Marco Olívio Morato de Oliveira

Avaliação de projetos de fruticultura irrigada aplicada a pequenas propriedades rurais do município de Botucatu-SP.

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos de qualificação no curso de mestrado em Hidráulica e Saneamento

Orientadora: Prof. Dr. Luisa Fernanda Ribeiro Reis

São Carlos
2008

*À todos que contribuíram para
realização deste trabalho, com
amizade, apoio e conhecimento,
porém principalmente aos meus
pais, minha esposa e minha
querida sobrinha.*

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **MARCO OLÍVIO MORATO DE OLIVEIRA**

Dissertação defendida e julgada em 27/06/2008 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Titular **LUISA FERNANDA RIBEIRO REIS (Orientadora)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) Aprovado

Prof. Dr. **EDUARDO MARIO MENDIONDO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) Aprovada

Dr.^a. **REGINA CÉLIA DE MATOS PIRES**
(Instituto Agronômico de Campinas) Aprovado

Prof. Associado **MARCELO ZAIAT**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia (Hidráulica e Saneamento)

Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

AGRADECIMENTOS

À professora Luisa Fernanda Ribeiro Reis, pela incansável orientação e amizade.

Ao inspirador professor Fazal, exemplo de professor e ser humano.

Aos colegas da secretaria, especialmente, Sá e Pavi, pela amizade e incansável paciência.

Aos colegas de laboratório e do programa, em especial Madalena, Glauce, Paulo, Fernando, Fausto, Sérgio, Thiago, Milena e Alice, pelos momentos únicos e amizade.

Aos amigos do Escritório de Regional de Desenvolvimento Rural de Botucatu da Coordenadoria de Assistência Técnica do Estado de São Paulo, da Comercial Agrícola Centro Oeste pela ajuda e carinho

À família Azeredo, que me acolheu e me acompanhou.

À todos os demais professores, colegas e funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP.

RESUMO

OLIVEIRA, M.O.M. (2008). Avaliação de projetos de fruticultura irrigada aplicada a pequenas propriedades rurais do município de Botucatu-SP. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

A produção de alimentos, de grande importância para a humanidade, é realizada por meio de processos produtivos muitas vezes responsáveis pelo consumo desordenado de recursos naturais. Tais atividades também são consideradas de alto risco econômico, pois utilizam, em sua maioria, técnicas de baixo rendimento, culturas inapropriadas e até mesmo a utilização de técnicas avançadas, sem o devido controle, como a irrigação, acarretam desperdício de recursos. O uso de técnicas multiobjetivo permite um ordenamento de sistemas produtivos sendo capaz de levar em conta critérios muitas vezes conflitantes e essenciais para a produção agrícola, como: retorno econômico da atividade ao produtor, impacto ambiental, geração de emprego e aproveitamento da mão de obra. O objetivo do presente trabalho é utilizar a técnica multiobjetivo SPEA – *Strenght Pareto Evolutionary Algorithm* - no auxílio ao produtor rural quanto à tomada de decisão, oferecendo uma alternativa para a gestão de processos produtivos em propriedades rurais do Estado de São Paulo. As técnicas multiobjetivo foram empregadas para obter a ordenação em relação ao tipo de sistema de irrigação a ser adotado, cultura de frutíferas a ser empregada e seus possíveis desempenhos. Investiga-se também o impacto do valor unitário a ser aplicado pelo uso da água de irrigação.

Os resultados obtidos permitiram confirmar que a técnica multiobjetivo utilizada se mostrou adequada para as condições adotadas neste trabalho, sendo a cultura da atemóia e o sistema de irrigação por gotejamento as que mais se destacaram em termos de viabilidade econômica de acordo com os parâmetros utilizados.

Palavras chave: Planejamento agrícola, recursos hídricos, tomada de decisão, multiobjetivo.

ABSTRACT

OLIVEIRA, M.O.M. (2008). Evaluation of projects of irrigated fruticultura applied the small country properties of the city of Botucatu-SP. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

Food production, of great importance to humanity, is realized through agricultural activities, responsible for disorderly consumption of natural resources. Those activities are considered of high economic risk, for using low yield techniques, inappropriate crops, and even using advanced techniques, such as irrigation, without proper control, leading to natural resources waste. The use of multiobjective techniques allows the ordering of productive systems, being able to consider conflicting criteria such as: economic income, environmental impact, employment generation and workforce utilization. The objective of this study is to use the multiobjective optimization technique SPEA - *Strength Pareto Evolutionary Algorithm* – to auxiliate rural producers concerning to decision making, offering an alternative for productive process management for small agricultural properties from São Paulo Estate, Brazil. The multiobjective techniques were used to obtain the ranking of irrigation system to be adopted, fruit crop and related performance. This work also studies the impact of unit cost to be applied for irrigation water. The results confirmed that the multiobjective technique used was appropriate to the actual conditions of this work, and atemoya crop in a drip irrigation the one that stood out as the best economic performance according to adopted parameters.

Keywords: agricultural planning, water resources, decision making, multiobjective

Lista de Figuras

		Página
Figura 2.1	Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo no Estado de São Paulo	3
Figura 2.2	Localização da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos	4
Figura 2.3	Unidades hidrográficas principais da Unidade de Gerenciamento de Recursos	4
Figura 3.1	Ameixa	7
Figura 3.2	Atemóia	8
Figura 3.3	Caqui	9
Figura 3.4	Goiaba	10
Figura 3.5	Pêssego	11
Figura 3.6	Maçã	12
Figura 4.1	Aspersor rotativo de impacto	19
Figura 4.2	Microaspersor	21
Figura 4.3	Sistema de irrigação por gotejamento	22
Figura 4.4	Sistema de irrigação por superfície	25
Figura 5.1	Conceito de soluções ótimas de Pareto	32
Figura 5.2	Classificação dos modelos de otimização multiobjetivo convencionais	33
Figura 5.3	Procedimento de obtenção de soluções não dominadas	34
Figura 5.4	Otimização multiobjetivo baseada em preferência	35
Figura 6.1	Figura representativa sistema de irrigação por gotejamento e microaspersão, 4x2	65
Figura 6.2	Figura representativa sistema de irrigação por gotejamento em culturas de 6x4	66
Figura 6.3	Esquema representativo do sistema de irrigação de aspersão	75
Figura 6.4	Balanço Hídrico Climatológico Botucatu-SP	77
Figura 6.5	Máscara da planilha de cálculo Balanço Hídrico Climatológico	78
Figura 7.1	Gráfico de desempenho das culturas economicamente viáveis, sem custo para água	100
Figura 7.2	Gráfico de desempenho dos sistemas de irrigação, sem custo para água	100
Figura 7.3	Gráfico relação F1 e F2 em condições de preço mínimo e sem cobrança de água	102
Figura 7.4	Gráfico relação F1 e F3 em condições de preço mínimo e sem cobrança de água	102
Figura 7.5	Relação F1 e F4 em condições de preço mínimo e sem cobrança de água	103
Figura 7.6	Gráfico de desempenho das culturas economicamente viáveis, US\$ 5,00 por mil m ³	104
Figura 7.7	Gráfico de desempenho dos sistemas de irrigação, US\$ 5,00 por mil m ³ .	104
Figura 7.8	Relação F1 e F2 em condições de preço mínimo e US\$ 5,00 por mil m ³ .	105
Figura 7.9	Relação F1 e F3 em condições de preço mínimo e US\$ 5,00 por mil m ³ .	106
Figura 7.10	Relação F1 e F4 em condições de preço mínimo e US\$ 5,00 por mil m ³ .	106
Figura 7.11	Gráfico de desempenho das culturas, custo da água de US\$ 10,00 /1000m ³	107

