ ha para o abacaxi e $319,45$ ha para a cultura do mamão.

O custo da água (Ca_i) na função objetivo foi calculado com base na metodologia de cobrança utilizada pelo CEIVAP (2003) e descrita abaixo de forma resumida:

$$Ca_i = Q_{cap} \cdot [K_0 + K_1 + (1 - K_1) \cdot (1 - K_2 \cdot K_3)] \cdot PPU_{irrigação} \quad (11)$$

Adotando-se os valores:

$K_0 = 0,4$ expressa o multiplicador de preço unitário para captação;
 $K_1 = 1$ índice da parte do volume captado que não retorna ao manancial;
 $K_2 = 0$ corresponde à relação entre a vazão efluente tratada e a vazão efluente bruta;
 $K_3 = 0$ corresponde ao DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio);
 $PPU_{irrigação} = 0,0005$ (R\$ m^{-3});
 Q_{cap} = volume de água captado durante um mês ($m^3 m\acute{e}s^{-1}$);
 Substituindo os índices K_0, K_1, K_2, K_3 e $PPU_{irrigação}$ na equação (9), tem-se:
 $Ca_i = (0,0007)Q_{cap}$ (em R\$ $m\acute{e}s^{-1}$)

Considerando Q_{cap} igual a w_{ij} (mm), o custo da água da cultura i no mês j , pode ser calculado da seguinte maneira:

$$Ca_i = 10(0,0007) \sum_{j=1}^m w_{ij} \quad (12)$$

$$Ca_i = 0,007 \sum_{j=1}^m w_{ij}, \text{ expresso em R\$ } m^{-3} ha^{-1}.$$

em que:

10 = fator de conversão de lâmina de água (mm) para $m^3 ha^{-1}$;

O modelo formulado representa um problema de programação não linear (PPNL), uma vez que a função objetivo contém uma função não linear [$Y_i(W)$].

3.3.1 Parâmetros utilizados na formulação do modelo matemático

Para a formulação do modelo utilizado, os custos de produção (CP_i) das culturas e o preço de venda dos produtos (P_i), foram obtidos por meio de consultas de mercado na região. As Tabelas 1, 2, e 3 do Anexo, apresentam de forma detalhada as informações referentes ao custo do processo produtivo para as culturas da cana-de-açúcar, abacaxi, e maracujá. Para a cultura do mamoeiro foram utilizados os preços corrigidos, obtidos por Almeida (2000). A

Tabela 1 mostra de forma resumida os custos de produção e venda dos produtos utilizados no estudo.

Tabela 1. Custos de produção e preço de venda dos produtos para as culturas consideradas

Cultura	Custo de produção (R\$ ha⁻¹)	Preço do produto (R\$ t⁻¹)
Cana-de-açúcar	8171,37	24,50
Abacaxi	8571,17	230,00
Mamão	10191,60	320,00
Maracujá	11784,20	340,00

3.3.2 Funções de resposta das culturas à água

As funções de resposta para as culturas da cana-de-açúcar (Souza, 1997), abacaxi (Rego Filho, 2002), maracujá (Martins, 1998) e mamão (Almeida, 2000) utilizadas no modelo desenvolvido, foram obtidas de experimentos de campo, para condições semelhantes à área utilizada nesse estudo. As funções estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Funções de resposta das culturas à água

Cultura	Equação	r²
Cana-de-açúcar	$Y = -500,84 + 0,837.W - 0,00027.W^2$	0,89
Abacaxizeiro	$Y = -506,687 + 0,905709.W - 0,000370675.W^2$	0,98
Maracujazeiro	$Y = 2,3931 + 0,049058.W - 0,0000183.W^2$	0,68
Mamoeiro	$Y = -88,13 + 0,098092.W - 0,00001725.W^2$	0,92

Y = Produtividade (t.ha⁻¹); W = Lâmina de água total do ciclo (mm)

3.3.3 Requerimento mensal de água

Para o cálculo da demanda de irrigação, foram utilizados os dados climáticos de uma série histórica de 18 anos (1961 a 1978), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), referentes à estação 83698 localizada em Campos dos Goytacazes. Os arquivos de dados foram organizados utilizando o programa computacional DEMANDA, desenvolvido por Carvalho et al. (1999) e assim foram estimadas as lâminas de precipitação dependente (Pd) e de evapotranspiração de referência (ET_o). Nesse programa a estimativa de ET_o foi realizada utilizando a equação de Penman – Monteith (Smith, 1991) e a Pd estimada com base na distribuição gama de probabilidade (Carvalho, 1998).

O desenvolvimento do modelo matemático teve como base as funções de produção das culturas consideradas, desenvolvidas utilizando a lâmina total do ciclo da cultura. A fim de se ajustar as lâminas totais à escala mensal utilizada pelo modelo matemático, calculou-se um fator F que ajustou a lâmina dada pela função de produção com as necessidades mensais de água de cada cultura, conforme equação abaixo:

$$F(\%) = \frac{\text{Lâmina Mensal}}{\text{Lâmina Total}} \times 100 \quad (11)$$

Para efeito de análise os meses de cultivo foram contados continuamente, totalizando 27 meses, sendo que o mês 1 correspondeu ao mês de julho, conforme Tabela 3.

Tabela 3. Calendário de cultivo das culturas na área estudada.

Cultura	Mês																										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Cana	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X											
Abacaxi										X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Maracujá						X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
Mamão		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X									

O volume de água utilizado pelas plantas é função do clima e de características intrínsecas de cada uma das culturas estudadas. Para esse estudo, as Tabelas de 4 a 7, apresentam os valores de precipitação dependente (Pd), evapotranspiração de referência (ET_o), a evapotranspiração potencial da cultura (ET_c), os coeficientes de cultivo (K_c), e o volume de água (w_{ij}) necessário a cada uma das culturas, calculadas com base nos dados climáticos da região, que foram utilizados no cálculo dos custos de água. Foram adotados os mesmos valores de (K_c) utilizados na obtenção das funções de produção.

A eficiência dos sistemas de irrigação, foi a mesma utilizada na obtenção das funções de produção, sendo 80% para as culturas do abacaxi e cana de açúcar e 85% para as culturas do maracujá e mamão.

Tabela 4. Precipitação dependente, ETo, ETc, Kc e volume de água necessário (w_{ij}) para a cultura da cana-de-açúcar em cada mês estudado.

Mês	Pd (mm)	ETo (mm)	Kc	ETc (mm)	ETc-Pd (mm)	w_{ij} ($m^3 ha^{-1}mês^{-1}$)
1	24,8	67,6	0,65	43,9	19,14	239,25
2	11,4	90,2	0,85	76,7	65,27	815,88
3	22,0	99,2	1,02	101,2	79,18	989,80
4	37,2	108,3	1,10	119,1	81,93	1024,13
5	60,0	118,2	1,15	135,9	75,93	949,13
6	59,4	135,7	1,15	156,1	96,66	1208,19
7	58,6	150,9	1,15	173,5	114,94	1436,69
8	32,4	135,0	1,15	155,3	122,85	1535,63
9	29,2	131,8	1,15	151,6	122,37	1529,63
10	31,0	96,6	1,15	111,1	80,09	1001,13
11	14,9	77,1	1,15	88,7	73,77	922,06
12	9,5	63,3	0,85	53,8	44,31	553,81
13	24,8	67,6	0,65	43,9	19,14	239,25
14	11,4	90,2	0,60	54,1	42,72	534,00
15	22,0	99,2	0,85	84,3	62,32	779,00
16	37,2	108,3	1,02	110,5	73,27	915,83

Tabela 5. Precipitação dependente, ETo, ETc, Kc e volume de água necessário (w_{ij}) para a cultura do abacaxizeiro em cada mês estudado.

Mês	Pd (mm)	ETo (mm)	Kc	ETc (mm)	ETc-Pd (mm)	w_{ij} ($m^3 ha^{-1}mês^{-1}$)
10	30,9	96,6	0,7	67,6	36,6	457,75
11	14,9	77,1	0,7	54,0	39,1	488,38
12	9,5	63,3	0,7	44,3	34,8	435,13
13	24,8	67,6	0,7	47,3	22,5	281,50
14	11,4	90,2	0,7	63,1	51,7	646,75
15	22,0	99,2	0,7	69,4	47,4	593,00
16	37,2	108,3	0,7	75,8	38,6	482,63
17	60,0	118,2	0,7	82,7	22,7	284,25
18	59,4	135,7	0,7	95,0	35,6	444,88
19	58,6	150,9	0,7	105,6	47,0	587,88
20	32,4	135,0	0,7	94,5	62,1	776,25
21	29,2	131,8	0,7	92,3	63,1	788,25
22	31,0	96,6	0,7	67,6	36,6	457,75
23	14,9	77,1	0,7	54,0	39,1	488,38
24	9,5	63,3	0,7	44,3	34,8	435,13
25	24,8	67,6	0,7	47,3	22,5	281,50
26	11,4	90,2	0,7	63,1	51,7	646,75
27	22,0	99,2	0,7	69,4	47,4	593,00

Tabela 6. Precipitação dependente, ETo, ETc, Kc e volume de água necessário (w_{ij}) para a cultura do maracujazeiro em cada mês estudado.

Mês	Pd (mm)	ETo (mm)	Kc	ETc (mm)	ETc-Pd (mm/mês)	w_{ij} ($m^3 ha^{-1}mês^{-1}$)
6	59,4	135,7	0,4	54,28	-5,12	0,0
7	58,6	136,3	0,4	54,52	-4,08	0,0
8	32,4	149,5	0,6	89,68	57,28	673,9
9	29,2	127,5	0,6	76,53	47,33	556,8
10	31,0	99,8	0,75	74,87	43,87	516,1
11	14,9	74,6	0,75	55,96	41,06	483,1
12	9,5	65,4	0,75	49,06	39,56	465,4
13	24,8	65,4	0,75	49,06	24,26	285,5
14	11,4	90,2	0,75	67,65	56,25	661,8
15	22,0	30,0	0,75	22,50	0,50	5,9
16	37,2	31,0	0,75	23,25	-13,95	0,0
17	60,0	118,2	0,75	88,65	28,65	337,1
18	59,4	135,7	0,75	101,78	42,38	498,5
19	58,6	150,9	0,75	113,18	54,58	642,1
20	32,4	135,0	0,75	101,25	68,85	810,0
21	29,2	131,8	0,75	98,85	69,65	819,4
22	31,0	96,6	0,75	72,45	41,45	487,6
23	14,9	77,1	0,75	57,83	42,93	505,0
24	9,5	63,3	0,75	47,48	37,98	446,8

Tabela 7. Precipitação dependente, ETo, ETc, Kc e volume de água necessário (w_{ij}) para a cultura do mamoeiro em cada mês estudado.

Mês	Pd (mm)	ETo (mm)	Kc	ETc (mm)	ETc-Pd (mm)	w_{ij} ($m^3 ha^{-1}mês^{-1}$)
2	11,4	89,9	1,15	103,39	91,99	1082,20
3	22,0	99,0	1,15	113,85	91,85	1080,60
4	37,2	108,3	1,15	124,55	87,35	1027,6
5	60,0	118,2	1,15	135,93	75,93	893,3
6	59,4	135,7	1,15	156,06	96,66	1137,1
7	58,6	150,9	1,1	165,99	107,39	1263,4
8	32,4	135,0	1,1	148,50	116,10	1365,9
9	29,2	131,8	1,1	144,98	115,78	1362,1
10	31,0	96,6	1,1	106,26	75,26	885,4
11	14,9	77,1	1,1	84,81	69,91	822,5
12	9,5	63,3	1,1	69,63	60,13	0,0
13	24,8	68,2	1,1	75,02	50,22	590,8
14	11,4	89,9	1,1	98,89	87,49	1029,3
15	22,0	99,2	0,55	54,56	32,56	383,1
16	37,2	108,3	0,55	59,57	22,37	263,1
17	60,0	118,2	0,55	65,01	5,01	58,9
18	59,4	135,7	0,55	74,64	15,24	179,2

3.4 Solução Matemática do Problema

3.4.1 Solução utilizando programação linear separável

Na solução do modelo utilizando programação separável foi utilizada a técnica de linearização por partes, conforme apresentado na Figura 1. A função de resposta de cada cultura estudada foi dividida em k segmentos lineares, em que k é um inteiro (1, 2, ..., s).

Observa-se na Figura 1 que ao se reduzir a lâmina de irrigação da cultura i de W_{i0} para W_{i1} , isto é, ΔW_{i1} , implica numa redução da produtividade de Y_{i0} para Y_{i1} , ou seja, ΔY_{i1} ; uma redução de W_{i1} para W_{i2} (ΔW_{i2}) resulta em Y_{i1} para Y_{i2} (ΔY_{i2}) e assim sucessivamente. Generalizando, uma redução na lâmina de irrigação de $W_{i\ k-1}$ para W_{ik} (ΔW_{ik}) resulta numa redução na produtividade de $Y_{i\ k-1}$ para Y_{ik} (ΔY_{ik}).

Na função de resposta (Figura 1) são identificados dois pontos de referência:

- a) (Y_{i0}, W_{i0}) , que representam a produtividade máxima e a correspondente lâmina de irrigação.
- b) (Y_{is}, W_{is}) , que representam a produtividade mínima e a correspondente lâmina de irrigação.

Utilizando essa metodologia foram selecionadas as áreas e culturas que proporcionaram o melhor padrão de cultivo que permitiu a obtenção da renda maximizada, para vários cenários criados.

3.4.2 Solução utilizando Lagrangiano Aumentado.

Segundo Martinez (2006), o problema de Programação Não-Linear (PPNL) consiste em:

$$\text{Minimizar } f(x)$$

sujeita a $h_i(x) = 0$, $i = 1, \dots, m$, $g_i(x) \leq 0$, $i = 1, \dots, p$, $x \in \Omega$, em que Ω é um subconjunto de \mathcal{R}^n , geralmente simples e que muitas vezes é o próprio \mathcal{R}^n e, freqüentemente, é um paralelepípedo n -dimensional (ou caixa). As funções f , h_i , g_i são contínuas e, em geral, deriváveis. Este problema tem muitas aplicações práticas e existem muitos métodos para resolvê-lo. O Método de Lagrangiano Aumentado é uma versão moderna de uma das idéias mais antigas sobre como lidar com esse tipo de problema. Tal idéia consiste em eliminar as restrições $h_i(x) = 0$ e $g_i(x) \leq 0$, incluindo estas restrições na função objetivo de maneira que o problema assim transformado tenha soluções iguais ou parecidas às do problema original. Dado um parâmetro de penalidade $\rho > 0$, a função que denominamos Lagrangiano Aumentado pode ser assim definida:

$$L\rho(x, \lambda, \mu) = f(x) + \frac{\rho}{2} \left\{ \sum_{i=1}^m \left[h_i(x) + \frac{\lambda_i}{\rho} \right]^2 + \sum_{i=1}^p \left[\text{MAX}\left(0, g_i(x) + \frac{\mu_i}{\rho}\right) \right]^2 \right\} \quad (12)$$

Os parâmetros $\lambda_i \in \mathcal{R}$ e $\mu_i \leq 0$ são chamados de multiplicadores. Aqui definimos L com um único parâmetro de penalidade ρ , embora, às vezes, pode-se definir um penalizador diferente ρ_i para cada restrição. Quando se inicia a execução do Método de Lagrangiano Aumentado, os multiplicadores iniciais e o penalizador são dados, de maneira que os passos fundamentais do método são:

- a. Minimizar $L\rho(x, \lambda, \mu)$ sujeita a $x \in \Omega$.

- b. Decidir se o ponto obtido no primeiro passo pode ser aceito como solução do problema original. Em caso afirmativo, parar a execução do algoritmo.
- c. De acordo com os resultados dos passos anteriores, atualizar os multiplicadores e parâmetro de penalidade.
- d. Voltar ao primeiro passo.

Os métodos de Lagrangiano Aumentado seguem, quase sempre, o esquema acima. Utilizando essa metodologia foram selecionadas as áreas e culturas que proporcionaram o melhor padrão de cultivo que permitiu a obtenção da renda maximizada, para vários cenários criados.

Visando maximizar a função objetivo do modelo geral aqui proposto, utilizando o método Lagrangiano Aumentado, considerou-se $f(x)$ como $-RL$. O modelo geral utilizando essa metodologia pode ser apresentado da seguinte forma:

$$\min f(x) \tag{13}$$

$$\text{s.a } g(X) \leq 0$$

$$g(x) = \sum_{i=1}^4 (W_i X_i) - W_{\text{sup ciclo}} \tag{14}$$

$$\sum_{i=1}^4 (F_{ij} W_i X_i) - W_{\text{sup } j} \quad j = 1 \dots 27; \quad X = (W_1, \dots, W_n, X_1, \dots, X_n) \tag{15}$$

3.5 Tratamento Computacional do Problema

Visando resolver o problema proposto e com base nos dados considerados foi implementada uma rotina computacional utilizando-se uma linguagem de programação do ambiente MAT LAB, que permitiu a maximização da renda na produção agrícola, em que se procurou maximizar a função objetivo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Maximização da Renda por Cultura

Como análise preliminar foi realizada a otimização de cada cultura isoladamente com objetivo de conhecer o comportamento da renda de cada uma delas com base nos seus índices econômicos e na lâmina de água aplicada. Na Tabela 8 estão apresentados os resultados obtidos, considerando uma análise para um período de 2 anos.

Tabela 8. Receita máxima de cada cultura em função da lâmina ótima aplicada.