Figura 7.12	Desempenho dos sistemas de irrigação, para um custo da água de US\$ 10,00/1000m ³	108
Figura 7.13	Relação F1 e F2 em condições de preço mínimo e custo US\$ 10,00/1000m ³	108
Figura 7.14	Relação F1 e F3 em condições de preço mínimo e custo US\$ 10,00/1000m ³	109
Figura 7.15	Relação F1 e F4 em condições de preço mínimo e US\$ 10,00 por mil m ³ .	109
Figura 7.16	Desempenho das culturas, custo da água de US\$ 15,00 /1000m ³	110
Figura 7.17	Desempenho dos sistemas de irrigação, para um custo da água de US\$ 15,00/1000m ³	111
Figura 7.18	Relação F1 e F2 em condições de preço mínimo e custo de m ³ de água US\$15,00	111
Figura 7.19	Relação F1 e F3 em condições de preço mínimo e custo de m ³ de água US\$15,00	112
Figura 7.20	Relação F1 e F4 em condições de preço mínimo e US\$ 15,00 por mil m ³ .	112
Figura 7.21	Desempenho das culturas, custo da água de US\$ 20,00 /1000m ³	113
Figura 7.22	Desempenho dos sistemas de irrigação, para um custo da água de US\$ 20,00/1000m ³	114
Figura 7.23	Relação F1 e F2 em condições de preço mínimo e custo de m ³ de água US\$20,00	114
Figura 7.24	Relação F1 e F3 em condições de preço mínimo e custo de m ³ de água US\$20,00	115
Figura 7.25	Relação F1 e F4 em condições de preço mínimo e US\$ 20,00 por mil m ³ .	115
Figura 7.26	Desempenho das culturas, custo da água de US\$ 25,00 /1000m ³	116
Figura 7.27	Desempenho dos sistemas de irrigação, para um custo da água de US\$ 25,00/1000m ³	117
Figura 7.28	Relação F1 e F4 em condições de preço mínimo e US\$ 25,00 por mil m ³ .	117
Figura 7.29	Gráfico de desempenho das culturas economicamente viáveis, sem custo para água	118
Figura 7.30	Gráfico de desempenho dos sistemas de irrigação, sem custo para a água	119
Figura 7.31	Gráfico relação F1 e F2 em condições de preço médio e sem cobrança de água	119
Figura 7.32	Relação F1 e F3 em condições de preço médio e sem cobrança de água	120
Figura 7.33	Relação F1 e F4 em condições de preço médio e sem cobrança de água	120
Figura 7.34	Gráfico de desempenho das culturas economicamente viáveis, US\$ 5,00 por mil m ³	121
Figura 7.35	Gráfico de desempenho dos sistemas de irrigação, US\$ 5,00 por mil m ³ .	121
Figura 7.36	Relação F1 e F2 em condições de preço médio e US\$ 5,00 por mil m ³ .	122
Figura 7.37	Relação F1 e F3 em condições de preço médio e US\$ 5,00 por mil m ³ .	122
Figura 7.38	Relação F1 e F4 em condições de preço médio e US\$ 5,00 por mil m ³ .	122
Figura 7.39	Gráfico de desempenho das culturas, custo da água de US\$ 10,00 /1000m ³	123
Figura 7.40	Desempenho dos sistemas de irrigação, para um custo da água de US\$ 10,00/1000m ³	123
Figura 7.41	Relação F1 e F2 em condições de preço médio e custo US\$ 10,00/1000m ³	124
Figura 7.42	Relação F1 e F3 em condições de preço médio e custo US\$ 10,00/1000m ³	124
Figura 7.43	Relação F1 e F4 em condições de preço médio e US\$ 10,00 por mil m ³ .	125
Figura 7.44	Desempenho das culturas, custo da água de US\$ 15,00 /1000m ³	125
Figura 7.45	Desempenho dos sistemas de irrigação, para um custo da água de US\$ 15,00/1000m ³	126
Figura 7.46	Relação F1 e F2 em condições de preço mínimo e custo de m ³ de água US\$15,00	126
Figura 7.47	Relação F1 e F3 em condições de preço mínimo e custo de m ³ de água US\$15,00	127
Figura 7.48	Relação F1 e F4 em condições de preço mínimo e US\$ 15,00 por mil m ³ .	127
Figura 7.49	Desempenho das culturas, custo da água de US\$ 20,00 /1000m ³	128

Figura 7.50	Desempenho dos sistemas de irrigação, para um custo da água de US\$ 20,00/1000m ³	128
Figura 7.51	Relação F1 e F2 em condições de preço médio e custo de m ³ de água US\$20,00	129
Figura 7.52	Relação F1 e F3 em condições de preço médio e custo de m ³ de água US\$20,00	129
Figura 7.53	Relação F1 e F4 em condições de preço médio e US\$ 20,00 po mil m ³ .	130
Figura 7.54	Desempenho das culturas, custo da água de US\$ 25,00 /1000m ³	130
Figura 7.55	Desempenho dos sistemas de irrigação, para um custo da água de US\$ 25,00/1000m ³	131
Figura 7.56	Relação F1 e F2 em condições de preço médio e custo de m ³ de água US\$25,00	131
Figura 7.57	Relação F1 e F3 em condições de preço médio e custo de m ³ de água US\$25,00	132
Figura 7.58	Relação F1 e F4 em condições de preço médio e US\$ 25,00 por mil m ³ .	132
Figura 7.59	Culturas economicamente viáveis, com remuneração mínima	133
Figura 7.60	Culturas economicamente viáveis, com remuneração mínima	134
Figura 7.61	Participação dos sistemas de irrigação em diferentes condições de remuneração	135

Lista de Tabelas

		Página
Tabela 2.1	Tipos de Solos Encontrados na Microbacia Hidrográfica da Cabeceira do Rio Pardo	5
Tabela 4.1	Exemplos da interferência da irrigação na produtividade de algumas culturas	16
Tabela 5.1	Problema de maximização com 3 objetivos	30
Tabela 6.1	Número de plantas por hectare	54
Tabela 6.2	Relação entre potência instalada e acréscimo	64
Tabela 6.3	Características do aspersor em função da pressão de serviço	70
Tabela 6.4	Dados Normais de Temperatura Média do ar atmosférico e Precipitação	76
Tabela 6.5	Balanço hídrico através do método de Thornthwaite & Mather para Botucatu-SP	77
Tabela 6.6	Exemplo planilha base para composição dos custos de implantação e manutenção	83
Tabela 6.7	Resumo dos custos , implantação e manutenção, das culturas	84
Tabela 6.8	Exemplo planilha base para composição de preços médios e mínimos	84
Tabela 6.9	Exemplo planilha base para composição das receitas das culturas, preços médios	85
Tabela 6.10	Resumo das receitas das culturas, preços mínimos	85
Tabela 6.11	Resumo das receitas das culturas, preços médios	85
Tabela 6.12	Estimativa do custo de materiais dos sistemas de irrigação por Aspersão	86
Tabela 6.13	Depreciação anual dos sistemas de Irrigação	87
Tabela 6.14	Exemplo de linhas para cultura de ameixa no arquivo de entrada	98
Tabela 7.1	Alternativas economicamente viáveis, para um custo da água de US\$ 0,00 por 1000m ³	101
Tabela 7.2	Alternativas economicamente viáveis, custo da água de US\$ 5,00/1000m ³	103
Tabela 7.3	Alternativas economicamente viáveis, custo da água de US\$ 10,00/1000m ³	107
Tabela 7.4	Alternativas economicamente viáveis, custo da água de US\$ 15,00/1000m ³	110
Tabela 7.5	Alternativas economicamente viáveis, custo da água de US\$ 20,00/1000m ³	113
Tabela 7.6	Alternativas economicamente viáveis, custo da água de US\$ 25,00/1000m ³	116
Tabela 7.7	Dados em porcentagem de culturas economicamente viáveis, com remuneração mínima	133
Tabela 7.8	Dados em porcentagem de culturas economicamente viáveis, com remuneração média	133
Tabela 7.9	Participação dos sistemas de irrigação condições de custo de água e remuneração	134

Sumário

		Página
1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	2
2	BACIA DO RIO PARDO	3
3	FRUTÍFERAS CULTIVADAS	7
4	IRRIGAÇÃO	13
4.1	IRRIGAÇÃO DE FRUTÍFERAS	13
4.2	MÉTODO DE IRRIGAÇÃO	16
4.2.1	SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO	17
4.2.2	SISTEMA DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA	20
4.2.3	SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR SUPERFÍCIE	24
4.3	FATORES DE SELEÇÃO DO MÉTODO DE IRRIGAÇÃO	25
5	MODELOS DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO	28
5.1	PROBLEMA MULTIOBJETIVO E CONCEITO DE DOMINÂNCIA	29
5.2	TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO	32
5.3	ALGORITMOS GENÉTICOS MULTIOBJETIVO	35
5.3.1	PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DOS ALGORITMOS GENÉTICOS	36
5.3.2	TIPOS DE ALGORITMOS GENÉTICOS	38
5.3.3	OPERADORES DOS AGs	40
5.3.4	AGs MULTIOBJETIVO	42
5.3.5	APLICAÇÕES DAS TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO NA AGRICULTURA.	47
6	MATERIAL E MÉTODOS	51
6.1	TAMANHO DA ÁREA	53
6.2	DIMENSIONAMENTO DAS CULTURAS	54
6.3	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO	55
6.3.1	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA	57
6.3.1.1	LAYOUTS DE APOIO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA	64
6.3.2	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO	66

6.3.2.1	LAYOUTS DE APOIO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO ASPERSÃO	74
6.4	DETERMINAÇÃO DA DEMANDA HIDRÍCA DA REGIÃO	75
6.5	DETERMINAÇÃO DA DEMANDA HIDRÍCA DA CULTURA	78
6.6	CUSTOS DE INSUMOS E TRATOS CULTURAIS	81
6.7	ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO E RENDA DAS FRUTÍFERAS	84
6.8	CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO	86
6.9	CUSTOS DE MANUTENÇÃO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO	87
6.10	VALORES ATRIBUÍDOS AO USO DA ÁGUA	88
6.11	METODOLOGIA MULTIOBJETIVO	88
6.11.1	SPEA (<i>Strongh Pareto Evolutionary Algorithm</i>)	89
6.11.2	REPRESENTAÇÃO DAS SOLUÇÕES	92
6.11.3	O USO DO ALGORITMO GENÉTICO MULTIOBJETIVO SPEA	93
6.11.4	OBJETIVOS CONSIDERADOS	94
6.11.5	FORMULAÇÃO DAS FUNÇÕES OBJETIVO	94
6.11.6	ARQUIVO DE ENTRADA (entrada.txt)	97
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO	99
7.1	SIMULAÇÕES COM PREÇOS MÍNIMOS	99
7.1.1	RESULTADOS PARA ÁGUA SEM CUSTO, REMUNERAÇÃO MÍNIMA	99
7.1.2	CUSTO DA ÁGUA U\$5,00 POR MIL METROS CÚBICOS	103
7.1.3	CUSTO DA ÁGUA U\$10,00 POR MIL METROS CÚBICOS	107
7.1.4	CUSTO DA ÁGUA U\$15,00 POR MIL METROS CÚBICOS	110
7.1.5	CUSTO DA ÁGUA U\$ 20,00 POR MIL METROS CÚBICOS	112
7.1.6	CUSTO DA ÁGUA U\$ 25,00 POR MIL METROS CÚBICOS	116
7.2	SIMULAÇÃO COM PREÇOS MÉDIOS	117
7.2.1	RESULTADOS PARA ÁGUA SEM CUSTO	118
7.2.2	CUSTO DA ÁGUA U\$5,00 POR MIL METROS CÚBICOS	120
7.2.3	CUSTO DA ÁGUA U\$10,00 POR MIL METROS CÚBICOS	123
7.2.4	CUSTO DA ÁGUA U\$15,00 POR MIL METROS CÚBICOS	125
7.2.5	CUSTO DA ÁGUA U\$ 20,00 POR MIL METROS CÚBICOS	127
7.2.6	CUSTO DA ÁGUA U\$ 25,00 POR MIL METROS CÚBICOS	130
7.3	COMPARAÇÃO ENTRE AS SIMULAÇÕES	132
8	CONCLUSÕES	135
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137

1. INTRODUÇÃO

As mudanças causadas pela poluição e esgotamento dos recursos naturais vêm fomentando questionamentos e cobrança por sustentabilidade em praticamente todas as atividades produtivas, inclusive agrícolas. Porém, atualmente, no limiar da escassez dos recursos naturais, as atividades agrícolas devem e buscam preservá-los, ao mesmo tempo em que há a necessidade de que estas atividades sejam economicamente viáveis.

A produção do campo para atender a crescente demanda de alimentos passou pela chamada “Revolução Verde”, com o advento de insumos, material genético de alto rendimento, emprego de maquinário agrícola e utilização de técnicas avançadas. Esta revolução foi capaz de atender a demanda crescente de alimentos, e também gerou problemas como o consumo indiscriminado dos recursos naturais e poluição dos mesmos. A conseqüente produção maior reduziu a margem de lucro, então o produtor para manter sua renda, a cada ano ele teria que produzir mais e assim consumir mais recursos naturais e insumos agrícolas, agravando ainda mais os problemas já citados.

As comunidades rurais, carentes de assistência e capacitação, são conduzidas a um comportamento ecológico incorreto e à utilização de técnicas de produção de baixo rendimento, ou o que é comum, utilização de técnicas avançadas sob manejo inadequado. Sem falar na capacidade limitada de planejamento.

Um elevado custo ambiental imposto por essas práticas agrícolas precárias ainda impera nessas comunidades, de forma que poucos são os que têm conhecimento do inestimável valor dos recursos naturais e são também capazes de produzir de maneira economicamente viável em processos de médio e longo prazo.

No Brasil, poucas comunidades rurais apresentam características favoráveis à manutenção das mesmas no setor rural. O correto manejo das culturas, economia dos recursos naturais, assistência técnica e noções sobre planejamento são escassos. O uso de técnicas deficientes de produção e a precariedade da vida no campo conduzem os agricultores e seus descendentes a procurar por melhor qualidade de vida nas cidades, fomentando o êxodo rural.

A comunidade rural tomada como objeto do presente estudo pertence à região de Botucatu, SP, mais precisamente à Microbacia do Rio Pardo. O estudo tem o objetivo de oferecer alternativas ao gerenciamento da atividade produtiva de agricultores, na implantação de novas áreas de cultivo sob irrigação. A fruticultura temperada da região

passa por dificuldades, muitas vezes suas atividades não são capazes de suprir as necessidades econômicas dos agricultores. Há necessidade também de monitoramento rigoroso dos recursos naturais, pois a principal fonte de água para irrigação é de escoamento superficial, e o rio formado na microbacia é principal fonte de abastecimento de urbano na cidade de Botucatu, que hoje conta com aproximadamente 120 mil habitantes (IBGE, 2007), dentre outros municípios.

A microbacia do rio Pardo destaca-se na produção de frutas temperadas e hortaliças e pelo emprego, por parte dos agricultores, de modernas técnicas de produção. Entre as técnicas de produção adotadas pelas propriedades destaca-se a irrigação, que por sua vez deve ser afetada pela perspectiva de cobrança pelo uso da água no futuro próximo.

Tais problemas motivaram o desenvolvimento do presente trabalho, que consiste da elaboração de modelo computacional para ordenamento dos processos produtivos agrícolas que venha a servir de orientação para os agricultores em novos cultivos.

1.1. Objetivos

O objetivo deste trabalho é propor, através do uso de análise multiobjetivo, um sistema de auxílio ao produtor rural, um modelo de suporte que contemple a atividade agrícola e o consumo do recurso natural água. O modelo deve avaliar e ordenar combinações de culturas e sistemas alternativos de irrigação para projetos rurais com os seguintes objetivos específicos:

- ✓ Maximização do retorno financeiro de um determinado produto agrícola e o método de irrigação empregado na sua produção;
- ✓ Minimização do consumo da água;
- ✓ Minimização do consumo da energia elétrica;
- ✓ Geração de empregos (maximização) diretos necessários para a produção e processos produtivos empregados;
- ✓ Maximização da diversificação na produção de alimentos.
- ✓ Investigação o efeito do valor a ser cobrado pelo uso da água.

2. BACIA DO RIO PARDO

Localizada a oeste do Estado de São Paulo, a Bacia Hidrográfica do Rio Pardo, alvo dos estudos aqui realizados, abrange mais de trinta municípios em uma área aproximada de 4.668 km², (SIGRH,2007), cujas principais nascentes estão situadas nos municípios de Pardinho e Botucatu (Figura 2.1). O principal curso d'água da Bacia, o Rio Pardo, após percorrer cerca de 260 quilômetros tem sua foz no Rio Paranapanema, na divisa de dois municípios, Ourinhos e Salto Grande, ambos no Estado de São Paulo. O Rio Paranapanema, por sua vez, contribui para a formação da Bacia do Rio Paraná, abrangendo importantes regiões do Brasil, como o oeste e sudoeste do Estado de São Paulo, leste do Estado do Mato Grosso do Sul e noroeste e oeste do Estado do Paraná, além da Argentina, Paraguai e Uruguai.

Figura 2.1 Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo no Estado de São Paulo.

Fonte: EDR Botucatu - CATI -SAA. Março, 2005. J. A. Santini.

O Rio Pardo pertence a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Médio Paranapanema, UGRHI-17, (figura 2.2) que representa cerca de 6,75% da área

total do Estado de São Paulo, abrigando aproximadamente 672.422 habitantes (SEADE, 2007), o que corresponde a aproximadamente 1,7 % da população total do Estado. A Bacia hidrográfica do Rio Pardo (figura 2.3), se destaca por seus aspectos naturais, sendo sua rede hidrográfica utilizada pelos municípios para fins de abastecimento urbano, industrial, irrigação, lazer, entre outros. Os diferentes tipos de solos encontrados proporcionam o desenvolvimento de uma rica diversidade de explorações, agrícola, pecuária e florestal.

Figura 2.2 Localização da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Médio Paranapanema no Estado de São Paulo.

Fonte: SIGRH, 2007.

Figura 2.3 Unidades hidrográficas principais da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Médio Paranapanema no Estado de São Paulo.

Fonte: SIGRH, 2007.

A Tabela 2.1 apresenta os principais tipos de solos encontrados na Microbacia da Cabeceira do Rio Pardo e algumas das principais características agronômicas inerentes aos mesmos.

Na microregião objeto deste, estudo predominam solos Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico(PVAd) e Latossolo Vermelho Distroférrico(LVdf). Solos frágeis a erosão o que motivou, entre outros motivos que serão abordados a seguir, o descarte da simulação com irrigação por sulco.

Tabela 2.1. Tipos de Solos Encontrados na Microbacia Hidrográfica da Cabeceira do Rio Pardo e Suas Principais Características Agronômicas

Principais Tipos de Solos	Características Agronômicas
LVd- Latossolo Vermelho Distrófico	Solos profundos, férteis, alta potencialidade agrícola, relevo suave, próprio para culturas anuais e perenes, pastagens e reflorestamento.
LVdf - Latossolo Vermelho Distroférrico	Solos profundos, férteis, relevo suave e próprio para culturas anuais e perenes, pastagens e reflorestamento.
PVAd – Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico	Solos de média fertilidade, com problemas de erosão, mais apropriados para culturas perenes, pastagens e reflorestamento.

Fonte: Adaptado Casa da Agricultura de Botucatu/SP, 2006

Do ponto de vista da vegetação, a biodiversidade é expressiva. Estão presentes matas de transição e atlântica, vegetação de cerrado e campo cerrado, contando ainda, segundo Tornero (1996), com espécies do Pinheiro-do-Paraná (*Araucária brasiliensis*), testemunho de um clima mais frio, o que torna possível o cultivo de frutíferas temperadas, praticado pelos agricultores da região alvo deste estudo.

A área é caracterizada também pela formação geológica Cuesta de Botucatu, que constitui um importante divisor de águas, onde nascem muitos cursos d'água, e configura a região como zonas de recarga do aquífero Guarani. Por estes motivos a Bacia Hidrográfica foi declarada Área de Proteção Ambiental, pelo Decreto Estadual n.º 20.960 de 08 de junho de 1983.