Cultura	Lâmina (mm)	Produtividade máxima (t ha ⁻¹)	Renda (R\$ ha ⁻¹)
Maracujá	1340,4	35,27	198,67
Cana-de-açúcar	1550,0	147,83	- 4560,30
Abacaxi	1221,7	46,57	2129,00
Mamão	2882,4	53,105	6781,90

Os resultados apresentados na Tabela 8 mostram de forma clara que as culturas do mamão e do abacaxi apresentaram uma renda muito superior as demais. Quanto à cultura do mamoeiro, pode ser observado que apesar de apresentar maior rentabilidade, é a cultura que necessita a maior lâmina de água comparada com as demais. A cultura do abacaxi foi a que apresentou a maior produtividade e a menor lâmina de água aplicada, comprovando sua alta eficiência na produção, quanto ao uso da água. Esse resultado pode estar associado ao fato do seu metabolismo fisiológico ser do tipo CAM (Crassuláceas Metabolism Acid). Nesse tipo de planta, a abertura dos estômatos necessária à absorção de CO₂ ocorre durante a noite quando o déficit de pressão de vapor para atmosfera é menor, minimizando as perdas de água e conseqüentemente melhorando a sua eficiência. A cultura da cana-de-açúcar foi a que apresentou o pior desempenho com valores de renda negativo, devido principalmente à baixa produtividade e ao baixo valor de venda do produto, vale lembrar também que os valores encontrados, foram para um período de análise de 2 anos conforme Tabela 8. A cultura do maracujá apresentou o segundo pior desempenho devido ao maior custo de produção e menor produtividade entre todas as culturas consideradas.

4.2 Maximização da Renda Utilizando Programação Linear Separável

Utilizando-se o algoritmo criado foram feitas simulações para vários cenários:

- cenário 1: considerando irrigação suplementar e disponibilidade hídrica de 17.096.400 m³ mês⁻¹;
- cenário 2: considerando irrigação total e disponibilidade hídrica de 17.096.400 m³ mês⁻¹;
- cenário 3: considerando irrigação suplementar e restringindo a disponibilidade hídrica para 1.000.000 m³ mês⁻¹; e

- cenário 4: considerando irrigação total e restringindo a disponibilidade hídrica para 1.000.000 m³ mês⁻¹.

A Tabela 9 mostra os resultados obtidos considerando os dados adotados e para os vários cenários criados.

Tabela 9. Receita maximizada (RL) para as culturas do maracujá (mar), cana-de-açúcar (cana), abacaxi (abac.) e mamão (Mam.), considerando a metodologia da programação separável

Cenário	Área (ha)				Lâmina (mm)			RL (R\$)	
	Mar	Cana	Abac.	Mam.	Mar.	Cana	Abac.		Mam.
1	756,73	-	158,5	319,45	1340,4	-	1221,7	2882,4	2654800
2	756,73	-	158,5	319,45	1340,4	-	1221,7	2882,4	2654800
3	251,25	-	158,5	319,45	1340,4	-	1221,7	2882,4	2554300
4	251,25	-	158,5	319,45	1340,4	-	1221,7	2882,4	2554300

Os resultados apresentados na Tabela 9 revelaram que não houve variação na renda quando foi realizada a otimização considerando os cenários 1 e 2, e 3 e 4. Este fato ocorreu provavelmente em virtude do baixo valor da água para uso em irrigação adotado pelo CEIVAP. Comparando os cenários 1 e 3 e os cenários 2 e 4, podem ser observadas variações nos valores de renda simulada, indicando que ao limitar o volume de água disponível de 17.096.400 m³ mês⁻¹ para 1.000.000 m³ mês⁻¹, a renda líquida obtida foi inferior em virtude da diminuição na área plantada com a cultura do maracujá. Nesta simulação, a menor disponibilidade de água fez com que o modelo sugerisse a ocupação de uma menor área cultivada com esta cultura, comprovando a sua baixa eficiência econômica apresentada na análise feita no item 4.1.

Confirmando também a análise anterior, a cultura da cana-de-açúcar, comparativamente às demais, foi aquela menos competitiva devido ao pequeno retorno econômico em função dos baixos preços de venda do produto e, portanto, não esteve presente nos resultados de nenhum dos cenários adotados. Estes resultados estão de acordo com as informações apresentadas na Tabela 10. É possível perceber que o preço da cana-de-açúcar nos últimos anos tem sofrido alterações, sendo essas ainda insuficientes para torná-la economicamente viável diante dos cenários utilizados neste trabalho.

Tabela 10. Preços médios de venda da tonelada da cana-de-açúcar.

Ano/Safra	Preço médio (R\$ t ⁻¹)
1999/2000	19,00
2000/2001	30,00
2001/2002	31,00
2002/2003	36,00
2003/2004	32,00
2004/2005	34,00
2005/2006	45,00

Fonte: Adaptado de IEA, (2006).

É possível notar que o padrão de cultivo sugerido pelo modelo matemático contempla o plantio das culturas do mamoeiro e do abacaxi em detrimento das culturas da cana-de-

açúcar e maracujá, provavelmente devido aos maiores desempenhos econômicos que essas culturas apresentaram para o cenário criado.

4.3 Maximização da Renda Utilizando Lagrangiano Aumentado

A solução do problema utilizando o método de Lagrangiano Aumentado foi obtida para os mesmos cenários adotados no item anterior, e os resultados estão apresentados na Tabela 11, para os diferentes cenários considerados.

Tabela 11. Receita maximizada (RL) para as culturas do maracujá (mar), cana-de-açúcar (cana), abacaxi (abac.) e mamão (Mam.), considerando o método de Lanregiano Aumentado

Cenário	Área (ha)			Lâmina (mm)			RL (R\$)		
	Mar	Cana	Abac.	Mam.	Mar.	Cana		Abac.	Mam.
1	756,73	-	158,5	319,45	1.339,8	-	1.221,6	2.881,7	2830500
2	756,73	-	158,5	319,45	1.339,8	-	1.221,6	2.881,7	2830500
3	100,54	-	158,5	319,45	1.329,3	-	1.221,3	2.881,6	2734400
4	256,60	-	158,5	319,45	1.308,5	-	1.221,4	2.881,6	2755900

Os resultados observados na Tabela 11 mostram que não houve diferenças expressivas entre os cenários 1 e 2 e entre os cenários 3 e 4, confirmando o argumento de que o valor da água para irrigação cobrado pelo CEIVAP é relativamente baixo, não interferindo na otimização da receita, quanto ao tipo de planejamento da irrigação (total ou suplementar). A Tabela 10 também mostra que a renda foi diferente ao se comparar os cenários 3 e 4, em que um aumento na área plantada com a cultura do maracujá fez aumentar a renda devido ao aumento na área total cultivada. Além disso foi possível verificar que o melhor padrão de cultivo simulado foi recomendado quando foi priorizado o cultivo das culturas do abacaxi e do mamão em detrimento às culturas do maracujá e da cana-de-açúcar.

Esses resultados apresentam a mesma tendência daqueles encontrados utilizando programação linear separável. Porém, a renda utilizando o método de Lagrangiano Aumentado foi maior em todos os cenários criados ao se comparar as duas técnicas utilizadas.

As duas técnicas implementadas mostraram que, o melhor padrão de cultivo que culmina da maximização da renda é quando se prioriza o cultivo do mamão e do abacaxi em detrimento do cultivo do maracujá e da cana-de-açúcar.

Vale lembrar também que, para a técnica de linearização por partes, o número de seguimentos em que a função objetivo é linearizada influencia no resultado encontrado e quanto maior o número de seguimentos mais próximo da função original se trabalha. No entanto, se o número de segmentos for muito grande, aumenta o número de variáveis do problema, gerando uma matriz muito grande, o que passa a comprometer a solução pelo método simplex, devido a má conformação da matriz, gerando uma solução fraca. Alguns autores como Frizzone & Andrade Junior (2005) sugerem que a função objetivo seja linearizada em 9 seguimentos, o que pode não ser a melhor opção. Uma das vantagens que o método Lagrangiano Aumentado apresenta em relação ao de linearização por partes é que ele trata diretamente o problema não linear na região viável e usa restrições não lineares ao invés de aproximá-las, além disso não trabalha com matrizes e sim vetores e portanto não apresenta problemas de mau condicionamento, gerando soluções mais fortes.

5 CONCLUSÕES

Com base na metodologia utilizada foi possível estabelecer as seguintes conclusões parciais:

a) o modelo matemático criado com base nas funções de produção das culturas à água aplicada foi capaz de selecionar a melhor estratégia de cultivo, considerando os diferentes cenários adotados;

b) as culturas que apresentaram os melhores desempenhos para os cenários criados foram o mamão e o abacaxi;

c) O método Lagrangiano Aumentado se mostrou adequado na resolução do problema criado e pode ser uma alternativa interessante aos métodos tradicionais de maximização de renda em cenários hidroagrícolas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALGOZIN, K. A.; BRALTS, V. F.; RITCHIE, J. T. Irrigation strategy section based on crop yield, water, and energy use relationships: A Michigan example. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, USA, p.428-431, 1998.

ALMEIDA, F. T. **Respostas do mamoeiro ‘Improved Sunrise Solo 72/12’ à diferentes lâminas de irrigação no Norte Fluminense**. 2000. 128 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 2000.

BALTRA, C. O. A utilização da informática na irrigação. **Revista ITEM**, Brasília, n.28, p.13-15,1982.

BOWMAN, J. A.; SIMMONS, F.W.; KIMPEL, B.C. **Irrigation in midwest: Lessons from Illinois**. Journal of Irrigation and Drainage Division, NewYork: ASCE, v.117, n.5, p. 700-715, 1991.

BRAGA, B. P. F. Técnicas de otimização e simulação aplicadas em sistemas de recursos hídricos. In: BARTH, F. T. et al. **Modelos Para Gerenciamento de Recursos Hídricos**. São Paulo: ABRH/Nobel,. Cap. 5, p. 427-518. 1987.

CARVALHO, D. F.; BONOMO, R.; GRIEBELER, N; RIBEIRO,A. Estimativa da demanda máxima de irrigação e da duração do ciclo para a cultura do milho (*Zea mays L.*), na bacia do rio Verde Grande (MG). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras-MG, UFLA. v. 22, n.1, p.97-104, 1998.

CARVALHO, D. F. ; SOARES, A. A. SEDIYAMA, G. C. . Programa computacional para a estimativa da lâmina de irrigação em perímetros irrigados. **Revista de Engenharia Rural**, Piracicaba-SP, v. 10, n. 2, p. 59-73, 1999.

CARVALHO, D. F.; FARIA, R. A.; SOUSA, S. A. V.; BORGES, H. Espacialização do período de veranico para diferentes níveis de perda de produção na cultura do milho (*Zea mays L.*), na bacia do rio Verde Grande (MG). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande-PB, v. 4, n.2, p.172-176, 2000.

CRAWLEY, P.; DANDY, G. Optimal operation of multiple-reservoir system. **Journal of Water Resource Planning and Management**, ASCE, v. 119, n.1. p.1–17, 1993.

DANTAS NETO, J. **Modelos de decisão para otimização do padrão de cultivo em áreas irrigadas, baseados nas funções de resposta das culturas à água**. Botucatu: UNESP, 1994. 125 p . Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 1994.

DANTAS NETO, J.; AZEVEDO, C. A.V.; FRIZZONE, J. A. Uso da programação linear para estimar o padrão de cultura do perímetro irrigado Nilo Coelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 1, p.9-12, 1997.

DENMEAD, O. T.; SHAW, R. H. Availability of soil water to plant as affected by soil moisture content and meteorological conditions. **Agronomy Journal**, v.54, p.385-390, 1962.

DROOGERS, P.; BASTIAANSEN, W.G.M.; BEAYZGUL. M.; KAYAM, Y.; KITE, G.W.; MURRAY-HUST, H. **Distributed agro-hydrological modeling of an irrigation system in Western Turkey**. *Agric. Water management*, v.43, p.183 – 202, 2000.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: Agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. 2ª edição revista e ampliada. Viçosa: UFV, 412p. 2003.

FREITAS, A. J. **Gestão de Recursos Hídricos**. In: *Gestão de recursos hídricos: aspectos legais, econômicos e sociais*. Brasília-DF. Secretaria de Recursos Hídricos; Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa; Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 659p. 2000.

FRIZZONE, J.A. **Manejo da irrigação**. Lavras : UFLA/SBEA. 378p. 1998.

FRIZZONE, J. A. ; OLITTA, A. F. L e PEREIRA, G. T. **Funções de resposta do feijoeiro (Phaseolus vulgaris L.) ao uso de nitrogênio e lâmina de irrigação**. II- Maximização da receita . *ITEM, ABID*. v.30, p.27-31, 1987.

FRIZZONE, J. A. ; JUNIOR, A. S. ADERSON. **Planejamento de irrigação – Análise de decisão de investimento**. EMBRAPA INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA, Brasília-DF, 626p. 2005.

FRIZZONE, J. A.; BOTREL, T. A.; ARCE, R .A. B. Alocação de água e combinação de atividades pela programação linear em um projeto hidroagrícola no município de Guairá – SP. **Science Agrícola**, Piracicaba, v.51, n.3, p.524-432, 1994.

FRIZZONE, J. A. et al . Linear programming model to optimize the water resource use in irrigation projects: an application to the Senator Nilo Coelho Project. **Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)**, Piracicaba, v. 54, n. spe, p136-148, 1997.

FRITZCHE, H. **Programação não-linear: Análise e métodos**. São Paulo. Ed. da Universidade de São Paulo. 170p. 1978.

HEXEM, R. W.; HEADY, E. O. **Water production function for irrigated agriculture**. Ames, The Iowa State University Press, 215p, 1978.

HOWELL, T. A.; CUENCA, R.H.; SOLOMON, K. H. Crop yield response. In: HOFFMAN, G. J.; HOWELL, T. A.; SOLOMON, L. H. (ed.). *Management of farm irrigation systems*. St. Joseph: **American Society of Agricultural Engineers**. p. 93-122, 1992

IEA – Instituto de Economia Agrícola – **Análises e indicadores de agronegócios**. v.1, n. 9, 2006. ISSN 1980-0711.

JUSSIANE, L. F. **Desempenho do método de Lagrangiano Aumentado com penalidade quadrática**. 2004. 108 f. Dissertação (Mestrado em Matemática) - UFPR Curitiba. 108p. 2004.

- LABADIE, J. W. Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 130, n. 2, p. 93-111, 2004.
- LOUCKS, D., STEDINGER, J., HAITH, D. **Water resource systems planning and analysis**. New Jersey: Prentice-Hall/Englewood Cliffs, 1981.
- MENDONÇA, L. F. **Aceleração quase - Newton problemas de minimização com restrições**. 2006. 103 f. Tese (Doutorado em Matemática) - UNICAMP, 2006.
- McMILLAN JUNIOR, C. **Mathematical programming**: an introduction to the design and application of optimal decision machines. New York: John Wiley, 495p. 1970.
- MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola**: adubos e adubação. 2^a ed. São Paulo, Agronômica Ceres, 606p. 1967.
- MARINS, F. A. S.; DARBY-DOWMAN, K.; SENNE, F.; PERIN, C. Algorithms for Network-piecewise-Linear Programs: A comparative Study. **European Journal of Operational Research**, v.97, n.1, 1997.
- MARINS, F. A. S.; PERIN FILHO, C. Programação linear por partes: revisão teórica e aplicações. **Revista Produção**, v. 6, n.2, p.146-163, 1996.
- MARTINS, D. P. **Resposta do maracujazeiro amarelo (*Passiflora edulis* Sins var. *flavicarpa*) a lâminas de irrigação e dose de nitrogênio e potássio**. 1998. 84 f.Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – UENF, Campos dos Goytacazes - RJ, 1998.
- MARTINEZ, J. M. **Otimização Prática usando Lagrangiano Aumentado**. Departamento de Matemática Aplicada – IMECC-UNICAMP. 123p. 2003.
- REGO FILHO, L. M. **Respostas do Abacaxizeiro “Pérola” a diferentes lâminas de irrigação no norte Fluminense**. 2002. 150 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - UENF, Campos dos Goytacazes - RJ, 2002.
- REICHARDT, K. **A água na produção agrícola**. Piracicaba - São Paulo: McGraw-Hill do Brasil. 119p. 1978.
- SCHARDONG, A. **Aplicação de técnicas de Programação Linear e extensões para otimização da alocação de Água em Sistemas de Recursos Hídricos, utilizando métodos de Pontos Interiores**. 2006. 141 f. Dissertação (Mestrado em Matemática) - Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2006.
- SECKLER, D.; AMARASINGHE, U.; MOLDEN, D.; SILVA, R.; BARKER, R. World water demand and supply, 1990-2025: Scenarios and Issues. **Research report N° 19**, International Water Management Institute, Colombo Sri Lanka, 40p. 1998.
- SILVA, D. D.; PRUSKI, F.F. **Gestão de recursos hídricos; aspetos legais, econômicos e sociais**. Brasília-DF. Secretaria de Recursos Hídricos; Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa; Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2000. 659p.

SILVA, D. D. Efeito de lâminas e doses de Nitrogênio na cultura do milho, irrigado por aspersão em linha. **Revista Ceres**, v.39, n.222, p.91-104, 1992.

SOUSA, E. F. **Função de produção da cana-de-açúcar e da goiabeira em relação à irrigação**. 1997. 119 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - UENF, Campos dos Goytacazes - RJ, 1997.

STANHILL, G. The effect of differences in soil moisture status on plant growth: A review and analysis of soil moisture regime experiments. **Soil Science**, v. 84, p. 205-214, 1957.

STEFFENS, L. M. **Desenvolvimento de uma metodologia integrada para otimização de forma de mecânica de fluido**. 2005. 201 f. Dissertação (Mestrado em Matemática) – UFSC, Santa Catarina, 2005.

TARSITANO, M. A. A.; HOFFMANN, R. Análise econômica do emprego de fertilizante na cultura do milho. **Revista Economia Rural**, v.23, n.3, p.333-349, 1985.

TAYLOR, S. A.; Use of mean soil moisture tension to evaluate the effect of soil moisture on crop yield. **Soil Science**, v. 74, p. 217-266, 1952.

THAME, A. C. M. HOFFMANN, R. Estudo econômico da determinação das doses ótimas de fertilizantes e da idade ótima de corte em *Eucalyptus saligna* SM, em solos do cerrado no Estado de São Paulo. **Revista Economia Rural**, v.18, n.1, p.115-142, 1980.

VAUX, H. J.; PRUITT, W. O. Crop-water production functions. In: HILLEL, D. (ed). **Advances in irrigation**. New York: Academic Press, v.2, p.61-97. 1983.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. Soil moisture in relation to plant growth. **Annu. Rev. Plant Physiology**, v. 1, p. 233-304, 1950.

YARON, D.; BRESLER, E. Economics analysis of on-farm irrigation using response functions of crops. In: HILLEL, D. (ed). **Advances in irrigation**. New York: Academic Press, v.2, p.223-255. 1983.