Os municípios dessa Bacia, dentro dos limites da APA, são: Avaré, Botucatu, Itatinga, Pardinho e São Manuel (CETESB, 1985).

O município de Botucatu está localizado na região centro sul do Estado, ocupando hoje uma área de 1.522 km². Possui dois níveis distintos de altitudes: de 500 a 400 metros na Baixada, 900 a 700 metros acima da Cuesta. Este fato provoca diferenças

de temperatura. Assim, a área mais elevada apresenta 2° a 3° C a menos do que na Baixada, com temperatura média 19° C.

O clima da Região é Subtropical Úmido, segundo a classificação de Köppen, com invernos secos e verões quentes.

No inverno, dificilmente registram-se temperaturas abaixo de 2° C. Contudo, considerando a Depressão Periférica e o Planalto Ocidental presentes no relevo do município, classificamos o clima predominante com sendo: Cwa³, segundo a classificação de Köppen, com temperaturas médias no mês mais frio entre 3 e 8 graus centígrados, com um inverno seco e no mês mais quente superior a 22 graus centígrados.

Em termos ambientais, deve-se destacar a erosão que ocorre em algumas áreas em função das características naturais dos solos. Esse processo natural tem-se intensificado em razão de práticas inadequadas de uso e manejo do solo, acarretando inclusive o assoreamento de rios e represas. Algumas áreas do município de Botucatu possuem alto grau de risco em relação à erosão.

Grande parte da vegetação nativa foi suprimida para dar espaço às atividades agropecuárias, e, em alguns casos, para o reflorestamento com espécies exóticas. Tornero (1996), em estudo comparativo entre os anos de 1962 e 1977, confirma o aumento da área ocupada por lavouras anuais e reflorestamento, ao mesmo tempo em que se verifica uma redução da área ocupada por mata e mata ciliar na Microbacia Hidrográfica da Cabeceira do Rio Pardo. Além disso, a Bacia sofre também as consequências causadas pelo uso indiscriminado de insumos agrícolas e despejo de esgotos domésticos, com baixa frequência de tratamento.

A região é caracterizada pela presença da agricultura convencional e orgânica, ocupada por imigrantes de origem asiática, particularmente chineses e japoneses, que a partir do final dos anos 50 e início dos anos 60 estabeleceram-se na região, dedicando-se ao cultivo de frutas e hortaliças. Até então, havia o predomínio da pecuária e do cultivo de grãos na região. Além dos asiáticos, mais recentemente, anos 80, a região acolheu europeus, principalmente alemães e holandeses os quais se dedicam à agricultura orgânica e biodinâmica.

3. FRUTÍFERAS CULTIVADAS

A fruticultura irrigada tem grande importância econômica na região alvo deste estudo, gerando emprego e renda, segundo dados do Instituto de Economia Agrícola, enquanto que na exploração de grãos, como o milho, o produtor obtém uma receita aproximada de R\$ 2.450,00 por ha/ano, isso levando em conta o preço médio de R\$18,43 por saca e uma produtividade de 8 toneladas por hectare; a fruticultura irrigada varia de R\$ 5.000,00(goiaba no 4º ano de produção) a R\$ 17.000,00(atemóia com produção média a partir do 4ºano) por ha/ano. Os valores acima citados para as culturas foram retirados dos sites do Instituto de Economia Agrícola e CEAGESP se referem ao biênio 2006-2007.

As culturas consideradas neste estudo foram determinadas pela vocação e relevância de seu cultivo para a região, que produz em escala comercial principalmente as seguintes frutas, ameixa, atemóia, caqui, goiaba pêssigo e maçã.

As características gerais e dados produtivos a seguir tem como base o manual técnico das culturas ,CATI, 1997.

Figura 3.1. Ameixa.

- ✓ Ameixa (*Prunus salicina*), figura 3.1, da família *Rosacea*, de melhor adaptação às regiões subtropicais do Estado de São Paulo. A ameixeira exige um determinado número de horas de frio (abaixo de 2,7°C) para completar seu ciclo fisiológico. Para a quebra de dormência e início do ciclo vegetativo normal, a cultura necessita de uma precipitação pluviométrica considerável no período da primavera e verão, precisando, também, de umidade no período da florada, que ocorre no final do inverno, podendo, ser forçada à floração através de uma irrigação eficiente. Produtividade normal: 15 a 45 T.ha⁻¹ de frutos em pomares adultos.

Figura 3.2. Atemóia

- ✓ Atemóia, figura 3.2, e Cherimóia (*Annona cherimola* x *Annona squamosa*, L.): do ponto de vista da arboricultura, a cherimóia é considerada uma planta de clima subtropical, enquanto que seu híbrido, a atemóia, é de clima tropical moderado. As mudas jovens não suportam as geadas, enquanto que as plantas já formadas suportam até -2,2°C. No período de floração, se faz necessário um clima com elevada umidade atmosférica (70 a 80%) para uma

boa polinização, exigindo complementação de água através de irrigação. Convém plantar a cherimóia nas regiões com temperaturas médias de 25°C, abaixo do Trópico e nas regiões altas dos Estados de Minas Gerais e São Paulo. A atemóia precisa de temperaturas variando entre 13 e 32°C. Produtividade normal: 20 a 30 T.ha⁻¹ de frutos em pomares adultos.

Figura 3.3. Caqui.

- ✓ Caqui (*Diospyros kiki*), figura 3.3, frutífera da família Ebenaceae, de origem asiática, cujas folhas caem no outono-inverno. Suas plantas são arbóreas, rústicas, produtivas e de alta capacidade de adaptação climática. Em agosto, as plantas brotam e florescem abundantemente. Frutífera subtropical com boa capacidade de adaptação climática, o caqui exige precipitação ao redor de 1000 mm ano, para uma boa produção, sendo prejudiciais: o excesso de água no período de florescimento, como estiagem no período de desenvolvimento dos frutos. Produtividade normal: 15 a 35 T.ha⁻¹ de frutos em pomares adultos.

Figura 3.4. Goiaba.

- ✓ Goiaba(*Psidium Guajava* L.), figura 3.4, planta perene, de porte arbustivo ou semi-arbórea, com 3 a 7m de altura. Pertencente à família Myrtaceaea é originária de região da América Tropical, situada entre o México e o Brasil. A goiaba tem boa produção nas condições da região, pois atende às exigências para seu desenvolvimento que são: locais com precipitação média anual superior a 1.000mm, bem distribuída, e temperatura média anual entre 18 e 25°C. Os solos, arenosos ou argilosos, devem ser profundos e bem drenados. Produtividade normal: 15 a 50 T.ha⁻¹ de frutos, dependendo de diversos fatores tais como espaçamento, cultivar, clima, solo e tratos culturais.

Figura 3.5. Pêssego

- ✓ Pêssego (*Prunus persica* (L.) Batsch), figura 3.5, proveniente da China, chegou ao Brasil por volta de 1532, através de Martin Afonso de Souza, com a chegada das primeiras expedições portuguesas. Pertencente à família Rosácea, desenvolve-se melhor em clima temperado com solo de textura areno-argilosa, relativamente férteis, bem drenados, com pH ideal numa faixa de 6,0 a 6,5 e declividade inferior a 20%. Possui sistema radicular profundo. Estabelece boa produção já no 3º ano após o plantio, nos meses de setembro a fevereiro. Produtividade normal: em média T.ha⁻¹.

Figura 3.6. Maçã.

- ✓ Maçã, (*Malus sp.*), figura 3.6, frutífera típica de clima temperado, da família Rosaceae, tem suas origens nas montanhas do Cáucaso, Oriente Médio e Leste Asiático. Espécie exigente em tratos culturais e fitossanitários (medidas sanitárias adotadas na defesa dos vegetais). Seu cultivo em São Paulo, e em regiões edafoclimáticas similares, somente é possível por meio de cultivares locais, Gala e Centenária, adaptados ou selecionados no IAC. Com pequena exigência de frio, apresentam-se aptos para produzir satisfatoriamente em condições de inverno brando. A safra de maçãs no Estado de São Paulo acontece de dezembro a fevereiro. Produtividade normal: 15 a 30 T.ha⁻¹ de frutos em pomares adultos e racionalmente conduzidos, conforme o espaçamento adotado.

4. IRRIGAÇÃO

A história das grandes civilizações pode ser contada através da agricultura, a maioria das grandes civilizações alcançaram o status de grandes civilizações pela sua capacidade de produzir alimentos. Por isso a produção de alimentos era demasiadamente importante para que fosse somente desenvolvida em terrenos e épocas favoráveis. Surge então a irrigação que, desde o controle das cheias naturais do rio Nilo no Antigo Egito e dos rios Tigre e Eufrates na Mesopotâmia, passando pelo emprego de força animal para elevação e distribuição da água em tabuleiros cultivados na Índia e China, e também na construção de canais e terraços em pedra pelos povos andinos e mesoamericanos do período pré-colombiano, fomentou a produção de alimentos em áreas e tempos anteriormente inaptos, garantindo assim a prosperidade destas civilizações.

No Brasil o primeiro projeto de irrigação que se tem registro foi a construção do reservatório Cadro para o cultivo de arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul em 1881, que entrou em funcionamento em 1903 (FUKUDA, 1976), porém a irrigação começou a ter expressão a partir da década de 50 com aproximadamente 65mil hectares de área irrigada.