WINKLER, H.; SFREDO, G. J. Efeito da calagem e da adubação fosfatada sobre a produção de trigo e a disponibilidade de fósforo em quatro unidades de solo no Estado de Santa Catarina. **Revista Agronomia Sulriograndense**, v.15, n.1, p.1 -13, 1979.

CAPÍTULO III

**ALGORITMO PARA MAPEAMENTO DE RENDA UTILIZANDO O
PRINCÍPIO DO SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS,
APLICADO NO PLANEJAMENTO DA AGRICULTURA IRRIGADA.**

RESUMO

O planejamento adequado da agricultura irrigada pode contribuir para o êxito de sua implantação, garantindo aos produtores o sucesso da atividade agrícola devido, principalmente à minimização dos riscos. A região norte do Estado do Rio de Janeiro, apesar de ser tradicional no cultivo da cana-de-açúcar, tem se mostrado uma região propícia para a implantação da fruticultura irrigada. Porém é uma região que apresenta histórico de conflito de uso da água e, como a irrigação é uma técnica que utiliza um volume considerável de água, estudos que visem o planejamento da agricultura irrigada, desempenham importante função no gerenciamento dos recursos hídricos dessa região. Dentre as ferramentas que podem ser utilizadas para o planejamento da agricultura irrigada, destaca-se os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), que permitem a coleta, a manipulação e a geração de novos dados, de forma rápida e precisa, garantindo as tomadas de decisões sobre um determinado tema. Muitos pacotes comerciais de SIG já foram utilizados para o planejamento da agricultura irrigada, porém apesar de muito onerosos não foram concebidos para essa finalidade. Com base nesses fatos, o presente estudo teve como objetivo desenvolver um algoritmo computacional com base nos princípios do Sistema de Informações Geográficas aplicado no mapeamento da renda de cultivos irrigados na região estudada, utilizando informações provenientes de funções de produção das culturas do maracujá. Cana-de-açúcar, abacaxi e mamão e índices econômicos referentes ao processo produtivo. Os resultados permitiram concluir que o algoritmo desenvolvido se mostrou adequado na obtenção de informações georreferenciadas referentes à renda máxima dos cultivos irrigados, sendo capaz de indicar as culturas e áreas que garantem os maiores retornos econômicos.

ABSTRACT

The appropriate planning of the irrigated agriculture, it can contribute to the success of his implantation, guaranteeing to the producers the success of the agricultural activity, owed mainly to the minimization of the risks. The North Fluminense region of Rio de Janeiro in spite of being traditional in the cultivation of the sugarcane, has if shown a favorable place for the implantation of the irrigated fruticulture. However it is an area that presents historical of conflict of use of the water and as the irrigation it is a technique that consumes a considerable volume of water, studies that has with objectives the planning of the irrigated agriculture, they carry out an important function in the administration of the water resources of that area. Therefore, the present study has as objective the planning of the area seeking the implantation of irrigated cultivations. Among the tools that they can be used for the planning of an area, seeking the implantation of irrigated cultivations, stands out the of Geographical Information system (GIS), that it allows the collection, the manipulation and the generation of new data, in a fast and necessary way, guaranteeing the sockets of decisions on a certain studied theme. Many commercial packages of GIS already were used in the planning of the irrigated agriculture, however in spite of very onerous, they were not conceived for that purpose. Therefore, the present study also seeks the development of a routine computational of GIS to be used in the planning of the irrigated agriculture, using information of a mathematical model built using answer functions of the cultures to the water. The results showed that the routine developed was efficient in the planning of the irrigated agriculture and too was able to indicate the best areas and cultures to obtain the largest economical returns.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país de dimensões continentais, ocupando uma superfície territorial de 8.547.403,5 km² e abrigando uma população de 169.799.170 habitantes, de acordo com o censo demográfico de 2000 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Sua densidade populacional atinge 18,4 habitantes.km⁻², com renda média familiar “per capita” de 1,6 salário mínimo.mês⁻¹. Combinando-se as realidades de contingente populacional e renda média familiar “per capita”, constata-se que o estado do Rio de Janeiro apresenta índices favoráveis, os quais o conduzem à uma realidade de segundo maior mercado consumidor do país, atrás apenas do estado de São Paulo. Tal fato, combinado à pequena extensão territorial, cria um imenso desafio para os agricultores fluminenses: produzir alimentos em quantidade e qualidade suficientes para atender a terceira maior população do país em um estado em que a superfície representa apenas 0,51% de todo território nacional. Se por um lado as possibilidades parecem ilimitadas, por outro, o interesse e a influência por parte de outros estados em disputar esse espaço também são grandes, tornando o mercado agrícola do estado do Rio de Janeiro altamente concorrido e exigindo grande dose de eficiência e competitividade dos agricultores (Silva, 2003).

Segundo a Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do estado do Rio de Janeiro (EMATER), a situação fundiária do estado é baseada em um significativo número de propriedades com área inferior a 100ha e, aproximadamente, 53% têm área menor que 10ha. Deduz-se, assim, que a agricultura fluminense baseia-se nas pequenas e médias propriedades agrícolas, tendo a força do trabalho familiar extrema relevância neste contexto.

Associado a isso e à decadência dos sistemas de monocultivos, os quais contribuíram para a degradação ambiental e flagelo social, especialmente nas regiões norte e noroeste fluminense, expressivas áreas abandonadas estão sendo reincorporadas à agricultura com a utilização da olericultura e fruticultura irrigada. Este fato tem evidenciado o potencial agrícola do Estado, além de permitir um aumento da renda de pequenos e médios agricultores. No entanto, torna-se essencial o planejamento das atividades agrícolas nessas áreas a fim de contribuir para a fixação das famílias rurais dentro de suas propriedades. Essa compreensão envolve principalmente, o conhecimento da dinâmica da água na produção agrícola, a técnica da irrigação, e a utilização de informações geográficas no planejamento do uso das terras, como forma de minimizar o êxodo rural, principalmente nas chamadas áreas marginais do estado.

O tratamento de informações geográficas espaciais é hoje um requisito muito utilizado para controlar e ordenar a ocupação das unidades físicas do meio ambiente, tão pressionadas por decisões que, invariavelmente, se contrapõem a uma lógica racional de seu uso. Para acompanhar o ritmo veloz e a complexidade dessa ocupação e utilização do solo, é preciso dispor de técnicas que provêem referências espaciais da ordenação dessa ocupação, passíveis de tratamentos automatizados. De acordo com Assad & Sano (1998), os sistemas de informações geográficas (SIG) manipulam dados de diversas fontes e formatos, dentro de um ambiente computacional ágil e capaz de integrar as informações espaciais temáticas e gerar novos dados derivados dos originais.

Segundo Silva et al. (2005), o uso de informações geográficas na agricultura tem-se mostrado uma ferramenta importante no planejamento de atividades agrícolas, sendo possível, por meio dessa metodologia, criar de forma prática, rápida e menos onerosa, bancos de dados e documentos cartográficos como mapas temáticos com as mais diversas informações que servirão de bases para um adequado planejamento de uma determinada atividade, como por exemplo, o planejamento de áreas irrigadas.

Neste estudo, pretendeu-se testar a hipótese de que as informações obtidas a partir de modelos matemáticos, acoplados ao sistema de informações geográficas, podem ser utilizadas adequadamente no planejamento da agricultura irrigada.

Por tudo ora comentado, o presente estudo teve como objetivo desenvolver uma rotina computacional aplicada no planejamento da agricultura irrigada em uma área localizada no norte do estado do Rio de Janeiro, considerando-se para isso parâmetros edafo-climáticos e econômicos referentes às principais culturas cultivadas na região.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A Importância da Agricultura Irrigada

O uso mundial da irrigação expandiu-se muito a partir dos anos 50, com 95 milhões de hectares, chegando na década de 80, com mais de 250 milhões de hectares. Atualmente, as terras irrigadas representam aproximadamente 18% das terras cultivadas e são responsáveis pela produção de mais de um terço dos alimentos no mundo. Em países em desenvolvimento, apesar do alto custo da energia para o sistema, a expansão de áreas irrigadas continua aumentando à taxas de 2% ao ano, sobretudo devido às inovações tecnológicas, como a aplicação de água e nutrientes sob alta frequência e baixo volume, determinação da necessidade da cultura em função dos estádios de desenvolvimento da planta e fatores ambientais locais e utilização de sistemas permanentes de distribuição de água mais baratos e duráveis. Isto ocorre pelo fato da escassez de água ser considerada a maior limitação para o aumento de produtividade no mundo, não podendo, no entanto, haver desperdícios (HILLEL, 1990).

No Brasil existem 40 milhões de hectares utilizados para agricultura, sendo aproximadamente 3,2 milhões irrigados. Do total, apenas 36 mil hectares estão localizados no estado do Rio de Janeiro, que apresenta valores de área irrigada, muito inferiores aos demais estados da região Sudeste, (Cristhofidis, 2003). Embora não seja um dos mais tradicionais produtores agrícolas do Brasil, o Rio de Janeiro vem apresentando um avanço na produção agrícola irrigada, destacando-se o pólo de fruticultura, localizado nas regiões norte e noroeste do Estado.

Na região Sudeste do Brasil a distribuição das chuvas não permite cultivos durante o período de inverno sem o uso da irrigação. Mesmo no verão tem-se observado, em alguns anos, a não coincidência dos períodos chuvosos com os períodos de maior necessidade de água das culturas. Entretanto, esse risco pode ser minimizado com a utilização da irrigação, com a qual o agricultor, além de garantir condições hídricas satisfatórias durante a estação chuvosa, pode também utilizar suas terras em atividade produtiva na época seca do ano. Portanto, a irrigação se apresenta como uma das tecnologias mais eficazes na manutenção e aumento da produtividade das culturas. Associado à importância da água e em razão da variabilidade do regime pluvial em algumas regiões, o que constitui um dos principais fatores limitantes à obtenção de uma agricultura economicamente viável durante todo o ano, o uso da tecnologia da irrigação pode contribuir para o sucesso de um processo produtivo.

2.2 Sistema de Informação Geográfica

2.2.1 Histórico e conceito

Historicamente, o método analógico (em formato de papel) foi o mais comum de representação das informações espaciais, com as primeiras versões datando antes mesmo do primeiro alfabeto. O manejo e manipulação de dados espacialmente relacionados, usando técnicas computacionais teve início em 1960 e cresceu rapidamente na década de 90. Esse crescimento está relacionado à disponibilidade de computadores com alta velocidade de processamento o que contribuíram para o desenvolvimento da tecnologia do geoprocessamento (Petersen et al., 1995).

O termo geoprocessamento denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica (Camara & Medeiros, 1998).

Os sistemas de informações geográficas (SIG) são considerados os instrumentos computacionais do geoprocessamento e pode ser conceituado também, como um conjunto de ferramentas que permite a coleta, o armazenamento, a recuperação, a transformação e apresentação dos dados do mundo real para determinados objetivos específicos, que geralmente é o apoio à tomada de decisões.

O tratamento de informações geográficas espaciais é hoje um requisito necessário para controlar e ordenar a ocupação das unidades físicas do meio ambiente, tão pressionadas por decisões que invariavelmente se contrapõem a uma lógica racional de seu uso. Para acompanhar o ritmo veloz e a complexidade dessa ocupação e utilização do solo, é preciso dispor de técnicas que provêem referências espaciais da ordenação dessa ocupação, passíveis de tratamentos automatizados. De acordo com Assad & Sano (1998), os SIG manipulam dados de diversas fontes e formatos, dentro de um ambiente computacional ágil e capaz de integrar as informações espaciais temáticas e gerar novos dados derivados dos originais.

Segundo os mesmos autores, dentre as justificativas para a utilização dos SIG, tem-se a possibilidade de, realização de testes analíticos de modelos conceituais de modo rápido e preciso (por exemplo: suscetibilidade do solo à erosão, capacidade de suporte do solo, etc.) facilitando avaliações científicas e técnicas em grandes áreas em curto período de tempo.

2.2.2 Aplicações do SIG na agricultura

No setor agrícola, Assad & Sano (1993) já chamavam a atenção para futuras aplicações dos SIG, como sua utilização na fertilidade de solos, mecanização agrícola e produtividade agrícola potencial, dentre outros.

O que se observa atualmente é que os trabalhos desenvolvidos no setor agrícola, utilizando-se a tecnologia dos SIG, alcançaram áreas e setores que ultrapassaram as previsões feitas por Assad & Sano (1993). São exemplos disso, trabalhos desenvolvidos por vários grupos de pesquisa em todo o mundo, como os da Universidade de Davis na Califórnia (USA), que estudaram a aplicação dos SIG no manejo de bacias hidrográficas e no manejo ambiental e o de Rodriguez & Lopez (2000), que comprovaram a adequacidade do SIG no planejamento de sistemas de irrigação e drenagem em cultivos de arroz irrigado, produzindo mapas temáticos que auxiliaram na modernização dos sistemas de irrigação em Havana – Cuba.

No Brasil, podemos citar diversos trabalhos utilizando os SIG aplicados à agricultura, como os de Faria et al. (2002) que estudaram a economia de água e energia em projetos de irrigação suplementar no Estado de Minas Gerais, para a cultura do milho (*Zea mays* L.). Os autores observaram, por meio de documentos cartográficos gerados pelo SIG IDRISI, as diferenças entre a demanda de irrigação total e a suplementar e puderam estudar a conveniência de incluir ou não a contribuição das precipitações em um projeto de irrigação. Com esta técnica, também foi possível estimar o custo de não se considerar a precipitação no manejo do projeto.

Silva et al. (2002) compararam diferentes metodologias de estimativa da evapotranspiração de referência e sua influência na demanda máxima de irrigação para o milho (*Zea mays* L.) no Estado do Rio de Janeiro, utilizando-se os SIG e verificaram a importância desta ferramenta na produção de documentos cartográficos. Carvalho (1998a) realizou estudos utilizando o SIG na estimativa da demanda máxima de irrigação e da duração do ciclo para a cultura do milho (*Zea mays* L.), na bacia do rio Verde Grande no estado de Minas Gerais e concluíram que, a metodologia utilizada permitiu a identificação das

informações estudadas em qualquer ponto dentro da bacia, sendo indicada para outras regiões, principalmente aquelas que apresentam baixa disponibilidade de água para irrigação. Utilizando os sistemas de informações geográficas, Carvalho (2000) estudou a ocorrência do período de veranico para diferentes níveis de perda de produção na cultura do milho, na mesma região. O autor concluiu que a utilização desta metodologia é indicada principalmente para aquelas regiões que apresentam baixa disponibilidade de água para irrigação e/ou carência de estações climatológicas.

Ceddia (2000) comprovou a adequação da utilização de SIG no estudo de zoneamento agroambiental e indicadores de sustentabilidade como subsídio ao planejamento agrícola do município de Paty do Alferes-RJ. O autor concluiu que, o uso de ferramentas de análise de pertinência do SIG ARC/INFO permitiu o ganho de conhecimento sobre o município, no que diz respeito às inter-relações dos componentes do meio físico e as incongruências entre uso e recomendação de uso do solo.

Carvalho et al. (2001) utilizaram os sistemas de informações geográficas no estudo de disponibilidade climática no estado do Rio de Janeiro, visando a elaboração de projetos de irrigação e concluíram que, utilizando-se os SIG é possível identificar áreas e épocas do ano mais viáveis climaticamente à atividade agrícola.

Martorano et al. (1999) utilizaram a ferramenta SIG para propor um zoneamento agroecológico para a região de Ribeirão Preto no estado de São Paulo, por meio do cruzamento de informações de solo, relevo e clima, e observaram a importância da utilização do SIG na integração de mapas temáticos.

Wegner et al. (2001) utilizaram esta ferramenta no Rio Grande do Sul para avaliar a variação da qualidade de terras em diferentes lotes de assentamentos de reforma agrária. Os autores concluíram que o uso do SIG na avaliação de imóveis rurais proporciona ao usuário uma maior objetividade na definição da qualidade das terras, levando em consideração uma correta utilização de seus recursos naturais. O procedimento para avaliar a capacidade de uso da terra consiste em levantar as características e indicar possibilidades de uso agrícola conforme critérios exigidos pelos cultivos.

Como visto anteriormente, independente do método e das culturas instaladas, um planejamento adequado de áreas irrigadas deve efetivamente estar integrado com as informações de clima, de solo e também com as funções de resposta das culturas em relação à lâmina de água aplicada, além de recursos de capital, de trabalho e de tecnologia agrícola, mantendo as condições de umidade e nutrientes no solo favoráveis ao bom desempenho da cultura (Bowman et al., 1991). Na maioria dos casos, as incertezas em torno dessas informações dificultam as decisões de planejamento e manejo da irrigação. Porém, é possível resolver este problema utilizando-se os SIG, que permitem a realização de análises complexas ao integrar dados de diversas fontes. Os SIG tornam possível ainda à automatização da produção de documentos cartográficos.

Segundo Silva (2003), o uso do SIG na agricultura tem se mostrado uma ferramenta importante no planejamento de atividades agrícolas, sendo possível criar de forma prática, rápida e menos onerosa, bancos de dados e documentos cartográficos como mapas temáticos com as mais diversas informações que servirão de bases para um bom planejamento de um processo produtivo. Utilizando essa ferramenta, é possível também identificar áreas e épocas do ano mais viáveis climaticamente às atividades agrícolas, que associadas com informações de solo e cultura, caracterizam e identificam as regiões com melhores potenciais agrícolas. Também é possível gerar dados georreferenciados para a elaboração de projetos de irrigação com o objetivo de diminuir o custo desta tecnologia. Nesta análise, o uso de algumas informações como distância da fonte de água ao local a ser irrigado, características físicas e químicas do solo, declividade da área a ser irrigada e sensibilidade das culturas ao déficit

hídrico são essenciais para a elaboração de um projeto adequado de irrigação (Silva et al., 2005).

2.3 Modelos para Representação do Mundo Real

Como visto no item anterior, diversos trabalhos foram realizados utilizando SIG aplicados ao planejamento da agricultura. Porém, a maioria desses trabalhos utiliza pacotes comerciais como o ARCVIEW, ARCGIS, IDRISI, SPRING, dentre outros, que apresentam geralmente elevados custos e foram concebidos para outras finalidades. Na literatura não existem trabalhos que tem como objetivo o desenvolvimento de algoritmos de SIG específicos para o planejamento da agricultura irrigada utilizando o ambiente computacional de programação MATLAB. Este fato cria uma demanda referente ao desenvolvimento de SIG de baixo custo e específicos ao planejamento da agricultura.