4.1 IRRIGAÇÃO DE FRUTÍFERAS

O Brasil destaca-se como uma nação rica em água doce, com aproximadamente 14% da reserva mundial e 35% da reserva americana (MARTINS, 2004). No entanto, da mesma forma que ocorre em todo o mundo, no país existe um descompasso entre a distribuição populacional e a distribuição hídrica superficial.

A distribuição hídrica em função da população no país(ANA, 2007) está assim dividida:

1)Região Norte, mais abundante, com mais de 70% da águas superficiais do país, mas possui apenas 7% da população, com disponibilidade hídrica por habitante de 497.731 metros cúbicos por ano (71 vezes a média mundial);

2) Região Nordeste com 3% das águas superficiais possui 26% da população, com disponibilidade hídrica por habitante de 4244 metros cúbicos por ano;

3) Região Centro-oeste possui 15% das águas superficiais com 10% da população, com disponibilidade hídrica por habitante de 84.684 metros cúbicos por habitante por ano;

4) Região Sudeste 6% das águas superficiais com 42% da população, com disponibilidade hídrica por habitante de 5.681 metros cúbicos por ano;

5) Região Sul 6% das águas superficiais com 15% da população, com disponibilidade hídrica por habitante de 15.015 metros cúbicos por ano.

Observa-se, portanto, que as regiões Nordeste e Sudeste, são as únicas que apresentam disponibilidades hídricas inferiores à média mundial, igual a 7.000 metros cúbicos por habitante/ano, mas ainda, com um valor muito acima do limite estipulado pela ONU como plenamente satisfatório, igual 2.500 metros cúbicos por habitante a cada ano.

A disponibilidade de recursos hídricos, com elevada porcentagem de terras agricultáveis, confere ao Brasil um dos maiores potenciais do mundo para o desenvolvimento da agricultura irrigada, no entanto, o quadro que se apresenta é bem diferente. Em um índice estabelecido pela FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) para relacionar a área atual de agricultura irrigada e a área potencialmente irrigável, foi demonstrado que o Brasil ocupa somente a 22ª colocação da América, num total de 27 países (TESTEZLAF et al., 2002).

A área total de solos utilizados com lavouras permanentes e temporárias no Brasil gira em torno de 65,2 milhões de hectares, e aproximadamente 5% dessa área é irrigada, representando 3,2 milhões de hectares.

A agricultura irrigada é responsável por 65% (34 km³) da demanda de água do país (1,3% da demanda mundial), seguida do consumo doméstico com 16%, da produção industrial com 14% e da pecuária com 5%. Mesmo sendo a maior consumidora, a agricultura irrigada tem um potencial para se expandir 10 vezes mais. No entanto, isto deve ser feito de maneira sustentável, pois o desperdício de água através da irrigação ainda é muito elevado. Estima-se que somente na condução e distribuição (da captação às parcelas), o volume de água desperdiçado seja de 40%. Além dos desperdícios no abastecimento de água das cidades e dos campos, ocasionados por vazamentos de tubulações e canais, muitos outros ocorrem por falta do

uso racional da água, agravando ainda mais a situação (CHRISTOFIDIS, 2002; TUCCI et al, 2003; BRITO et al., 2000).

A irrigação é considerada oficialmente como elemento fomentador do desenvolvimento socioeconômico. A Lei 8.171/91, que dispõe sobre a Política Agrícola, define a irrigação como fator de bem-estar social de comunidades rurais. Estudos baseados em casos com o uso da irrigação, como os municípios de Guaíra (SP), Petrolina (PE), Juazeiro (BA), Barreiras (BA), Chapada do Apodi (RN), Araguari (MG) e Janaúba (MG), mostraram que um hectare irrigado gera de 0,8 a 1,2 emprego direto e 1,0 a 1,2 indireto, de forma consistente e estável, contra 0,22 emprego direto na agricultura de sequeiro (TESTEZLAF, 2002). Portanto, para o aumento da produtividade das culturas e um uso racional da irrigação faz-se necessário um planejamento consistente. Somente assim podem-se obter os benefícios da irrigação, Castro et al.(2002).

A viabilização da produção de alimentos com redução de riscos, gerando empregos e aumento de renda para o setor rural faz da irrigação uma técnica que deveria ter a sua utilização fomentada de forma racional para permitir o desenvolvimento socioeconômico de regiões brasileiras pouco favorecidas. Assim, a viabilidade econômica é um fator indispensável para sua adoção entre os agricultores, Frizzone et al.(1994); Bastos et al.(2000).

A adoção de técnicas de irrigação aumenta a garantia de produção, pois não há dependência de chuvas, possibilita o aumento da produção de alimentos através do aumento da produção por unidade de área e do aumento da área de plantio, em alguns casos a melhoria da qualidade do produto, e permite a obtenção de colheitas fora de safra, com isso o produtor pode conseguir melhores preços.

Facilidades como o uso de quimificação, ou seja, a aplicação de agroquímicos (defensivos e fertilizantes) por meio da água de irrigação.

Esses fatores contribuem para a manutenção do homem no campo, evitando o êxodo rural.

O dado apresentado de que a agricultura irrigada brasileira consome cerca de 65% da demanda total de água é quase sempre associado à idéia de que esse volume é, na sua maior parte, “desperdiçada” e “perdido” e que, portanto, a irrigação é a maior

responsável pelas perdas de água existentes. Associa-se então a idéia de que a população pode ser penalizada pela escassez da água. Essa idéia é gerada, muitas vezes, pela falta de conhecimento sobre a verdadeira participação da água na produção agropecuária. Para Meireles (2000), é indiscutível que a grande vantagem da agricultura irrigada que consiste na elevação da produtividade da terra, não só no seu sentido direto, kg por hectare, como também no sentido de que um hectare de terra é capaz de gerar mais safras por ano, em comparação às culturas de sequeiro. A Tabela nº 4.1 apresenta uma comparação entre o rendimento de algumas culturas produzidas em sequeiro e sob irrigação.

Tabela 4.1 – Interferência da irrigação na produtividade de algumas culturas

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

Fonte: VIEIRA (1986)

A produção de alimentos é uma atividade essencial para a existência humana que demanda efetivamente muita água. A chuva é a sua principal fonte e, na falta desta, a irrigação supre essa necessidade, de forma parcial ou integral, dependendo da região do país.

É fato que sistemas de irrigação inadequadamente projetados, e manejados de forma não apropriada podem gerar impactos negativos. Comprometendo o desempenho econômico e produtivo do pomar.

4.2 MÉTODO DE IRRIGAÇÃO

Diversos são os métodos de irrigação, porém são classificados em 2 grupos principais, superficiais e pressurizados, Bernardo(1995):

- ✓ Superficiais, também chamados métodos de gravidade, a água é aplicada diretamente sobre a superfície do solo com a força da gravidade se deslocando da cota maior para a cota menor do terreno;
- ✓ Pressurizados, onde a água é distribuída no terreno através de tubos pressurizados.

Dentro no método de irrigação por superfície existente 2 principais tipos:

- ✓ Sulcos, a distribuição da água é feita através de pequenos canais ou sulcos paralelos às fileiras de plantas;
- ✓ Inundação, a água é aplicada em faixas de terrenos delimitadas por taipas(diques), ex: arroz irrigado.

O método de irrigação pressurizado pode ser dividido em 2 principais tipos:

- ✓ Aspersão, que engloba a aspersão convencional e microaspersão;
- ✓ Gotejamento.

4.2.1 Sistema de Irrigação por Aspersão

O sistema de irrigação por aspersão atualmente é um dos mais utilizados no mundo e consiste em um método artificial de aplicação de água às plantas, simulando uma chuva.

Os aspersores são dispositivos que têm a função de pulverizar a água proveniente de uma tubulação a uma dada pressão. No sistema de irrigação por aspersão é necessária uma pressão mínima suficiente para que a água seja fragmentada em gotas na passagem pelo aspersor.

Segundo Gomes (1999) os sistemas de irrigação por aspersão tiveram seu desenvolvimento maior a partir da metade do século 20, com o advento das tubulações metálicas leves, originando assim sistemas portáteis de irrigação. Com o passar do tempo e visando a redução da mão de obra nos processos produtivos, surgiram os sistemas fixos de irrigação por aspersão.

Na irrigação por aspersão a aplicação de água ao solo resulta da fragmentação de um jato de água lançado sob pressão no ar atmosférico, por meio de simples orifícios ou bocais de aspersores, figura 4.1.

De forma geral, os sistemas de irrigação apresentam vantagens e limitações que devem ser analisadas quando da seleção do sistema a ser utilizado.

O sistema de irrigação por aspersão pode ser considerado um sistema convencional semi-portátil (ou semi-fixo): as linhas principais e secundárias permanecem fixas e as linhas laterais se deslocam nas diferentes posições da área irrigada. As linhas principais e secundárias não são enterradas. As linhas laterais são compostas por um sistema portátil, as tubulações, conexões e acessórios são leves, facilitando o deslocamento manual.

Os aspersores podem ser rotativos ou estacionários. Os rotativos possuem um ou mais bocais que giram impulsionados pela pressão da água, promovendo a dispersão da água em todo seu contorno, molhando a área de forma progressiva. Os estacionários não possuem este movimento giratório, promovendo assim uma rega contínua da área em questão, por isso são pouco utilizados.

Vantagens da irrigação por aspersão:

O sistema de irrigação por aspersão dispensa o preparo ou sistematização do terreno, permite um bom controle da lâmina de água a ser aplicada e também a aplicação de fertilizantes e tratamentos fitossanitários.

Figura 4.1. Aspersor rotativo de impacto. Fonte: Rainbird

Limitações da irrigação por aspersão:

Os sistemas de irrigação por aspersão possuem elevados custos iniciais, de operação e de manutenção, outra limitação do sistema é a possível interferência de fatores climáticos como o vento que afetam a distribuição de água na aplicação.

Por se tratar de um sistema que simula a chuva pode favorecer o desenvolvimento de algumas doenças devido a alta umidade na parte aérea da planta, a simulação de chuva também trás o risco de selamento (formação de camada impermeável no solo, devido a compactação causada pela força das gotas de água) da superfície do solo.

Os sistemas de irrigação por aspersão possuem menor eficiência na irrigação se comparados a sistemas de irrigação localizada, os aspersores tem em média 80% de eficiência.

4.2.2 Sistema de Irrigação Localizada

A microaspersão, figura 4.2, e o gotejamento, figura 4.3, são classificados como sistemas de irrigação localizada. A irrigação localizada compreende a aplicação de água em apenas uma fração da área cultivada, em alta frequência e baixo volume, mantendo o solo na zona radicular das plantas sob adequado regime de umidade.

A área mínima molhada no cultivo de frutíferas deve ser de aproximadamente 1/3 da área sombreada (ou projeção da copa das plantas), Hernandez et al.(1996). A área de solo molhado exposto à atmosfera fica bem reduzida e, conseqüentemente, é menor a perda de água por evaporação direta do solo.

A água aplicada por estes sistemas infiltra no solo e se redistribui formando um bulbo molhado, cuja forma e tamanho dependem da vazão aplicada, do tipo de emissor, da duração da irrigação e do tipo de solo.

O gotejamento e a microaspersão são os principais representantes dos sistemas de irrigação localizada em uso comercial. Existem outros tipos de sistemas, de uso mais restrito, como: tubos gotejadores, tubos porosos e tubulações perfuradas a laser.

Entre as principais diferenças entre o sistema de gotejamento e o de microaspersão podemos destacar a área de molhamento, enquanto o gotejamento aplica água em pontos, utilizando emissores denominados gotejadores; a microaspersão aplica água sobre uma pequena área circular ou setorial, através de emissores denominados microaspersores. Os gotejadores, em geral, possuem uma vazão de até 20 l/h em cada ponto de emissão, enquanto os microaspersores podem chegar a até 200 l/h. Outra diferença é a pressão de trabalho gotejadores trabalham com pressões menores, em torno de 10 Pa, enquanto os microaspersores necessitam de uma pressão um pouco maior, comumente na faixa de 10 a 20 Pa.

Figura 4.2. Microaspersor. Fonte: Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuária, Argentina

A irrigação localizada oferece uma grande potencialidade de benefícios à planta, entretanto, por ser um método mais sofisticado de operação e manejo apresenta limitações operacionais e de manejo que envolvem treinamento e adequação do operador e ainda dependem de fatores técnicos, econômicos e agrônômicos.

Figura 4.3. Sistema de irrigação por gotejamento. Fonte: Irritech

Vantagens da irrigação localizada:

A irrigação localizada possui algumas vantagens em relação a outros métodos de irrigação, a economia e eficiência de aplicação de água, é uma delas. As razões atribuídas à economia de água incluem a irrigação de apenas uma fração da área cultivada (principalmente em plantas arbóreas), a redução da evaporação na superfície do solo e diretamente da superfície das plantas, o reduzido risco de escoamento superficial e a controlada perda por percolação profunda se adequadamente manejada. Comparando com sistemas de aspersão e de superfície, a economia de água pode atingir 20 a 30%, porém, fica claro que a quantidade de água necessária à cultura é a mesma, independentemente do processo de aplicação ou sistema. A irrigação localizada permite com adequada operação e manutenção um maior controle da lâmina de água aplicada e apresenta perdas reduzidas, resultando em elevada eficiência na aplicação e uso da água.

Outra vantagem é a maior produção e melhor qualidade do produto, em consequência do suprimento de água em baixas quantidades e alta frequência mantendo

a umidade no solo próxima a ideal para a cultura. Com isso evita-se a ocorrência de estresse hídrico na planta e, portanto, favorece o desenvolvimento da cultura com incremento da produção e melhor qualidade do produto.

Existe também a minimização do risco da salinidade para as plantas por sistemas localizados pode ser atribuída a fatos como diluição da concentração de sais na solução do solo em consequência da alta frequência de irrigação que mantém a umidade elevada na zona radicular, eliminação dos danos causados às folhas pela irrigação por aspersão e, movimento dos sais para além da região de atividade das raízes.

Os sistemas localizados permitem maior flexibilidade na fertirrigação e tornam mais eficiente o uso dos nutrientes, pois os fertilizantes são aplicados diretamente na água de irrigação, de forma freqüente e em pequenas doses diretamente na zona radicular de acordo com a marcha de absorção de nutrientes da cultura, minimizando assim a lixiviação além da zona radicular.

A irrigação localizada pode ser facilmente automatizada, facilitando a operação quando a mão-de-obra é limitada ou de alto custo. Uma vez que operam com pressões e quantidades menores de água que em outros tipos de irrigação pressurizados, apresentam reduzidos custos de energia para bombeamento. E como a aplicação de água é em pequena quantidade, a irrigação localizada adapta-se melhor a diferentes tipos de solo e topografia, além de facilitar as operações ou práticas culturais, permitindo a fácil movimentação de máquinas e trabalhadores.

Limitações da irrigação localizada:

A baixa pressão de serviço, o pequeno diâmetro dos orifícios e a reduzida velocidade da água facilitam o entupimento, causado por processos físicos, químicos e biológicos. Considerado o principal problema da irrigação localizada, a ocorrência de entupimento dos orifícios de saída de água dos emissores pode afetar a distribuição da água e com isso a produção da cultura. A manutenção preventiva (incluindo filtração da água e tratamento químico para lavagem das tubulações) é uma alternativa efetiva para

evitar obstruções. Outros problemas tão importantes quanto a obstrução incluem rompimento nas tubulações, falhas em acessórios e equipamentos.

Devido à formação de um volume constante de solo umedecido (bulbo úmido), o sistema radicular tende a concentrar-se nesta região, diminuindo a estabilidade das árvores frutíferas, podendo ocorrer tombamento das árvores em regiões sujeitas a ventos fortes.

Custos: Os sistemas de irrigação localizada são fixos e requerem grande quantidade de tubulações e acessórios. Conseqüentemente, os custos iniciais e anuais são altos, podendo ser comparados aos custos de implantação de sistemas fixos de irrigação por aspersão. Os custos podem variar consideravelmente, dependendo da cultura, da quantidade necessária de tubulações, dos equipamentos de filtragem e de fertilização e do grau de automação desejado. Geralmente, os sistemas localizados são mais econômicos quando utilizados em culturas de maiores espaçamentos. Os custos iniciais de sistemas localizados no Brasil podem variar de R\$ 3.000,00 a R\$ 6.000,00 por hectare e os custos anuais de manutenção podem atingir R\$ 300,00 por hectare.

Em fruticultura cultivada em solos profundos como os latossolos existe uma preferência pelo sistema de irrigação por microaspersão, devido a suas características, pois tem a vantagem de molhar uma maior área de solo, favorecendo o desenvolvimento e distribuição radicular. Tal característica torna a microaspersão o sistema de irrigação preferido pelos produtores da região de Botucatu para as culturas de frutíferas temperadas. Atualmente existem no mercado fitas gotejadoras de baixo custo, configurando uma alternativa interessante para o agricultor.

4.2.3 Sistema de Irrigação por Superfície

A água é conduzida em pequenos sulcos ou canais paralelos às fileiras de plantas, figura 4.4, durante o tempo necessário para a sua infiltração no solo, até a zona radicular da cultura.

Esse método de irrigação é o que exige, em geral, mais mão-de-obra por unidade de área, maior experiência do irrigante na distribuição da água do canal secundário para os sulcos e na manutenção do controle da vazão, durante a irrigação. Em contraste com outros métodos, essa técnica molha o solo sem encharcá-lo, diminuindo dessa forma, a perda por evaporação, reduzindo a formação de crostas na superfície dos solos argilosos; permite ainda realizar colheitas logo após as irrigações. Como a água é conduzida através de sulcos, não exigindo tubulações, esse método é um dos de menores custos de implantação e operação. É uma técnica que se adapta à maioria das culturas, principalmente às cultivadas em fileiras como as olerícolas, milho, feijão, algodão, batata, trigo, tomate e as frutíferas.

Figura 4.4. Sistema de irrigação por superfície. Fonte:Arikah

4.3. Fatores de Seleção do Método de Irrigação

Vários fatores podem afetar a seleção do método de irrigação. Os mais importantes são descritos a seguir:

A) Topografia

Em áreas planas, pode-se empregar qualquer um dos três métodos.

Se a área não é plana, deve-se limitar ao uso de aspersão ou localizada, nos quais a taxa de aplicação de água pode ser ajustada para evitar erosão. O método de irrigação por superfície pode ser desenvolvido em áreas com declividades de até 5%. Aspersão pode ser empregada em áreas de até 30%, enquanto gotejamento em áreas com declives de até 60%.