Para o desenvolvimento de um algoritmo com base nos princípios do SIG é necessário o conhecimento de como as informações do mundo real são representadas, armazenadas e manipuladas nesse ambiente, visando a obtenção de novos dados.

A representação do mundo real pode ser feita, principalmente, utilizando dois tipos de modelos de dados, o modelo vetorial e o modelo matricial. O primeiro, informa onde qualquer coisa ocorre, ou seja, fornece a localização de cada objeto. Já o modelo matricial (raster), informa o que ocorre em qualquer lugar, ou seja, fornece o atributo de cada célula (Varella, 2006). A Figura 1 mostra a representação do mundo real usando diferentes modelos de dados.

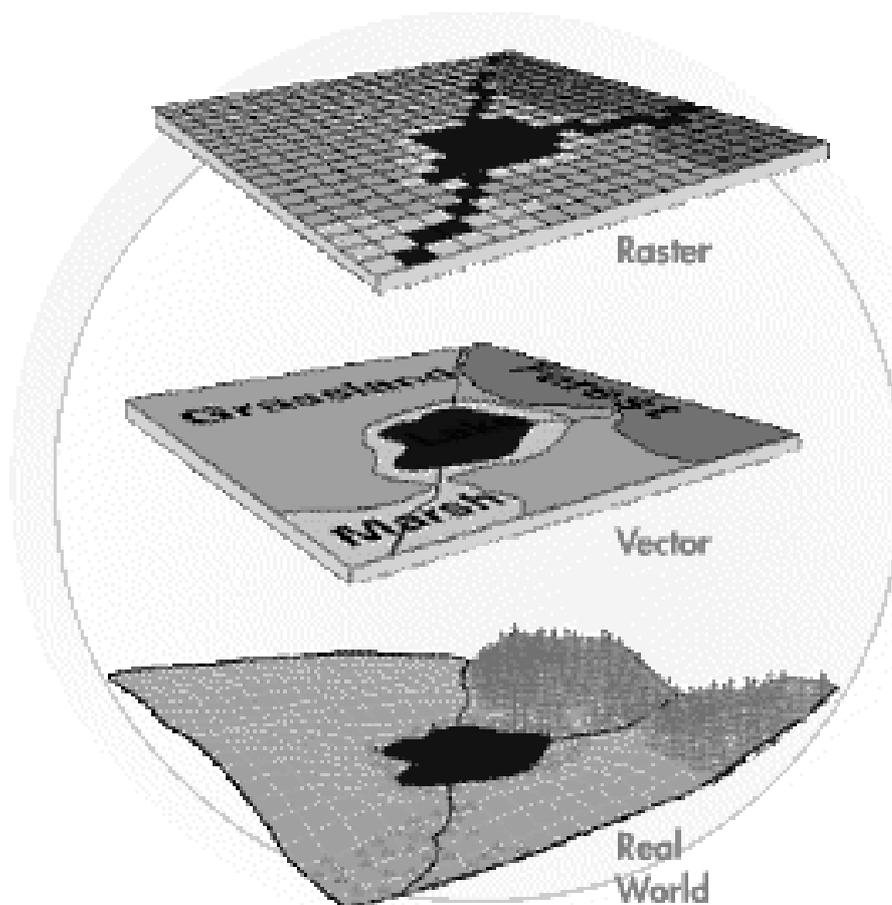


Figura 1. Representação do mundo real usando diferentes modelos de dados.
Fonte: Ribeiro et al. (2006).

Dados matriciais devem ser entendidos como qualquer dado armazenado, em uma estrutura de matriz retangular com N linhas x M colunas, como grades regulares ou imagens de sensoriamento remoto. Dados matriciais podem possuir uma terceira dimensão, além daquela representada pelo plano cartesiano das linhas e colunas, ou seja, a cada elemento do dado matricial pode estar associado não a um, mas um conjunto de valores. No caso de imagens de sensoriamento remoto, esses valores representam os valores obtidos nas diferentes bandas espectrais do instrumento imageador por exemplo, por isso chama-se essa dimensão de número de bandas. Assim, tem-se que um dado matricial pode possuir N colunas x M linhas x B bandas. Cada elemento da matriz, é chamado de elemento do dado matricial ou pixel. Cada elemento pode assumir um determinado intervalo de valores dependente do tamanho computacional (ou digital) reservado para esse elemento. Todos os elementos de um dado matricial possuem o mesmo tamanho. Segundo INPE (2006), alguns formatos possíveis para cada elemento de dado matricial são:

1. *Unsigned Char*: ocupa 8 bits por elemento, podendo armazenar valores entre 0 a 255;
2. *Short*: ocupa 16 bits por elemento, pode armazenar valores entre -32.68 a 32.67 ;
3. *Float*: ocupa 32 bits por elemento, pode armazenar valores entre $3.4E-38$ a $3.4E+38$;
4. *Double*: ocupa 64 bits por elemento, pode armazenar valores entre $1.7E-308$ a $1.7E+308$.

Assim, ao invés de ser especificado o número de bits em cada elemento, é comum se especificar diretamente o tipo computacional que representa (INPE, 2006). A Figura 2 mostra um exemplo de conexão da tabela de atributos a representações matriciais.

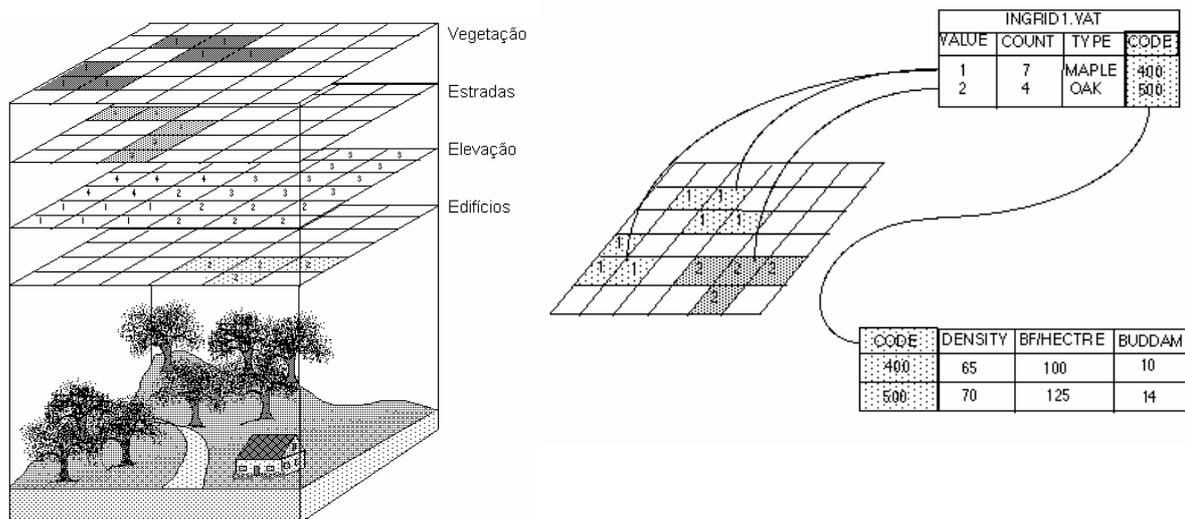


Figura 2. Esquema representativo de conexão da tabela de atributos a representação matricial
 Fonte: Ribeiro et al. (2006).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e Características da Área de Estudo

O estudo foi desenvolvido considerando uma área de aproximadamente 2500 ha, pertencente ao Projeto de Irrigação e Drenagem da Cana-de-açúcar na Região Norte-Fluminense (PROJIR), concluído em 1982 pelo então Instituto do Açúcar e do Alcool - IAA/PLANALSUCAR, sendo utilizadas as bases cartográfica e pedológica (Figura 3).

A área está localizada na região município de Campos dos Goytacazes no Norte do estado do Rio de Janeiro, inserida na região denominada de tabuleiros costeiros, e apresenta relevo de topografia plana em sua maioria, com colinas suave onduladas, muito característica nesse ambiente. As principais classes de solos que ocorrem são os Neossolos, Cambissolos, Latossolos, Argissolos e Gleissolos, que apresentam argila de atividade de baixa a alta e textura muito variada. A temperatura média do mês mais frio (junho) é de 26°C e a do mês mais quente (fevereiro) é de 33,4°C. A umidade relativa média da região varia de 78 a 92 %.

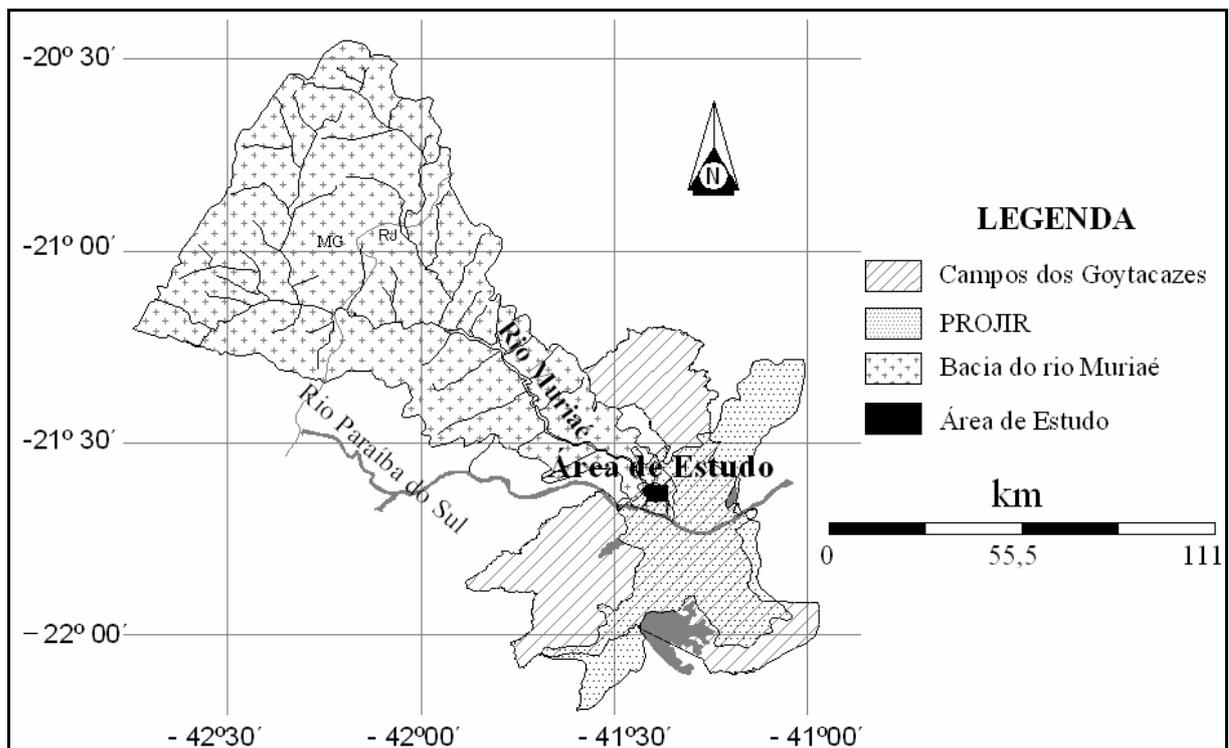


Figura 3. Localização geográfica e vista geral da área de estudo.

3.2 Parâmetros Utilizados na Maximização da Renda das Culturas

3.2.1 Custos do processo produtivo e preço de venda dos produtos

Para as culturas da cana-de-açúcar, abacaxi, e maracujá foram adotados os preços médios apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3 do Anexo. Para a cultura do mamoeiro foram utilizados os preços corrigidos, obtidos por Almeida (2000). Esses preços foram multiplicados pelas quantidades de adubo e calcário necessários para cada cultura, calculados de acordo

com De-Polli (1988), com base na análise química do solo. A Tabela 1 mostra de forma resumida os custos de produção e os custos de venda dos produtos utilizados no estudo. Para a cultura da cana-de-açúcar considerou-se o preço de venda do produto com base em uma análise de sensibilidade previamente realizada que mostrou que o preço mínimo de venda do produto que tornava a renda líquida positiva de 56,00 R\$.t⁻¹, considerando os índices econômicos adotados nesse estudo.

Tabela 1. Custos de produção e preço de venda dos produtos para as culturas consideradas

Cultura	Custo de produção (R\$.ha ⁻¹)	Preço do produto (R\$.t ⁻¹)
Cana-de-açúcar	8171,37	56,00
Abacaxi	8571,17	230,00
Mamão	10191,60	320,00
Maracujá	11784,20	340,00

3.2.2 Custo de adubação e calagem das culturas

Com base nas recomendações de De-Polli et al (1988) para a adubação e calagem no estado do Rio de Janeiro, foram calculados os custos de adubação e calagem para cada uma das culturas, para isso foram considerados os dados presentes nas análises químicas das amostras representativas dos solos da área e apresentadas nas Tabelas de 4 a 7 do anexo. A Tabela 2 apresenta o custo da adubação e calagem para cada cultura e unidade de mapeamento.

Tabela 2. Custo de adubação e calagem das culturas para cada unidade de mapeamento.

Unidade de Mapeamento	Custo de adubação e calagem (R\$.ha ⁻¹)			
	Maracujá	Cana-de-açúcar	Abacaxi	Mamão
Ce4	408,00	185,00	1400,00	549,00
Ce1	432,00	196,00	1480,00	564,00
PA1	469,00	222,00	883,00	597,00
Aed3	545,00	190,00	1553,00	695,00

3.2.3 Funções de resposta das culturas a água

O trabalho foi desenvolvido visando à construção de uma rotina computacional no ambiente MATLAB que permitisse a espacialização da renda de cultivos irrigados, utilizando funções de produção das culturas do maracujá, cana-de-açúcar, abacaxi e mamão, em resposta à lâmina de água aplicada (Tabela 3). Essas culturas foram escolhidas por representarem um grande potencial para a agricultura irrigada da região Norte Fluminense. Além disso, essa região vem recebendo importantes subsídios do governo do estado como forma de incentivar o desenvolvimento da fruticultura irrigada.

Tabela 3. Funções de resposta das culturas à água

CULTURA	EQUAÇÃO	r ²
Cana-de-açúcar	$Y = -500,84 + 0,837.W - 0,00027W^2$	0,89
Abacaxizeiro	$Y = -06,687 + 0,905709.W - 0,000370675.W^2$	0,98
Maracujazeiro	$Y = 2,3931 + 0,049058.W - 0,0000183.W^2$	0,68
Mamoeiro	$Y = -88,13 + 0,098092.W - 0,00001725.W^2$	0,92

Y = Produtividade (t.ha⁻¹); W = Lâmina de água total do ciclo (mm)

As funções de resposta para as culturas da cana-de-açúcar (Souza, 1997), abacaxi (Rego Filho, 2002), maracujá (Martins, 1998) e mamão (Almeida, 2000) utilizada na obtenção da renda máxima de cada cultura foram obtidas de experimentos de campo, para condições edafoclimáticas semelhantes àquelas da área utilizada nesse estudo.

3.3 Obtenção dos Planos de Informações.

As informações contidas no PROJIR, como os mapas de solo e o planialtimétrico (escala 1:10.000), necessários à realização desse estudo, foram convertidos do formato analógico (papel) para o formato digital, por meio de scannerização eletrônica e depois convertidos para o formato vetorial utilizando-se o módulo CAD do software TOPO EVN 5.0 para Windows.

A partir do mapa de solos vetorizado, foram selecionadas as coordenadas de cada unidade de mapeamento que representavam as características físicas, químicas e mineralógicas similares às utilizadas para obtenção das funções de respostas das culturas estudadas. A Figura 4 apresenta o mapa pedológico da área estudada.

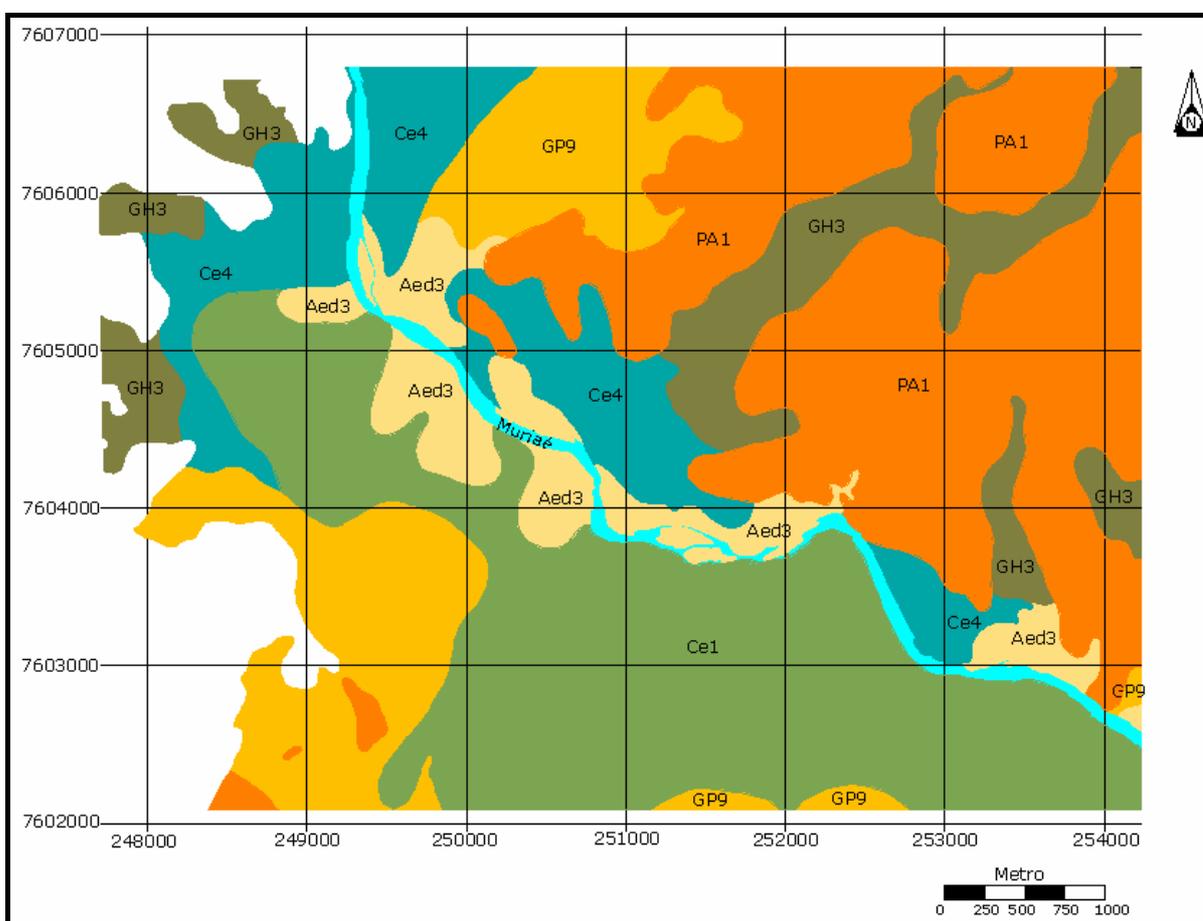


Figura 4. Vetorização das unidades de mapeamento do mapa de solos da área estudada.

As coordenadas geográficas de cada unidade pedológica do mapa de solos foram organizadas em um banco de dados do tipo LOTUS (.wk1), constituindo o banco de informações geográficas a ser utilizado posteriormente pela rotina computacional desenvolvida. Nesse estudo, para atender as características físicas e químicas dos solos utilizados na obtenção das funções de produção, foram desconsideradas as classes de solos

simbolizadas pelas unidades GH3 e GP9, devido essas classes apresentarem características químicas e físico-hídricas muito diferentes das utilizadas na obtenção das funções de produção. Na Tabela 4 estão apresentadas as unidades de mapeamento e as classes de solos que compõem o mapa pedológico da área de estudo e a Figura 5 mostra a área útil do mapa de solos utilizada no estudo.

Tabela 4. Unidades de mapeamento e classes de solo da área de estudo

Unidade de mapeamento	Classes
Ce1	Associação de CAMBISSOLO Tm eutrófico e distrófico textura argilosa + CAMBISSOLO Ta Eutrófico textura argilosa + AREIA QUARTZOSA Tm Eutrófico textura argilosa, drenagem moderada, relevo plano e micro relevo suave.
Ce4	Associação de CAMBISSOLO Tm Eutrófico, textura argilosa + CAMBISSOLO Tm Eutrófico SOLÓDICO sobre média + CAMBISSOLO Tb Eutrófico SOLÓDICO textura argilosa + AREIA QUARTZOSA Tm Eutrófico SOLÓDICO textura argilosa sobre média, drenagem moderada, relevo plano.
GH3	Associação de GLEY HÚMICO Ta ÁLICO textura argilosa, ligeiramente salino + ORGÂNICO TIOMÓRFICO SALINO, mal drenado, relevo plano.
GP9	GLEY POUCO HÚMICO Eutrófico, textura argilosa. mal drenado. Relevo plano.
PA1	Associação de LATOSSOLO AMARELO Distrófico ARGISSOLICO, A moderado, textura argilosa + ARGISSOLO AMARELO Tb Distrófico A fraco textura argilosa + ARGISSOLO AMARELO Tb Eutrófico textura arenosa/média bem drenado, relevo suave ondulado e ondulado+ LATOSSOLO AMARELO PETROPLÍNTICO ÁLICO A moderado textura média moderadamente drenado relevo suave ondulado.
Aed3	AREIA QUARTZOSA Eutrófico e distrófico. Tm. Textura arenosa. A fraco. Bem drenado. Relevo plano e micro relevo suave.

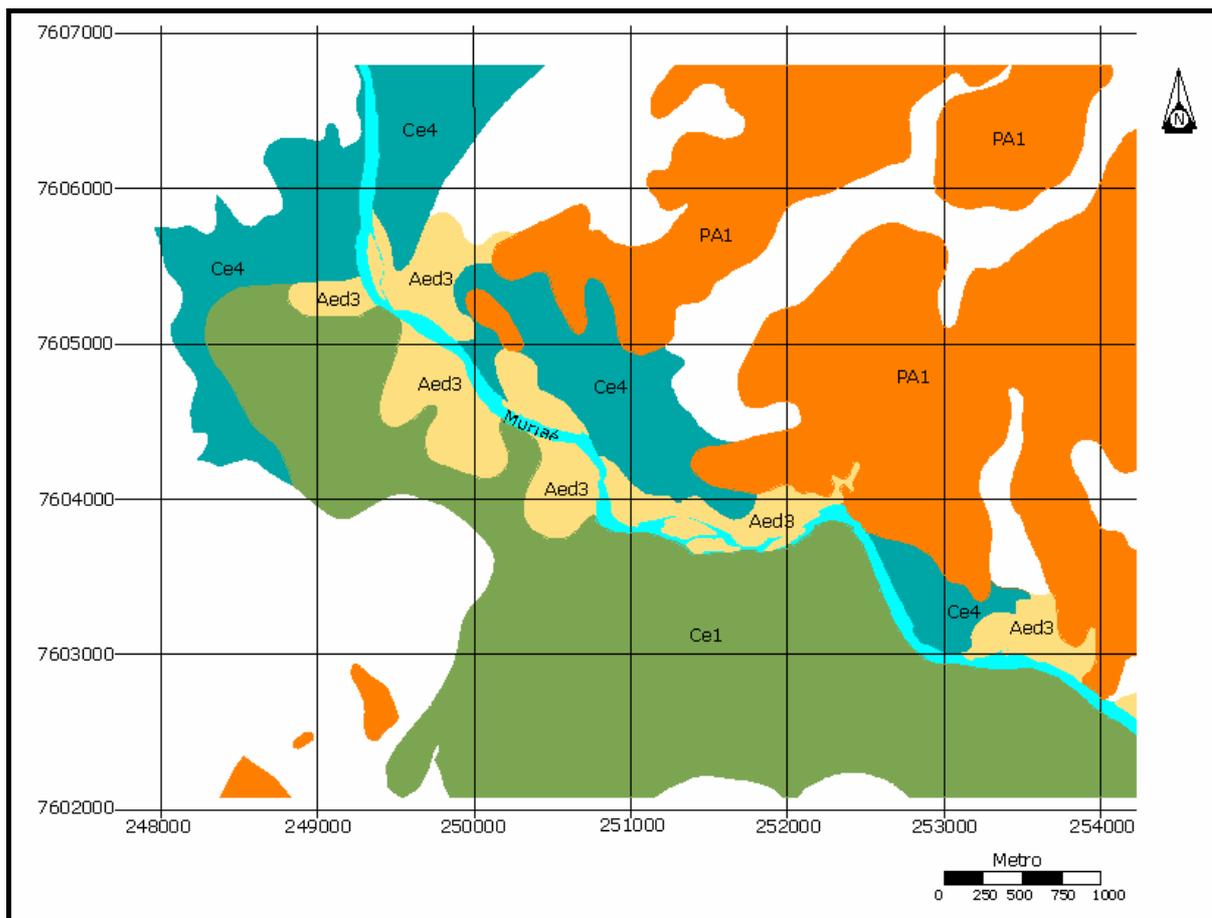


Figura 5. Área útil do mapa de solos utilizado no estudo.

3.4 Desenvolvimento do Algoritmo Utilizando os Princípios do SIG.

Para o desenvolvimento da rotina, primeiramente o arquivo que continha o banco de dados com as coordenadas geográficas na projeção UTM (Universal Transverse Mercator) das unidades de mapeamento do mapa de solos foi transformado em uma matriz de “N” linhas por 2 colunas e inserido no algoritmo, utilizando os comandos SAVE e LOAD, no ambiente MATLAB. Posteriormente, foi definido o limite da área em função da diferença entre os valores extremos das coordenadas x e y (x_{\min} e y_{\max}). Concluída essa etapa, foi definida a estrutura de localização geográfica do mapa a ser gerado, utilizando-se a função “MSTRUCT”. Os parâmetros escolhidos para aplicação dessa função foram a zona de localização da área de estudo, com base na projeção UTM para o fuso 23S e geóide de referência Clarke 66.

A forma e tamanho de um geóide, bem como sua posição relativa a um elipsóide de referência define um sistema geodésico (também designado por datum geodésico). No caso brasileiro adota-se o Sistema Geodésico Sul Americano - SAD 69, com as seguintes características:

- Elipsóide de referência - UGGI 67 (recomendado pela União Geodésica e Geofísica Internacional em 1967) definido por: semi-eixo maior - a: 6378160 m, achatamento - f: 1/298,25.

Como os parâmetros do sistema geodésico utilizado no Brasil (SAD 69) não são os mesmos do geóide Clarke 66, foram feitas correções a fim de se utilizar os mesmos parâmetros do sistema geodésico brasileiro.

Após essa etapa foi realizada a conversão das coordenadas em UTM para coordenadas geográficas, utilizando a função MINVTRAN.

3.4.1 Geração da imagem raster georeferenciada

Este processo foi realizado em três etapas: a) definição da resolução espacial da imagem raster; b) definição das dimensões do arquivo matricial; c) georeferenciamento da imagem raster.

a) Definição da resolução espacial da imagem raster

A resolução espacial mede a menor separação angular ou linear entre dois objetos. Quando se diz que um sistema possui resolução espacial de 30 m significa dizer que objetos com uma distância entre si menor que 30 m não serão discriminados pelo sistema. Nesse estudo foi adotada uma resolução espacial de 10 metros, ou seja, cada pixel da imagem raster representou uma área de 10 x 10 m do mundo real. Como o sistema de unidades de projeção do mapa gerado trabalha em graus decimais, foi determinado um fator de escala (scale) que mostra o quanto cada pixel da matriz da imagem representa no mundo real.

b) Definição das dimensões do arquivo matricial

Dados matriciais devem ser entendidos como qualquer dado armazenado, em uma estrutura de matriz retangular com N linhas x M colunas, como grades regulares ou imagens de sensoriamento remoto. Em função da resolução espacial adotada de 10 metros, foi criado um retângulo envolvente da área estudada, com dimensões de 6675m x 4650m, que foi dividido pela resolução espacial adotada, gerando uma matriz de 464 linhas por 666 colunas. A implementação dessa etapa no MATLAB foi realizada utilizando a função SIZEM que utiliza como parâmetros de entrada os valores extremos ou limites de latitude e longitude da área e o scale (limlat, limlong, scale).

c) Georreferenciamento da imagem raster

O georreferenciamento da imagem foi realizado utilizando a função MAPLEGEND, que define a localização geográfica e o tamanho da célula da matriz do mapa, utilizando como parâmetros de entrada o scale e as latitudes mais ao norte e mais ao oeste [scale maxlat minlon].

Cumprida esta etapa, as regiões de interesse dentro da matriz do mapa foram selecionadas utilizando a função ROIPOLY. Essa função gera uma imagem binária com o valor 1 dentro da área de interesse e zero fora. As regiões consideradas de interesse foram as próprias unidades de mapeamento que, posteriormente foram multiplicadas pelo valor da renda gerado utilizando as função de resposta e os índices econômicos referentes a cada cultura.

3.4.2 Renda líquida maximizada

A renda líquida maximizada de cada cultura (RLM) foi calculada considerando a equação:

$$RLM = (\text{prec} \cdot \text{pmax}') - \text{cust} - (\text{custw} \cdot \text{wmax}') \quad (1)$$

em que,

RLM = renda máxima da cultura desconsiderando os custos de adubação e calagem, em R\$ ha⁻¹;

prec = preço de venda da tonelada do produto, em R\$ ton⁻¹;

pmax = produtividade máxima em função da lâmina de água aplicada, em ton ha⁻¹;

cust = custo do processo produtivo desconsiderando os gastos com água, adubação e calagem, em R\$ ha⁻¹;

custw = custo da água, calculado conforme metodologia do CEIVAP, R\$ mm⁻¹; e

wmax = lâmina ótima que garante a produção máxima, em mm;

O valor de RLM constituiu o atributo de cada célula do mapa gerado. O mapa final de renda maximizada de cada cultura foi obtido subtraindo o valor de RLM do custo de adubação e calagem para cada cultura e para cada unidade de mapeamento, conforme apresentado na Tabela 2.

3.4.3 Apresentação das classes de renda pelo algoritmo

A apresentação de todos os mapas correspondentes aos limites de cada unidade de mapeamento em uma única imagem foi feita somando-se os mapas individuais de cada unidade de mapeamento. Para visualizar as diferentes classes de renda no mapa final, foi utilizada a ferramenta interativa COLORM que permite apresentação colorida da matriz do mapa, possibilitando separar, por meio de uma paleta de cores, as diferentes classes de valores da matriz do mapa gerado.

Para permitir a visualização do eixo de projeção, criado utilizando a função MESHM na imagem do mapa final gerado, foi utilizada a ferramenta interativa MAPTOOL, que permite a visualização dos parâmetros de localização geográfica na imagem gerada e do eixo em função do sistema de projeção. A Figura 6 apresenta o fluxograma que ilustra, de forma resumida, a metodologia utilizada para construção do algoritmo desenvolvido.