Áreas com formato e declividade irregulares são melhor irrigadas com métodos de aspersão e localizada do que com o método de superfície.

B) Solos

Solos com velocidade de infiltração básica¹ maior que 70 mm/h devem ser irrigados por aspersão ou com irrigação localizada. Para velocidades de infiltração inferiores a 12 mm/h, em áreas inclinadas, o método mais adequado é o da irrigação localizada. Para valores intermediários de velocidade de infiltração, os três métodos podem ser empregados, caso do solo da área objeto deste estudo.

C) Culturas

¹ Velocidade de infiltração básica, nome dado ao comportamento da velocidade de infiltração do solo em relação ao tempo de infiltração, no início a taxa de infiltração é alta e a medida que o tempo aumenta a infiltração diminui, até atingir um valor quase constante, denominada de velocidade de infiltração básica.

Alguns aspectos relacionados às culturas devem ser considerados na seleção do método de irrigação, entre os quais o sistema e o espaçamento de plantio, a profundidade do sistema radicular, a altura de plantas, o valor econômico e as exigências agronômicas.

A eficiência de irrigação, considera vários aspectos, um deles é a relação entre a lâmina de água aplicada e a totalidade de água absorvida pelas raízes da cultura(gramíneas, milho, cana), por isso culturas que cobrem uma maior área ou área total da superfície do solo tem nos sistemas de irrigação uma maior eficiência.

Culturas que ocupam parcialmente a superfície, caso das frutíferas, são mais eficientemente irrigadas com métodos de irrigação localizada ou com métodos de sulcos, pois estes podem irrigar a região do terreno com maior concentração de raízes.

Os sistemas de irrigação localizada e aspersão permitem uma melhor adequação da lâmina aplicada à necessidade, de acordo com a profundidade efetiva do sistema radicular das culturas, o que leva a uma melhor eficiência de aplicação.

Culturas de maior valor econômico, em geral, requerem métodos de irrigação mais eficientes e com melhor distribuição de aplicação de água, como é o caso de aspersão e localizada.

D) Clima

A frequência e a quantidade das precipitações que ocorrem durante o ciclo das culturas ditam a importância da irrigação para a produção agrícola. Nas regiões áridas e semi-áridas, é praticamente impossível produzir sem irrigação. Todavia, em regiões mais úmidas, a irrigação pode ter caráter apenas complementar as chuvas e os sistemas de menor custo devem ser selecionados para esse caso. Em geral, sistemas de subirrigação e superfície têm custos operacionais menores que os sistemas de irrigação por aspersão e localizada.

As perdas de água por evaporação direta durante a aplicação e logo após esta, nos sistemas de aspersão, podem chegar a 10%, sem considerar a evaporação da água da superfície das plantas, pois a água acumulada na superfície é passível de evaporação também. Tais perdas são desprezíveis nos sistemas de irrigação por superfície e localizada.

5. MODELOS DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

A busca do desenvolvimento sustentável é uma tarefa árdua por envolver muitos fatores e, portanto, necessita contemplar objetivos diversos tais como a maximização do desempenho econômico e social, a minimização de dano ecológico, etc...

O atendimento desses objetivos só é possível mediante o gerenciamento adequado das atividades, tendo em vista que eles geralmente são conflitantes e muitas vezes de difícil valoração. Nesse sentido existem vários trabalhos desenvolvidos no mundo, principalmente na Europa, Ganoulis(2001), Raju e Pillai (1999) e Ásia, Raju e Kumar (1999), visando o gerenciamento dos recursos naturais na produção agrícola por meio de técnicas de otimização.

Historicamente, diversas metodologias ou técnicas foram propostas com o intuito de difundir procedimentos sistêmicos capazes de representar processos reais através de modelos matemáticos, analisar interações entre alternativas de projetos e suas consequências futuras e desenvolver métodos que satisfaçam às necessidades da sociedade. Programação linear, não linear e dinâmica, são algumas das técnicas utilizadas com o objetivo de determinar valores para as variáveis de decisão de maneira a maximizar ou minimizar uma função (função objetivo) sujeita a restrições. A programação linear se distingue no tratamento de problemas em que a função objetivo e as restrições podem ser expressar através de relações lineares das variáveis de decisão (variáveis cujos valores pretendem-se determinar para que a função objetivo tenha o seu valor otimizado). A programação não linear é adequada aos problemas que envolvem função objetivo ou, no mínimo, uma restrição não linear. A programação dinâmica por sua vez, é a técnica adequada para resolução de problemas sequenciais.

Os problemas formulados como de objetivo único geralmente produzem soluções que não satisfazem plenamente as necessidades envolvidas, ou, geralmente não são capazes de abordar integralmente a complexidade inerente aos problemas reais de engenharia e por isso vem sendo alvo de críticas de vários pesquisadores (GOICOCHEA et al.(1982); LOUCKS et al.(1981); COELLO, 1996; VELDHUIZEN,1999; WALSKI, 2001). Assim, procedimentos capazes de abordar múltiplos objetivos, muitas vezes conflitantes, vêm ganhando espaço.

5.1 Problema Multiobjetivo e Conceito de Dominância

Grande parte dos problemas do mundo real envolve a otimização de múltiplos objetivos. Embora muitos métodos de otimização desenvolvidos para o planejamento e o gerenciamento de recursos hídricos, tenham produzido soluções razoáveis à tomada de decisão, há necessidade de considerar simultaneamente vários objetivos na análise e solução desses problemas.

A definição explícita de objetivos múltiplos ao invés de tratar o problema como objetivo único, a geração de várias soluções (estratégias) simultaneamente com múltiplos valores (custo, benefício, dentre outros) associados para cada solução, a avaliação de várias alternativas de projeto, e a seleção da alternativa preferida pelo decisor, com conhecimento da compensação em relação a cada objetivo, são as habilidades pelos pesquisadores destes métodos (GOICOECHEA et al.(1982); LOUCKS et al.(1981); COELLO, 1996; VELDHUIZEN,1999; WALSKI, 2001).

Na verdade, o problema de otimização com um objetivo é degenerado de problemas com mais de um objetivo, mas existem diferenças fundamentais entre eles. A principal delas está na solução do problema. Por tratar de objetivos conflitantes, na otimização multiobjetivo cada objetivo corresponde a uma solução ótima. Isso faz com que esses problemas apresentem várias soluções ótimas, enquanto que algoritmos que solucionam problemas de otimização com um objetivo normalmente geram apenas uma solução ótima.

O problema de maximização do vetor de n objetivos com p variáveis de decisão e m restrições pode ser expresso por:

$$\text{Maximizar } f_k(x_1, x_2, \dots, x_p) \quad k=1, 2, \dots, n \quad (\text{A})$$

$$\text{Sujeito a } g_i(x_1, x_2, \dots, x_p) \quad i=1, 2, \dots, m \quad (\text{B})$$

sendo F o vetor constituído das funções objetivo que compõe o conjunto multiobjetivo f_k , g as funções restrições, x são as variáveis de decisão e i, j, k índices das restrições, variáveis de decisão e objetivos, respectivamente.

Em um problema multiobjetivo, pode-se investigar um conjunto de soluções consideradas melhores, pois não existe uma única solução ótima. Este conjunto de

soluções denominadas não inferiores, não dominadas, de melhor compromisso ou Pareto ótimas, são determinadas com base no conceito de dominância, detalhado a seguir.

O Conceito de dominância para soluções X pertencentes ao universo de busca U pode ser enunciado como:

Um vetor decisão $x_u \in U$, para o qual $u = f(x_u) = (u_1, u_2, \dots, u_n)$, domina $x_v \in U$, para o qual $v = f(x_v) = (v_1, v_2, \dots, v_n)$, se e somente se $\forall k \in \{1, \dots, n\}, u_k \geq v_k$ e $\exists k \in \{1, \dots, n\} | u_k < v_k$

Se qualquer dessas condições não for obedecida, x_u não domina x_v .

Se x_u domina x_v , pode-se dizer:

x_v é dominada por x_u

x_u é não dominada por x_v

x_u é não inferior a x_v

O conjunto de soluções denominadas não inferiores, não dominadas, de melhor compromisso ou Pareto ótimas, é o conjunto das soluções do espaço de busca não dominadas entre si. Um exemplo simples deste conceito, apresentado por COHON (1978), é aqui reproduzido na Tabela 5.1 para problema de maximização com 3 objetivos (Z_1 , Z_2 e Z_3)

Tabela 5.1 Problema de maximização com 3 objetivos

Solução	Objetivo			Classificação da solução
	f_1	f_2	f_3	
A	5	8	7	não inferior
B	4	9	3	não inferior
C	4	4	4	inferior
D	3	10	6	não inferior
E	2	9	8	não inferior

Fonte: adaptado COHON (1978),

Comparando as alternativas A, B, C, D e E, segundo f_1 , f_2 e f_3 permite-se concluir que A, B, D e E são não inferiores, enquanto C é inferior (dominada por A). A, D e E, possuem os melhores valores para f_1 , f_2 e f_3 , respectivamente. Portanto são não dominadas. B possui melhor valor para f_1 que D e E, melhor valor para f_2 que A e E e é não dominada por B por possuir melhor valor que C para f_2 e pior valor de f_3 , que C. Portanto, A também é solução não inferior. C possui valores piores para f_1 , f_2 e f_3 que A. Portanto, C é dominada por A e, assim, considerada inferior.