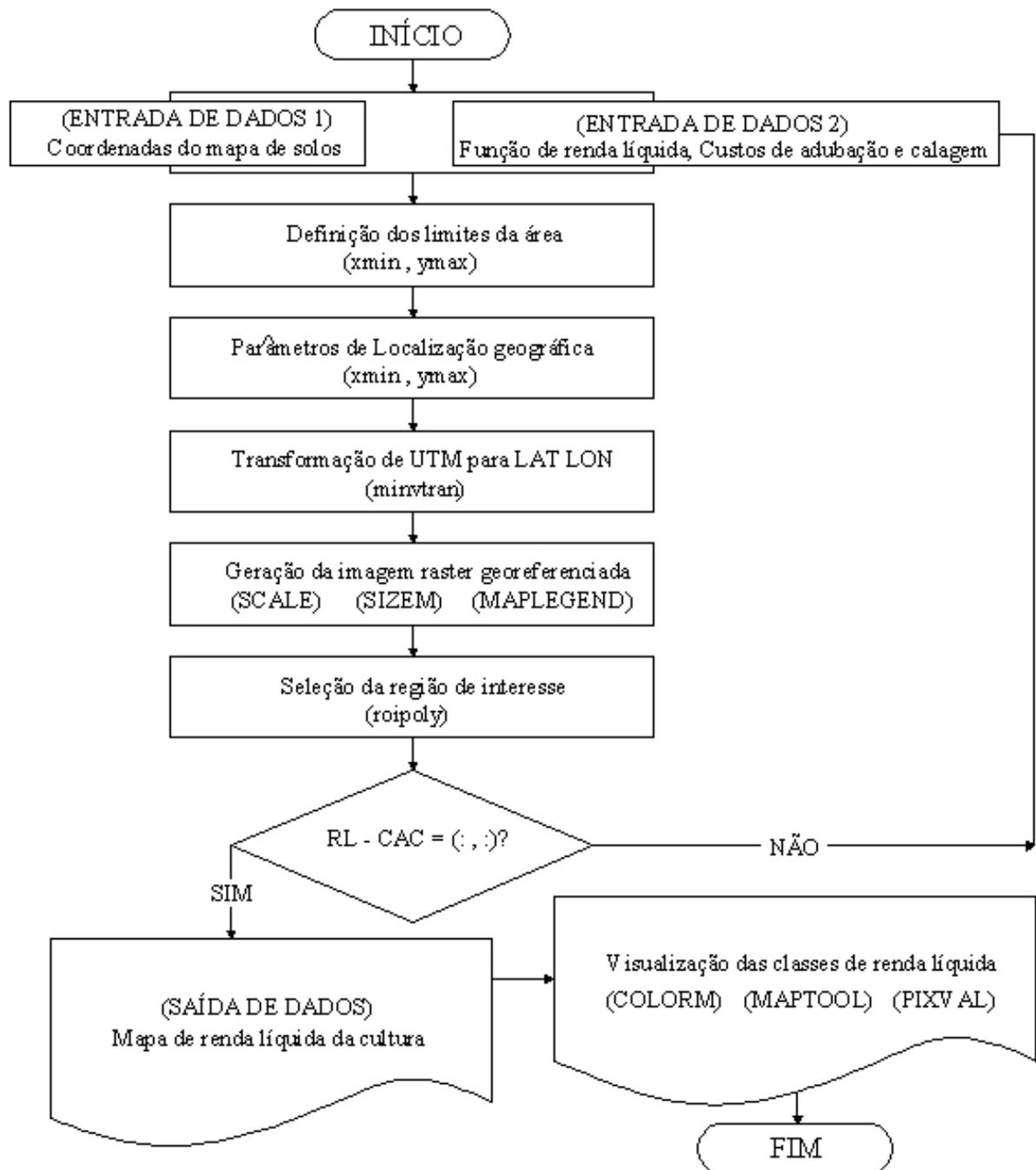


Figura 6. Fluxograma de desenvolvimento da rotina computacional.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O algoritmo desenvolvido utilizando uma linguagem de programação específica do pacote computacional MATLAB, permitiu espacializar a renda de cada uma das culturas estudadas, possibilitando a escolha das melhores áreas de cultivo, a fim de se obter a garantia de um melhor retorno econômico da área com base nos critérios técnicos adotados. O algoritmo em linguagem de programação para a cultura do abacaxizeiro está descrito abaixo:

```
clear
#####
%Matriz das coordenadas Geográficas do mapa de solos (x y)
load limite
load Ce41
load Ce42
load Ce43
load Ce44
load ARG1
load ARG2
load ARG3
load ARG4
load ARG5
load ARG06
load ARG7
load Ce1
load Aed31
load Aed32
load Aed33
load Aed34
load Aed35
load Aed36
load Aed37
load Aed38
load Aed39
load Aed310
load Aed311
load Aed312
#####
%Definição dos limites da área
xmin = min(limite(:,1));
ymax = max(limite(:,2));
close all
#####
%Definição da estrutura do mapa (Parâmetros de localização geográfica)
mstruct = defaultm('utm');
mstruct.zone = '23K';
mstruct.geoid = almanac('earth','geoid','m','clarke66');
mstruct = defaultm(utm(mstruct));
```

```

%#####
%Transformação de UTM para LAT LON
[LAT,LON] = minvtran(mstruct,limite(:,1),limite(:,2));
[lat,lon] = minvtran(mstruct,Ce41(:,1),Ce41(:,2));
[lat,lon] = minvtran(mstruct,Ce42(:,1),Ce42(:,2));
[lat,lon] = minvtran(mstruct,Ce43(:,1),Ce43(:,2));
[lat,lon] = minvtran(mstruct,Ce44(:,1),Ce44(:,2));
[lat,lon] = minvtran(mstruct,ARG1(:,1),ARG1(:,2));
[lat,lon] = minvtran(mstruct,ARG2(:,1),ARG2(:,2));
[lat,lon] = minvtran(mstruct,ARG3(:,1),ARG3(:,2));
[lat,lon] = minvtran(mstruct,ARG4(:,1),ARG4(:,2));
[lat,lon] = minvtran(mstruct,ARG5(:,1),ARG5(:,2));
[lat,lon] = minvtran(mstruct,ARG06(:,1),ARG06(:,2));
[lat,lon] = minvtran(mstruct,ARG7(:,1),ARG7(:,2));
[lat,lon] = minvtran(mstruct,Ce1(:,1),Ce1(:,2));
[lat,lon] = minvtran(mstruct,Aed31(:,1),Aed31(:,2));
[lat,lon] = minvtran(mstruct,Aed32(:,1),Aed32(:,2));
[lat,lon] = minvtran(mstruct,Aed33(:,1),Aed33(:,2));
[lat,lon] = minvtran(mstruct,Aed34(:,1),Aed34(:,2));
[lat,lon] = minvtran(mstruct,Aed35(:,1),Aed35(:,2));
[lat,lon] = minvtran(mstruct,Aed36(:,1),Aed36(:,2));
[lat,lon] = minvtran(mstruct,Aed37(:,1),Aed37(:,2));
[lat,lon] = minvtran(mstruct,Aed38(:,1),Aed38(:,2));
[lat,lon] = minvtran(mstruct,Aed39(:,1),Aed39(:,2));
[lat,lon] = minvtran(mstruct,Aed310(:,1),Aed310(:,2));
[lat,lon] = minvtran(mstruct,Aed311(:,1),Aed311(:,2));
[lat,lon] = minvtran(mstruct,Aed312(:,1),Aed312(:,2));
%#####
%Geração do mapa matricial
%Definição das dimensões do mapa matricial
scale=111000/10;%fator de escala da resolução espacial (mostra quanto cada pixel representa
no mundo real, em metros)
maxlat=max(LAT); minlat=min(LAT); maxlon=max(LON);minlon=min(LON);
limlat=[minlat maxlat]; limlon=[minlon maxlon];
[r,c] = SIZEM(limlat,limlon,scale);% define as dimensões da matriz da imagem raster
%#####
%Parâmetros das funções de produção para calculo da renda maximizada
load F % carrega a matriz dos coeficientes do custo mensal da agua
custw = [sum(0.007.*F(:,1)) sum(0.007.*F(:,2)) sum(0.007.*F(:,3)) sum(0.007.*F(:,4))];
coef = [-0.0000183 0.049058 2.3931;%Maracujá
        -0.00027 0.837 -500.84;%Cana
        -0.0003 0.9057 -506.68;%Abacaxi
        -0.000017 0.098 -88.13];%Mamão
cust = [9060.20 7728.37 6324.17 10191.6];%custo de produção sem considerar custo da água
e adubação e calagem
lâmbda = 1;
custw = custw.*lâmbda;
wmax = (-coef(:,2))./(2*coef(:,1));%wmax = -b/2a
pmax = ((-coef(:,2).^2)./(4*coef(:,1)))+coef(:,3);
prec = [340 56 230 320];%preco de venda dos produtos (R$/ton)

```

```

rl=(prec.*pmax')-cust-(custw.*wmax')% renda liquida parcial (não considera os custos de
adubação e calagem)
%#####
%Custo de adubação de calagem para a cultura do abacaxizeiro em cada unidade de
mapeamento.
CAC_Ce4=1400;
CAC_ARG = 883; % (Associação de PA1+PA5+PA6)
CAC_Ce1= 1480;
CAC_Aed3=1553;
%#####
% Renda parcial menos custo de adução e calagem
mapamamaoCe41=zeros(r,c);mapamamaoCe41(:,:)=round(rl(1,3)-CAC_Ce4);
mapamamaoCe42=zeros(r,c);mapamamaoCe42(:,:)=round(rl(1,3)-CAC_Ce4);
mapamamaoCe43=zeros(r,c);mapamamaoCe43(:,:)=round(rl(1,3)-CAC_Ce4);
mapamamaoCe44=zeros(r,c);mapamamaoCe44(:,:)=round(rl(1,3)-CAC_Ce4);
%mapamamaoARG1=zeros(r,c);mapamamaoARG1(:,:)=round(rl(1,3)-CAC_ARG);
mapamamaoARG2=zeros(r,c);mapamamaoARG2(:,:)=round(rl(1,3)-CAC_ARG);
mapamamaoARG3=zeros(r,c);mapamamaoARG3(:,:)=round(rl(1,3)-CAC_ARG);
mapamamaoARG4=zeros(r,c);mapamamaoARG4(:,:)=round(rl(1,3)-CAC_ARG);
mapamamaoARG5=zeros(r,c);mapamamaoARG5(:,:)=round(rl(1,3)-CAC_ARG);
mapamamaoARG06=zeros(r,c);mapamamaoARG06(:,:)=round(rl(1,3)-CAC_ARG);
mapamamaoARG7=zeros(r,c);mapamamaoARG7(:,:)=round(rl(1,3)-CAC_ARG);
mapamamaoCe1=zeros(r,c);mapamamaoCe1(:,:)=round(rl(1,3)-CAC_Ce1);
mapamamaoAed31=zeros(r,c);mapamamaoAed31(:,:)=round(rl(1,3)-CAC_Aed3);
mapamamaoAed32=zeros(r,c);mapamamaoAed32(:,:)=round(rl(1,3)-CAC_Aed3);
mapamamaoAed33=zeros(r,c);mapamamaoAed33(:,:)=round(rl(1,3)-CAC_Aed3);
mapamamaoAed34=zeros(r,c);mapamamaoAed34(:,:)=round(rl(1,3)-CAC_Aed3);
mapamamaoAed35=zeros(r,c);mapamamaoAed35(:,:)=round(rl(1,3)-CAC_Aed3);
mapamamaoAed36=zeros(r,c);mapamamaoAed36(:,:)=round(rl(1,3)-CAC_Aed3);
mapamamaoAed37=zeros(r,c);mapamamaoAed37(:,:)=round(rl(1,3)-CAC_Aed3);
mapamamaoAed38=zeros(r,c);mapamamaoAed38(:,:)=round(rl(1,3)-CAC_Aed3);
mapamamaoAed39=zeros(r,c);mapamamaoAed39(:,:)=round(rl(1,3)-CAC_Aed3);
mapamamaoAed310=zeros(r,c);mapamamaoAed310(:,:)=round(rl(1,3)-CAC_Aed3);
mapamamaoAed311=zeros(r,c);mapamamaoAed311(:,:)=round(rl(1,3)-CAC_Aed3);
mapamamaoAed312=zeros(r,c);mapamamaoAed312(:,:)=round(rl(1,3)-CAC_Aed3);
%#####
% Localização geográfica da matriz do mapa
maplegend = [scale maxlat minlon]; % define a resolução e localização geográfica da matriz
do mapa
%#####
% Geração de máscara
x1=xmin;
y1=ymin;
xpercol=10; yperrow=-10;%incrementos por linhas e colunas
%#####
%Construção da grade para a superfície do mapa (meshgrat)
[ygrat,xgrat]=meshgrat(max(limite(:,2)):yperrow:min(limite(:,2)),min(limite(:,1)):xpercol:ma
x(limite(:,1)));
[rowgrat,colgrat] = yx2rc(ygrat,xgrat,y1,x1,yperrow,xpercol);%yx2rc transforma coordenadas
x y para linhas (row) e colunas (column)

```

```

[rowCe41,colCe41] = yx2rc(Ce41(:,2),Ce41(:,1),y1,x1,yperrow,xpercol);
[rowCe42,colCe42] = yx2rc(Ce42(:,2),Ce42(:,1),y1,x1,yperrow,xpercol);
[rowCe43,colCe43] = yx2rc(Ce43(:,2),Ce43(:,1),y1,x1,yperrow,xpercol);
[rowCe44,colCe44] = yx2rc(Ce44(:,2),Ce44(:,1),y1,x1,yperrow,xpercol);
[rowARG1,colARG1] = yx2rc(ARG1(:,2),ARG1(:,1),y1,x1,yperrow,xpercol);
[rowARG2,colARG2] = yx2rc(ARG2(:,2),ARG2(:,1),y1,x1,yperrow,xpercol);
[rowARG3,colARG3] = yx2rc(ARG3(:,2),ARG3(:,1),y1,x1,yperrow,xpercol);
[rowARG4,colARG4] = yx2rc(ARG4(:,2),ARG4(:,1),y1,x1,yperrow,xpercol);
[rowARG5,colARG5] = yx2rc(ARG5(:,2),ARG5(:,1),y1,x1,yperrow,xpercol);
[rowARG06,colARG06] = yx2rc(ARG06(:,2),ARG06(:,1),y1,x1,yperrow,xpercol);
[rowARG7,colARG7] = yx2rc(ARG7(:,2),ARG7(:,1),y1,x1,yperrow,xpercol);
[rowCe1,colCe1] = yx2rc(Ce1(:,2),Ce1(:,1),y1,x1,yperrow,xpercol);
[rowAed31,colAed31] = yx2rc(Aed31(:,2),Aed31(:,1),y1,x1,yperrow,xpercol);
[rowAed32,colAed32] = yx2rc(Aed32(:,2),Aed32(:,1),y1,x1,yperrow,xpercol);
[rowAed33,colAed33] = yx2rc(Aed33(:,2),Aed33(:,1),y1,x1,yperrow,xpercol);
[rowAed34,colAed34] = yx2rc(Aed34(:,2),Aed34(:,1),y1,x1,yperrow,xpercol);
[rowAed35,colAed35] = yx2rc(Aed35(:,2),Aed35(:,1),y1,x1,yperrow,xpercol);
[rowAed36,colAed36] = yx2rc(Aed36(:,2),Aed36(:,1),y1,x1,yperrow,xpercol);
[rowAed37,colAed37] = yx2rc(Aed37(:,2),Aed37(:,1),y1,x1,yperrow,xpercol);
[rowAed38,colAed38] = yx2rc(Aed38(:,2),Aed38(:,1),y1,x1,yperrow,xpercol);
[rowAed39,colAed39] = yx2rc(Aed39(:,2),Aed39(:,1),y1,x1,yperrow,xpercol);
[rowAed310,colAed310] = yx2rc(Aed310(:,2),Aed310(:,1),y1,x1,yperrow,xpercol);
[rowAed311,colAed311] = yx2rc(Aed311(:,2),Aed311(:,1),y1,x1,yperrow,xpercol);
[rowAed312,colAed312] = yx2rc(Aed312(:,2),Aed312(:,1),y1,x1,yperrow,xpercol);
%#####
%Seleção da região de interesse
BWCe41=roipoly(mapamamaoCe41,colCe41,rowCe41);
BWCe42=roipoly(mapamamaoCe42,colCe42,rowCe42);
BWCe43=roipoly(mapamamaoCe43,colCe43,rowCe43);
BWCe44=roipoly(mapamamaoCe44,colCe44,rowCe44);
BWARG1=roipoly(mapamamaoARG1,colARG1,rowARG1);
BWARG2=roipoly(mapamamaoARG2,colARG2,rowARG2);
BWARG3=roipoly(mapamamaoARG3,colARG3,rowARG3);
BWARG4=roipoly(mapamamaoARG4,colARG4,rowARG4);
BWARG5 = roipoly(mapamamaoARG5,colARG5,rowARG5);
BWARG06 = roipoly(mapamamaoARG06,colARG06,rowARG06);
BWARG7 = roipoly(mapamamaoARG7,colARG7,rowARG7);
BWCe1 = roipoly(mapamamaoCe1,colCe1,rowCe1);
BWAed31 = roipoly(mapamamaoAed31,colAed31,rowAed31);
BWAed32 = roipoly(mapamamaoAed32,colAed32,rowAed32);
BWAed33 = roipoly(mapamamaoAed33,colAed33,rowAed33);
BWAed34 = roipoly(mapamamaoAed34,colAed34,rowAed34);
BWAed35 = roipoly(mapamamaoAed35,colAed35,rowAed35);
BWAed36 = roipoly(mapamamaoAed36,colAed36,rowAed36);
BWAed37 = roipoly(mapamamaoAed37,colAed37,rowAed37);
BWAed38 = roipoly(mapamamaoAed38,colAed38,rowAed38);
BWAed39 = roipoly(mapamamaoAed39,colAed39,rowAed39);
BWAed310 = roipoly(mapamamaoAed310,colAed310,rowAed310);
BWAed311 = roipoly(mapamamaoAed311,colAed311,rowAed311);
BWAed312 = roipoly(mapamamaoAed312,colAed312,rowAed312);

```

```

mapamamaoCe41=mapamamaoCe41.*BWCe41;
mapamamaoCe42=mapamamaoCe42.*BWCe42;
mapamamaoCe43=mapamamaoCe43.*BWCe43;
mapamamaoCe44=mapamamaoCe44.*BWCe44;
mapamamaoARG1=mapamamaoARG1.*BWARG1;
mapamamaoARG2=mapamamaoARG2.*BWARG2;
mapamamaoARG3=mapamamaoARG3.*BWARG3;
mapamamaoARG4=mapamamaoARG4.*BWARG4;
mapamamaoARG5=mapamamaoARG5.*BWARG5;
mapamamaoARG06=mapamamaoARG06.*BWARG06;
mapamamaoARG7=mapamamaoARG7.*BWARG7;
mapamamaoCe1=mapamamaoCe1.*BWCe1;
mapamamaoAed31=mapamamaoAed31.*BWAed31;
mapamamaoAed32=mapamamaoAed32.*BWAed32;
mapamamaoAed33=mapamamaoAed33.*BWAed33;
mapamamaoAed34=mapamamaoAed34.*BWAed34;
mapamamaoAed35=mapamamaoAed35.*BWAed35;
mapamamaoAed36=mapamamaoAed36.*BWAed36;
mapamamaoAed37=mapamamaoAed37.*BWAed37;
mapamamaoAed38=mapamamaoAed38.*BWAed38;
mapamamaoAed39=mapamamaoAed39.*BWAed39;
mapamamaoAed310=mapamamaoAed310.*BWAed310;
mapamamaoAed311=mapamamaoAed311.*BWAed311;
mapamamaoAed312=mapamamaoAed312.*BWAed312;
%#####
%Rotação da imagem em torno de um eixo usando a função mirror
mapamamaoCe41=mirror(mapamamaoCe41);
mapamamaoCe42=mirror(mapamamaoCe42);
mapamamaoCe43=mirror(mapamamaoCe43);
mapamamaoCe44=mirror(mapamamaoCe44);
mapamamaoARG1=mirror(mapamamaoARG1);
mapamamaoARG2=mirror(mapamamaoARG2);
mapamamaoARG3=mirror(mapamamaoARG3);
mapamamaoARG4=mirror(mapamamaoARG4);
mapamamaoARG5=mirror(mapamamaoARG5);
mapamamaoARG06=mirror(mapamamaoARG06);
mapamamaoARG7=mirror(mapamamaoARG7);
mapamamaoCe1=mirror(mapamamaoCe1);
mapamamaoAed31=mirror(mapamamaoAed31);
mapamamaoAed32=mirror(mapamamaoAed32);
mapamamaoAed33=mirror(mapamamaoAed33);
mapamamaoAed34=mirror(mapamamaoAed34);
mapamamaoAed35=mirror(mapamamaoAed35);
mapamamaoAed36=mirror(mapamamaoAed36);
mapamamaoAed37=mirror(mapamamaoAed37);
mapamamaoAed38=mirror(mapamamaoAed38);
mapamamaoAed39=mirror(mapamamaoAed39);
mapamamaoAed310=mirror(mapamamaoAed310);
mapamamaoAed311=mirror(mapamamaoAed311);
mapamamaoAed312=mirror(mapamamaoAed312);

```

```

%#####
%Apresentação dos diversos polígonos na mesma grade
MRL=mapamamaoCe41+mapamamaoCe42+mapamamaoCe43+mapamamaoCe44+mapama
maoARG1+mapamamaoARG2+mapamamaoARG3+mapamamaoARG4+mapamamaoARG5
+mapamamaoARG06+mapamamaoARG7+mapamamaoCe1+mapamamaoAed31+mapamam
aoAed32+mapamamaoAed33+mapamamaoAed34+mapamamaoAed35+mapamamaoAed36+
mapamamaoAed37+mapamamaoAed38+mapamamaoAed39+mapamamaoAed310mapamam
aoAed311+mapamamaoAed312;
MRL1=MRL+1;
colorm(MRL1,maplegend)
pixval 'on'
maptool(mstruct);
title 'RENDA LIQUIDA - ABACAXI'

```

O algoritmo utiliza como entrada de dados uma função de renda das culturas que foi criada com base nos coeficientes das funções de produção das culturas à água, na produtividade em função das lâminas aplicadas, no preço do produto, no custo de produção, no custo da água e nos custos de adubação e calagem. Com base nessas informações, foi possível gerar mapas de renda para cada cultura na área estudada. As Figuras 7, 8, 9, 10 e a Tabela 5, apresentam os resultados obtidos para as culturas do maracujá, da cana-de-açúcar, do abacaxi e do mamão, respectivamente.

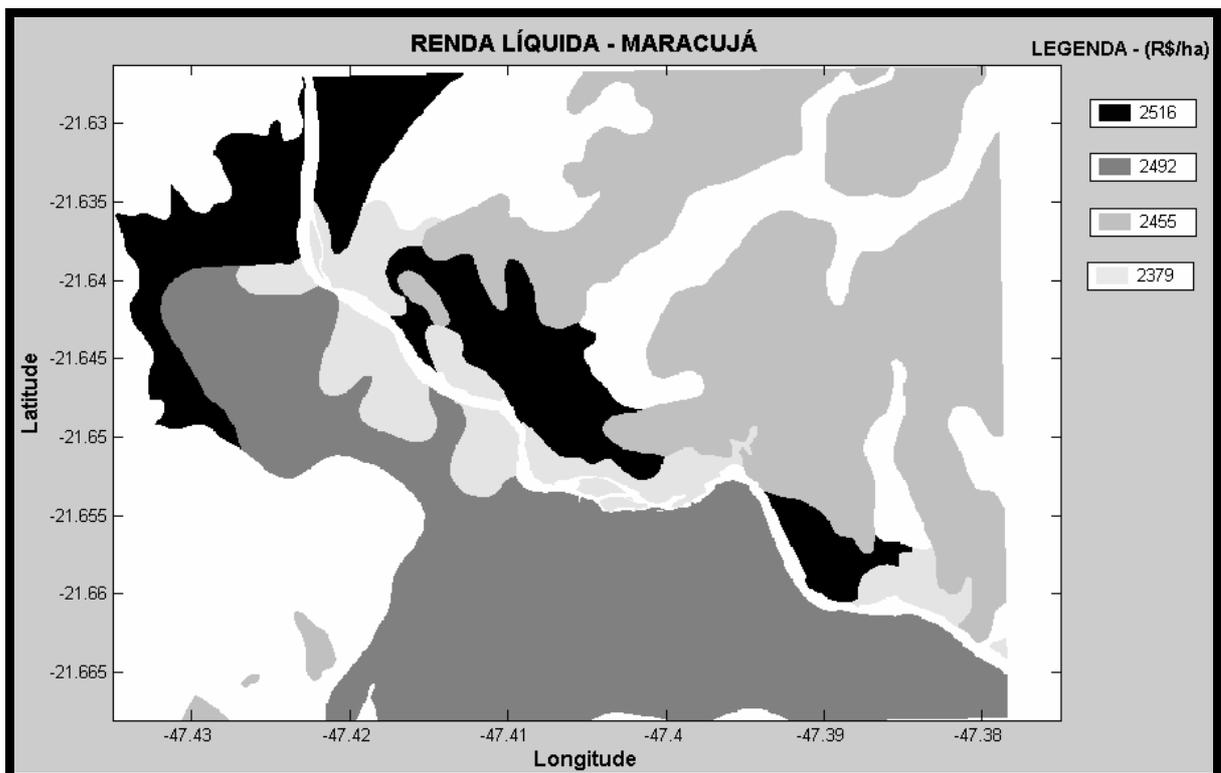


Figura 7. Tela de saída do algoritmo mostrando a renda da cultura do maracujazeiro.

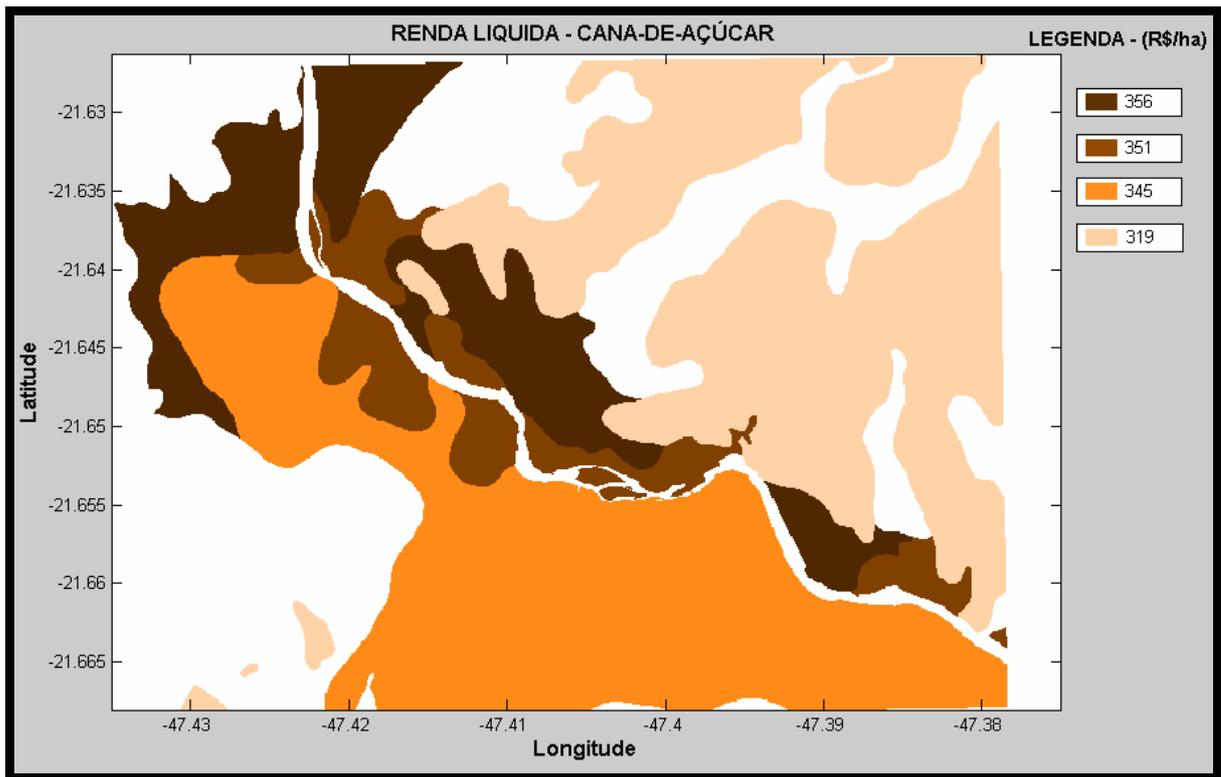


Figura 8. Tela de saída do algoritmo mostrando a renda da cultura da cana-de-açúcar.

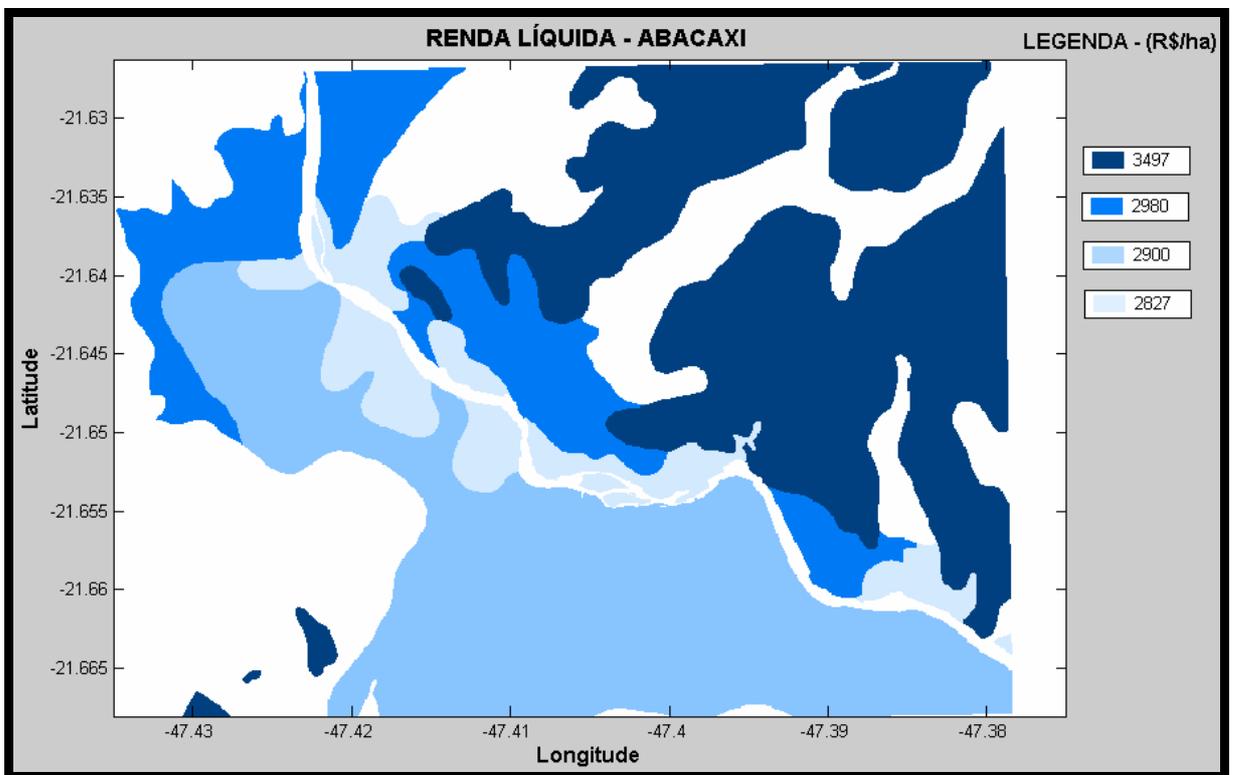


Figura 9. Tela de saída do algoritmo mostrando a renda da cultura do abacaxizeiro.

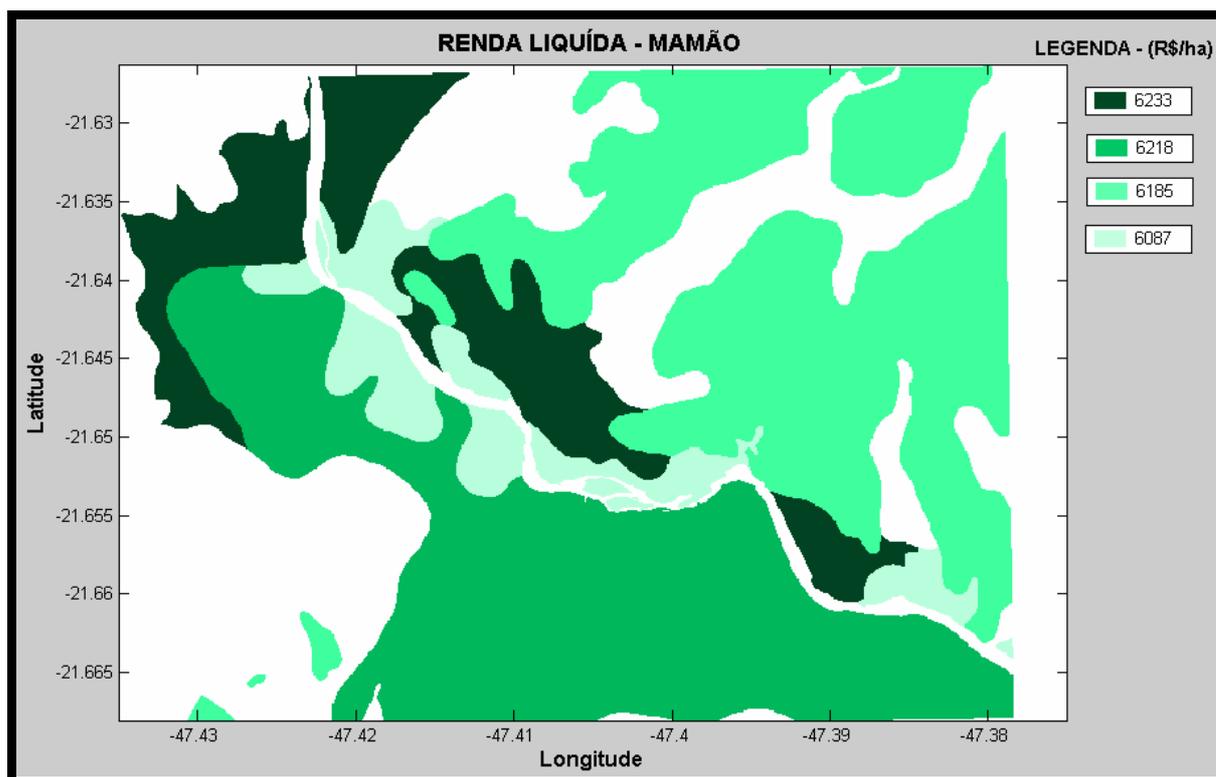


Figura 10. Tela de saída do algoritmo mostrando a renda da cultura do mamoeiro.

Tabela 5. Valores de renda das culturas nos diferentes tipos de solos.

Unidade de mapeamento	Renda (R\$ ha ⁻¹)			
	Maracujá	Cana	Abacaxi	Mamão
Ce1	2492	345	2900	6218
Ce4	2516 ⁺⁺	356 ⁺⁺	2980	6233 ⁺⁺
PA1	2455	319 ⁺	3497 ⁺⁺	6185
Aed3	2379 ⁺	351	2827 ⁺	6087 ⁺

+ = Menor valor de renda da cultura.

++ = Maior valor de renda da cultura.

A Tabela 5 apresenta os valores gerais obtidos a partir das figuras anteriores. Os resultados representam uma variação nos valores de renda das culturas nos diferentes tipos de solo da área estudada. Com exceção da cultura do abacaxi, os maiores valores ocorreram na classe de solo representado pela unidade de mapeamento Ce4, provavelmente devido às melhores características físicas e químicas que essa classe de solo apresenta quando comparada com as demais. Também foi possível notar que, com exceção da cultura da cana-de-açúcar, os menores valores de renda ocorreram na classe de solo representada pela unidade de mapeamento Aed3, devido à sua menor fertilidade natural e maior acidez quando comparada como as demais classes de solo, exigindo maiores gastos com adubação e calagem. Além disso, essa classe apresenta 66% de areia na profundidade de 0 a 0,40 m, o que favorece uma baixa retenção de água, que somadas às características químicas fazem com que o custo de produção nessa unidade seja mais elevado, contribuindo para uma menor renda das culturas.

De um modo geral, as classes de solos que indicaram menores desembolsos com correção de acidez e adubação complementar, ou seja, as de melhor fertilidade natural, e

características físicas que contribuem para uma maior retenção de umidade no solo, como textura mais argilosa e teores de matéria orgânica mais elevado, contribuíram para aumento da renda. Como exemplo, tem-se a classe representada pela unidade de mapeamento Ce4. Por um outro lado quando a classe apresenta uma menor fertilidade natural combinada com características físicas que contribuem para uma baixa retenção de água no solo, como textura mais arenosa, a renda nessa classe foi menor, tendo como exemplo a classe representada pela unidade de mapeamento Aed3.

Uma análise de sensibilidade para a cultura da cana-de-açúcar mostrou que só seria viável o seu plantio se o preço da tonelada por hectare fosse de no mínimo R\$ 56,00. Quando foi adotado o preço de 24,5 R\$ t⁻¹, recomendado pelo AGRIANUAL (2004), o algoritmo não sugeriu plantar essa cultura na área considerando o cenário adotado e utilizando os índices do processo produtivos considerados nesse estudo. A variação na renda foi mais influenciada pelas características dos diferentes tipos de solo do que pelo custo da água, devido ao baixo custo da água para irrigação adotada pelo Comitê para Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (CEIVAP).

Os resultados apresentados na Tabela 5 e nas Figuras de 7 a 10 possibilitam escolher a melhor opção de plantio de forma a se obter as melhores rendas na área estudada, mostrando que a metodologia aqui adotada pode ser uma ferramenta útil no planejamento da agricultura irrigada. Vale lembrar que procedimento semelhante pode ser implementado para outras culturas, desde que sejam conhecidas suas funções de resposta à água.

As culturas do mamão e do abacaxi apresentaram os melhores desempenhos quando comparadas com as demais, provavelmente devido ao menor custo de produção, maior eficiência no uso da água e melhores preços de venda da produção.

Os resultados da metodologia empregada são semelhantes aos encontrados por Silva (2003) e Silva et al. (2005) que, utilizando o SIG IDRISI em áreas de assentamentos rurais nas regiões norte e noroeste do estado do Rio de Janeiro, selecionaram áreas e culturas de modo a se obter os maiores retornos econômicos de cultivos irrigados com base em características edafoclimáticas. Os autores trabalharam com as culturas do coqueiro anão, maracujazeiro, alface e cenoura.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados encontrados utilizando a metodologia proposta, foi possível obter as seguintes conclusões:

a) o algoritmo criado com base nas funções de produção das culturas à água mostrou-se adequado na espacialização da renda das culturas estudadas;

b) as culturas do mamão e do abacaxi apresentaram as maiores rendas quando comparadas com as do maracujá e cana-de-açúcar;

c) as características físicas e químicas das diferentes classes de solos e as diferenças nas exigências nutricionais de cada cultura influenciaram na variação da renda ;

d) A rotina computacional permitiu selecionar as melhores áreas e culturas de modo a se obter os maiores retornos econômicos dos cultivos irrigados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSAD, E. D.; SANO, E. E. **Sistemas de informações geográficas (Aplicações na Agricultura)**. Brasília-DF: Serviços de Produção de Informação-SPI. EMBRAPA-CPAC., 274p. 1993.

ASSAD, E. D.; SANO, E. E. **Sistemas de informações geográficas (Aplicações na Agricultura)**. 2. ed. Brasília-DF: Serviços de Produção de Informação-SPI. EMBRAPA-CPAC., 434p. 1998.

BOWMAN, J. A.; SIMMONS, F. W.; KIMPEL, B. C. Irrigation in midwest: Lessons from Illinois. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, New York: ASCE, v.117, n.5, p. 700-715, 1991.

BURROUGH, P. Principles of geographical information Systems for land resources assessment. (**Monographs on soil and resources survey**). Oxford-Great Britain: Oxford University Press,. 194p. 1990.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. **Princípios básicos em geoprocessamento. In: Sistemas de Informações Geográficas (Aplicações na Agricultura)**. 2. ed. Brasília-DF: Serviço de Produção de Informação-SPI. EMBRAPA-CPAC., 434p. 1998.

CARVALHO, D. F.; BONOMO, R.; GRIEBELER, N; RIBEIRO, A. Estimativa da demanda máxima de irrigação e da duração do ciclo para a cultura do milho (*Zea mays L.*), na bacia do rio Verde Grande (MG). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras-MG, v. 22, n.1, p.97-104, 1998.

CARVALHO, D. F.; CRUZ, E. S.; MOREIRA, J. F. Disponibilidade climática no Estado do Rio de Janeiro, visando a elaboração de projetos de irrigação. **In: XXX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, 2001, Foz do Iguaçu-PR. Anais... Cascavel-PR: Unioeste, 2001. 1 CD-Rom.

CARVALHO, D. F.; FARIA, R. A.; SOUSA, S. A. V.; BORGES, H. Espacialização do período de veranico para diferentes níveis de perda de produção na cultura do milho (*Zea mays L.*), na bacia do rio Verde Grande (MG). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande-PB, v. 4, n.2, p.172-176, 2000.

CEDDIA, M. B. **Zoneamento agroambiental e indicadores de sustentabilidade como subsídio ao planejamento agrícola do município de Paty do Alferes, RJ**. 2000. 297 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - UFRRJ, Seropédica - RJ, 2000.

CRISTOFIDIS, D. Recursos hídricos dos cerrados e seu potencial de utilização na agropecuária. In: XXXII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2003, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2003. 1 CD.

DE-POLLI, H. et al. **Manual de adubação para o estado do Rio de Janeiro**. Itaguaí-RJ: UFRRJ., 179p. 1988. (Coleção UFRRJ: Ciências Agrárias, n. 2).

FARIAS, R. A, et al. Economia de água e energia em projetos de irrigação suplementar no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v.6, n.2, p. 189-194, 2002.

INPE, 2006. Disponível em: <www.dpi.inpe.br/terraview/docs/pdf/DadosRaster>. Acesso em: 23 nov. 2006.

HILLEL, D. Role of irrigation in agricultural systems. In: STEWART, B. A.; NIELSEN, D. R. (eds). **Irrigation of agricultural crops**. Madison: American Society of Agronomy., p. 5-30. 1990.

MARTORANO, L. G. et al. Zoneamento agroecológico para a região de Ribeirão Preto utilizando um sistema de informações geográficas. **Scientia Agrícola**, Piracicaba-SP, v.56, n.3, p.739-747, 1999.

PETERSEN, G. W. Geografic Information Systems in Agronomy. **Advances in Agronomy**. New York: Academic Press, v.55. p. 67–111p. 1995.

RODRIGUEZ, J. A.: LOPEZ, G. **Resource planning for modernising rice production systems using computer simulation models and GIS**. Havana, v. 15, p. 181-194, 2000.

SILVA, W. A.; CARVALHO, D. F.; MOREIRA, J. F. Comparação entre diferentes metodologias de estimativa da evapotranspiração de referência e sua influência na demanda máxima de irrigação para o milho (*Zea mays* L.) no Estado do Rio de Janeiro. In: **XXXI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, 2002, Salvador-BA. Anais... Salvador-BA: UFBA, 2002. 1 CD-Rom.

SILVA, W. A. **Planejamento de Áreas Irrigadas em Assentamentos Rurais Utilizando os Sistemas de Informações Geográficas**. 2003. 82 f. URRJ. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – UFRRJ, Seropédica – RJ, 2003.

SILVA, W. A.; CARVALHO, D. F.; CEDIA M. B. Estimativa do custo de implantação da agricultura irrigada, utilizando o sistema de informação geográfica. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal-SP, v. 25, n. 2, p. 395-408, 2005.

RIBEIRO, C. A.; VARELLA, C. A.; SENA JUNIOR, D. G.; SOARES, V. P. Sistemas de Informações Geográficas. In: **Agricultura de precisão**. Viçosa-MG: UFV, 2000. cap.18, p. 381- 467.

WEGNER, I. R.; WEBER, E.; HASENACK, H. **Aplicação de SIG na análise da variação na qualidade de terras de diferentes lotes de um assentamento da reforma agrária**. Disponível em: < <http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo/publicacoes.php>>. Acesso em: 25 jun. 2005.

CONCLUSÕES GERAIS

Com base nas informações geradas no presente estudo foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

a) A bacia do rio Muriaé apresenta grande potencial para o desenvolvimento da agricultura irrigada na região estudada;

b) Ao se utilizar critérios de outorga variável ao longo do ano pode-se disponibilizar maiores volumes de água para fins de outorga, sem comprometer a vazão ecológica do rio Muriaé;

c) A programação matemática se mostrou uma ferramenta importante na maximização da renda de cultivos irrigados;

d) O método Lagrangiano Aumentado se mostrou eficiente na resolução de problemas de maximização de renda em cenários hidroagrícolas, e pode ser utilizado como alternativa aos métodos existentes;

e) O algoritmo de SIG desenvolvido utilizando a metodologia proposta foi capaz de espacializar a renda líquida das culturas estudadas, podendo ser utilizado para outras culturas e regiões.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O algoritmo desenvolvido visando à espacialização da renda dos cultivos irrigados, utilizou como elementos de localização geográfica apenas as informações referentes às classes de solos representadas por cada unidade de mapeamento. Novos estudos podem ser realizados utilizando novos elementos, como por exemplo a distância do ponto de captação de água para irrigação, o modelo digital de elevação do terreno, etc., fazendo com que haja variação nos valores de renda dentro da área de cada unidade de mapeamento e não apenas entre cada unidade, como mostrado nesse estudo. Uma boa aproximação dessa recomendação foi realizada utilizando o SIG IDRISI por Silva (2003) e Silva et al. (2005).

ANEXO

Tabela 1. Coeficientes de custo de produção para a cultura da cana-de-açúcar irrigada.

ESPECIFICAÇÃO	UND	V. UNT.	QDE	ANO 0	QDE	ANO 1	QDE	ANO 2
SAÍDAS								
1. Mudás	t	35,25	10,00	352,50	0,00	0,00	0,00	0,00
2. Fertilizantes								
Calcário	t	40,00	0,72	28,80	0,00	0,00	0,00	0,00
05-30-20	t	750,00	0,33	245,25	0,00	0,00	0,00	0,00
15-00-20	t	650,00	0,00	0,00	0,26	169,00	0,26	169,00
3. Defensivos								
Herbicidas	L.kg-1	30,00	4,00	120,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Herbicidas pré-emergência	kg	30,00			1,70	51,00	1,50	45,00
4. Outros insumos e serviços								
					1000,0			
Energia	kW.h-1	0,18	1000,00	180,00	0	180,00	1.000,0	180,00
Análise do solo	UD	0,00	1,00	0,00		0,00		
EPI	UD	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Corte	t	2,20			120,00	264,00	110,00	242,00
Embarque	t	1,00			120,00	120,00	110,00	110,00
Transporte	t	2,90	0,00	0,00	120,00	348,00	110,00	319,00
5. Operações Mecanizadas								
Aração	H/T	25,00	4,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Calagem	H/T	25,00	1,00	25,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sulcação/Plantio	H/T	25,00	2,00	50,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gradagem	H/T	25,00	2,00	50,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Capina química	H/T	25,00	1,00	25,00	1,00	25,00	1,00	25,00
Cultivo mecânico	H/T	25,00	2,00	50,00				
Adubação / cultivo mecânico	H/T	25,00			2,00	50,00	2,00	50,00
Capina química – pré-emergência	H/T	25,00			2,00	50,00	1,00	25,00
6. Mão-de-obra								
Adubação de cobertura	D/H	12,00	3,00	36,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Adubação de fundação	D/H	12,00	3,00	36,00				
Preparo das mudas	D/H	12,00	3,00	36,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Capina manual (repassé)	D/H	12,00	2,00	24,00	2,00	24,00	2,00	24,00
Irrigação	D/H	12,00	8,00	96,00	8,00	96,00	8,00	96,00
7. Equipamento de irrigação								
	UD	2500,00	1,00	2.500,00				
8. Terra								
	ha	2.500,00	1,00	2.500,00				
9. Outros								
Administração	%	5,00%	2327,50	116,38	2327,5	116,38	2327,5	116,38

Impostos	%	2,30%	2327,50	53,53	2327,5	53,53	2327,5	53,53
Entradas								
1. Receita bruta esperada (Continuação)	t	24,50	0,00	0,00	120,0	2.940,00	110,0	2.695,00
2. Valor residual da terra	ha	2.500,00		0,00				
3. Valor residual do equipamento de irrigação	UD	2.500,00		0,00				
FLUXO DE CAIXA				-6.624,5	1.393,09	1.240,09		

Fonte: AGRIANUAL (2004)

Tabela 2. Coeficientes de custo de produção para a cultura do abacaxizeiro irrigado.

ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE	V. UNT.	QDE	ANO1	QDE	ANO2
SAÍDAS						
1. Mudas	MIL	100,00	50,00	5.000,00	0,00	0,00
2. Fertilizantes						
Nitrogênio (uréia)	t	800,00	1,30	1.040,00	0,00	0,00
Matéria orgânica	m ³	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Calcário	t	80,00	2,00	160,00	0,00	0,00
Clorero de potássio	t	620,00	1,10	682,00	0,00	0,00
Superfosfato simples	t	460,00	0,75	345,00	0,00	0,00
Micronutrientes	kg.L ⁻¹	10,00	2,00	20,00	0,00	0,00
3. Defensivos		0,00				
Formicidas e cupinicidas	kg	11,00	2,00	22,00	0,00	0,00
Espalhante adesivo	L	7,50	4,00	30,00	0,00	0,00
Inseticidas e acararicidas	L/kg	40,00	7,00	280,00	0,00	0,00
Fungicidas	kg	40,00	5,00	200,00	0,00	0,00
Herbicidas	L	74,00	6,00	444,00	0,00	0,00
4. Outros insumos e serviços						
Energia	kW.h ⁻¹	0,18	1200,00	216,00	45,0	81,00
Análise de solo	UD	20,00	1,00	20,00	0,00	
Pulverizador	UD	95,00	2,00	190,00	0,00	0,00
Indutor floral	L	98,00	1,00	98,00	0,00	0,00
Fretes	t	25,00	0,00	0,00	50,00	1.250,00
5. Operações mecanizadas						
Aração	H/T	35,00	4,00	140,00	0,00	0,00
Calagem	H/T	35,00	2,00	70,00	0,00	0,00
Gradagem	H/T	35,00	4,00	140,00	0,00	0,00
Sulcamento	H/T	35,00	2,00	70,00	0,00	0,00
6. Mão-de-obra						
Calagem	D/H	15,00	1,00	15,00	0,00	0,00
Tratamento fitossanitário das mudas	D/H	15,00	12,00	180,00	0,00	0,00
Plantio e replantio	D/H	15,00	40,00	600,00	0,00	0,00

Capina	D/H	15,00	6,00	90,00	2,00	30,00
Eliminação de plantas	D/H	15,00	3,00	45,00	1,00	15,00
Seleção de mudas	D/H	15,00	3,00	45,00	0,00	0,00
Irrigação	D/H	15,00	15,00	225,00	5,00	75,00
(Continuação)						
Indução floral mecânica	D/H	15,00	4,00	60,00	1,00	15,00
Colheita	D/H	15,00	0,00	0,00	38,00	570,00
Controle fitossanitário	D/H	15,00	21,00	315,00	0,00	0,00
Adubação	D/H	15,00	10,00	150,00	0,00	0,00
7. Equipamentos de irrigação	KIT	2.500,00	1,00	2.500,00	0,00	0,00
8. Terra	ha	3.000,00	1,00	3.000,00		
9. Outros						
Administração	%	5,00%	1414,15	70,71	547,00	27,35
Impostos e taxas	%	2,30%	1414,15	32,53	547,00	12,58
ENTRADAS						
1. Receita bruta esperada	t	230,00	0,00	0,00	50,00	11.500,00
2. Valor residual da terra	ha	3.000,00			1,00	3.000,00
3. Valor residual do equipamento de irrigação	KIT	2.500,00				2.000,00
4. Valor de venda de mudas	MIL	100,00			50,00	5.000,00

Fonte: AGRIANUAL (2004)

Tabela 3. Coeficientes de custo de produção para a cultura do maracujazeiro irrigado.

	UND	V. UNT.	V. UNT.	QDE	ANO 1	QDE	ANO 2
SAÍDAS							
1. Mudas	MIL	160,00	160,00	0,90	144,00	0,00	0,00
2. Fertilizantes							
Nitrogênio (uréia)	t	800,00	800,00	0,40	320,00	0,45	360,00
Matéria orgânica	m ³	30,00	30,00	20,00	600,00	0,00	0,00
Calcário	t	80,00	80,00	3,00	240,00		0,00
Cloreto de potássio	t	620,00	620,00	0,60	372,00	0,75	465,00
Superfostato simples	t	460,00	460,00	0,25	115,00	0,40	184,00
FTE BR 12	SC/25kg	34,00	34,00	2,00	68,00	0,00	0,00
3. Defensivos			0,00				
Fornicidas e cupinidas	kg	11,00	11,00	3,00	33,00	0,00	0,00
Espalhante adesivo	L	7,50	7,50	2,50	18,75	2,50	18,75
Inseticidas e acaricidas	L	40,00	40,00	3,00	120,00	2,00	80,00
Fungicidas	kg	30,00	30,00	10,00	300,00	6,00	180,00
Herbicidas	L	15,00	15,00	6,00	90,00	2,00	30,00
4. Outros insumos e serviços							
Energia	KW.h ⁻¹	0,18	0,18	944,44	170,00	45,0	81,00
Análise de solo	UD	20,00	20,00	1,00	20,00	0,00	
Pulverizador	UD	95,00	95,00	2,00	190,00	0,00	0,00
Sacarias e embalagens	MIL	50,00	50,00	0,30	15,00	0,00	0,00

Fretes	t	18,00	18,00	18,00	324,00	32,00	576,00
Estacas e mourões de 2,60m	DÚZIA	76,00	76,00	52,00	3.952,00	0,00	0,00
Arame ovalado	km	120,00	120,00	3,50	420,00	0,00	0,00
Barbante	kg	4,10	4,10	3,00	12,30	0,00	0,00
5. Operações mecanizadas							
Aração (continuação)	H/T	35,00	35,00	4,00	140,00	0,00	0,00
Calagem	H/T	35,00	35,00	2,00	70,00	0,00	0,00
Gradagem	H/T	35,00	35,00	4,00	140,00	0,00	0,00
6. Mão-de-obra							
Calagem	D/H	15,00	15,00	1,00	15,00		0,00
Coveamento	D/H	15,00	15,00	14,00	210,00	0,00	0,00
Plantio e replantio	D/H	15,00	15,00	3,00	45,00	0,00	0,00
Roçada e capina	D/H	15,00	15,00	6,00	90,00	4,00	60,00
Desbrota/poda/condução	D/H	15,00	15,00	29,00	435,00		0,00
Polinização	D/H	15,00	15,00	30,00	450,00	40,00	600,00
Irrigação	D/H	15,00	15,00	10,00	150,00	5,00	75,00
Montagem de espaldeiramento	D/H	15,00	15,00	30,00	450,00	0,00	0,00
Serviço de colheita/embalagem	D/H	15,00	15,00	40,00	600,00	80,00	1.200,00
Controle fitossanitário	D/H	15,00	15,00	20,00	300,00	13,00	195,00
Adução de cobertura	D/H	15,00	15,00	12,00	180,00	4,00	60,00
7. Equipamentos de irrigação	KIT	3.000,00	3.000,00	1,00	3.000,00	0,00	0,00
8. Terra	HÁ	3.000,00	3.000,00	1,00	3.000,00		
9. Outros							
Administração	%	5,00%	5,00%	4400,0	220,00	4400,00	220,00
Impostos e taxas	%	2,30%	2,30%	4400,0	101,20	4400,00	101,20
ENTRADAS							
						25.000,0	
1. Receita bruta esperada	kg	0,33	0,33	15000,	4.950,00	0	8.250,00
2. Valor residual da terra		3.000,00	3.000,00			1,00	3.000,00
3. Valor residual da irrigação		3.000,00	3.000,00				2.000,00
4. Valor residual do espaldeiramento		4.822,00	4.822,00				4.822,00

Fonte: AGRIANUAL (2004)

Tabela 4. Características químicas e hídras das amostras de solo que representam a unidade de mapeamento (Ce1).

Profundidade (cm)	pH (Água)	P (mg.kg ⁻¹)	K (mg.kg ⁻¹)	Na (mg.kg ⁻¹)	Ca (mmol _c .dm ⁻³)	Mg (mmol _c .dm ⁻³)	Al (mmol _c .dm ⁻³)	CC (% peso)	PMP (% peso)
0 – 30	6,3	24	332	0,13	5,1	3,5	0,0	31,1	19,2
30 – 60	5,8	22	109	0,15	4,0	3,4	0,1	31,2	20,7

Fonte: Sousa (1997).

Tabela 5. Características químicas e hídras das amostras de solo que representam a unidade de mapeamento (Ce4).

Profundidade (cm)	pH (Água)	P (mg.kg ⁻¹)	K (mg.kg ⁻¹)	Na (mg.kg ⁻¹)	Ca (mmol _c .dm ⁻³)	Mg (mmol _c .dm ⁻³)	Al (mmol _c .dm ⁻³)	CC (% peso)	PMP (% peso)
0 – 25	6,1	30	340	0,20	6,0	3,9	0,0	34,1	12,2
25 – 50	5,7	28	110	0,25	5,1	3,7	0,0	34,2	23,7

Fonte: IAA/PLANALSUCAR (1982).

Tabela 6. Características químicas e hídras das amostras de solo que representam a unidade de mapeamento (PA1).

Profundidade (cm)	pH (Água)	P (mg.kg ⁻¹)	K (mmol _c /g)	Mg (mg.kg ⁻¹)	Ca (mg.kg ⁻¹)	Na (mmol _c /kg)	AL (mmol _c /kg)	CC (%vol)	PMP (%vol)
0 – 20	5,6	21	0,79	12	20	0,3	0	12,16	6,05
20 - 40	5,4	6	0,28	12	12	0,3	0	13,09	6,76

Fonte: Martins (1998).

Tabela 7. Características químicas e hídras das amostras de solo que representam a unidade de mapeamento (Aed3).

Profundidade (cm)	pH (Água)	P (mg.dm ⁻³)	K (mg.dm ⁻³)	Mg (cmol _c .d ⁻³)	Ca (cmol _c .d ⁻³)	Na (cmol _c .d ⁻³)	AL (cmol _c .d ⁻³)	CC (%vol)	PMP (%vol)
0 – 20	5,1	6,75	63,50	0,95	2,28	0,08	0,23	15,06	6,71
20 - 40	4,9	3,50	25,50	0,78	1,88	0,04	0,40	16,41	6,63

Fonte: Rego Filho (2002).