Consideremos um problema com dois objetivos a serem minimizados: quantidade de água consumida e custo de produção de uma determinada fruta. Figura 5.4 mostra um conjunto de possíveis soluções para o problema. Observemos que, por exemplo, a solução A está próxima do custo mínimo, mas possui um alto consumo de água. Por outro lado, o ponto B apresenta uma solução de custo maior, porém menor consumo de água. Se os dois objetivos são importantes para a solução do problema, não podemos dizer que a solução A é melhor que a solução B, e vice-versa. Uma solução é melhor que a outra em um objetivo, mas pior em outro. A solução D, que também pertence ao conjunto de soluções ótimas, também não pode ser considerada melhor ou pior que A e B. Assim, todas as soluções que na Figura nº 5.4 aparecem como pertencentes ao frente de Pareto (linha pontilhada), são consideradas soluções ótimas de Pareto.

Observando ainda a Figura 5.1, concluímos que existem também algumas soluções não-ótimas de Pareto, como C. Se compararmos a solução C com A, nós novamente não podemos dizer que A ou C sejam melhores nos dois objetivos. Porém, C não faz parte da frente de Pareto porque existe uma solução B que é melhor que C nos dois objetivos. Por esse motivo, a solução C é conhecida como uma solução dominada.

Figura 5.1. Conceito de soluções ótimas de Pareto (DEB, 1999)

Dessa forma, podemos concluir que para um problema com mais de uma função objetiva, uma solução x_1 domina uma solução x_2 se duas condições são satisfeitas:

1. A solução x_1 não é pior que x_2 segundo nenhum dos objetivos.
2. A solução x_1 é estritamente melhor que a solução x_2 segundo pelo menos um objetivo.

5.2. Técnicas de Otimização Multiobjetivo

Os procedimentos que envolvem o tratamento de problemas de mais do que um objetivo são conhecidos como técnicas de otimização multiobjetivo.

Zadeh (1965) publicou o primeiro trabalho utilizando otimização multiobjetivo aplicado à engenharia. A partir dos anos 70 o uso da otimização multiobjetivo tornou-se mais popular e atualmente, existem mais de 30 técnicas de programação matemática para otimização multiobjetivo (COELLO, 1996).

Cohon (1978), em seu livro texto, classificou esses modelos em dois grupos, técnicas de geração de soluções não dominadas e técnicas baseadas na preferência do decisor.

As técnicas baseadas na preferência do decisor (articulação prévia, articulação posterior das preferências ou interativos) utilizam informações de preferência em diferentes momentos do processo de identificação das soluções otimizantes. Já as

técnicas de geração de soluções não dominadas têm apenas a função de produzir um conjunto de vetores solução para que se possa escolher a solução mais adequada ao problema em mãos.

A Figura 5.2 ilustra classificação dos modelos de otimização multiobjetivo convencionais de maneira a apresentar algumas das técnicas mais conhecidas. A maioria dessas técnicas evita as complexidades que um problema (otimização) multiobjetivo envolve. Assim, as diversas técnicas de resolução de problemas multiobjetivo convencionais ou exigem a transformação do problema de otimização de objetivos múltiplos em problema(s) de otimização de objetivo único ou a linearização o problema correspondente para dar-lhe tratamento. Por exemplo, o método de soma ponderada sugere minimizar uma soma de objetivos múltiplos ponderados por pesos; o método das restrições- ϵ sugere otimizar uma função objetivo e utilizar todos os outros objetivos como restrições; o método de métricas ponderadas sugere minimizar um elemento métrico que representa todos os objetivos; o método da programação de metas sugere minimizar a soma ponderada dos desvios das metas. A formulação resultante permite que técnicas clássicas de otimização sejam utilizadas na resolução do respectivo problema.

Figura 5.2. Classificação dos modelos de otimização multiobjetivo convencionais.

A Figura 5.3 mostra o esquema de um procedimento de otimização multiobjetivo em que, no Passo 1, múltiplas soluções são encontradas, enquanto no

Passo 2 uma delas é selecionada de acordo com as necessidades ou julgamento de valor do usuário. Assim, para a segunda etapa do procedimento, caberia ao usuário, utilizando informações não-técnicas e qualitativas, optar por uma das soluções apresentadas como sendo a solução ótima para o problema.

Figura 5.3. Procedimento de obtenção de soluções não dominadas seguido da escolha da solução a ser adotada (DEB, 2001).

Observa-se que realmente a otimização com apenas um objetivo é degenerada da multiobjetivo. Se o esquema que ela representa tivesse que ser modificado para representar a resolução de um problema com um objetivo, no Passo 1 apenas uma solução seria encontrada, e o Passo 2 não precisaria ser executado. Cada solução encontrada no primeiro passo (Figura 5.3) corresponde a uma ordem específica de importância dos objetivos. As informações de alto nível expressas na figura, nada mais são do que as prioridades escolhidas.

Se uma preferência em relação aos objetivos é conhecida, não é necessário aplicar o esquema apresentado na Figura 5.3. Um método simples pode ser utilizado para criar uma função composta objetiva, definida como a soma dos objetivos com seus respectivos pesos, em que o peso é proporcional ao fator de preferência de um objetivo em particular.

O método citado acima é denominado otimização multiobjetivo baseada em preferência, e é apenas um dos métodos utilizados para conversão de problemas

multiobjetivos em problemas com um objetivo e, apesar de muito simples, é mais subjetivo. A Figura 5.4. mostra um esquema do método baseado em preferência.

Figura 5.4. Otimização multiobjetivo baseada em preferência (DEB, 2001)

A diferença essencial nesses dois esquemas de otimização é que, no esquema ideal, a informação do problema não é utilizada para buscar por uma nova solução, e sim para escolher uma solução dentre um conjunto de soluções ótimas já escolhidas. Na otimização baseada em preferência, a informação deve ser fornecida antes da busca ser iniciada, sem nenhum conhecimento das possíveis conseqüências. Podemos então concluir que a abordagem multiobjetivo ideal é mais prática, mais metódica e menos subjetiva que a baseada em preferência. Porém, se um vetor de preferências para o problema já é conhecido, não há razões para não utilizá-lo (DEB, 2001).

5.3 Algoritmos Genéticos Multiobjetivo

Como já comentado, os princípios da otimização multiobjetivo são diferentes dos da otimização com apenas um objetivo. Enquanto a última encontra apenas uma solução global ótima, a primeira, como possui vários objetivos, pode apresentar uma solução ótima diferente para cada objetivo. Se existem diferenças suficientes entre soluções ótimas correspondentes a diferentes objetivos, as funções objetivo são ditas

conflitantes entre si. Quando isso ocorre, um conjunto de soluções ótimas surge. A essas soluções ótimas chamamos soluções ótimas de Pareto.

Um modelo de otimização multiobjetivo consistente deve contemplar os diversos objetivos envolvidos simultaneamente em suas análises, de forma a identificar soluções alternativas para o problema. Métodos de busca direta ou métodos baseados no gradiente da função são de difícil aplicação ao caso multiobjetivo, porque não trabalham com soluções múltiplas. Os AGs, na condição de algoritmos populacionais, são ferramentas naturais para dar tratamento ao problema de geração de soluções não dominadas. Assim, os AGs que incorporam o conceito de soluções não dominadas de Pareto podem ser considerados ferramentas mais gerais para dar tratamento ao problema de determinação de soluções não dominadas. Tal afirmativa baseia-se no fato desses algoritmos admitirem funções lineares ou não, contínuas ou não, além de possibilitarem a busca de numerosas variáveis de decisão.

Há, portanto, uma tendência em substituir os métodos de otimização convencionais por técnicas de otimização multiobjetivo não convencionais baseadas na programação evolucionária. Conforme abordado por Deb (2001).

São apresentados a seguir os princípios de funcionamento dos AGs, os tipos de AGs, seus operadores, bem como as idéias básicas dos AGs multiobjetivos.

5.3.1 Princípios de Funcionamento dos AGs

Os Algoritmos Genéticos são ferramentas da área de Inteligência artificial de Sistemas Inspirados na Natureza; sistemas estes que simulam os processos naturais e aplica-os à solução de problemas reais. Algoritmos Genéticos são métodos generalizados de otimização por busca direta que simulam os processos naturais da evolução, aplicando a idéia darwiniana de seleção natural das espécies. De acordo com a aptidão e utilizando-se da combinação com outros operadores genéticos, são produzidos métodos de grande robustez e aplicabilidade na resolução de problemas.

Estes algoritmos estão baseados nos processos genéticos dos organismos biológicos, codificando uma possível solução a um problema de "cromossomo" composto por cadeia de bits e caracteres. Estes cromossomos representam indivíduos que são levados ao longo de várias gerações, na forma similar aos problemas naturais, evoluindo de acordo com os princípios de seleção natural e sobrevivência dos mais

aptos, descritos pela primeira vez por Charles Darwin em seu livro "A Origem das Espécies". Emulando estes processos, os Algoritmos Genéticos são capazes de "evoluir" soluções de problemas do mundo real.

Na natureza os indivíduos competem entre si por recursos como alimentos, água e refúgio. Adicionalmente, entre os animais de uma mesma espécie, aqueles que não obtêm êxito tendem a ter um número reduzido de descendentes, tendo portanto menor probabilidade de seus genes serem propagados ao longo de sucessivas gerações. A combinação entre os genes dos indivíduos que perduram na espécie, podem produzir um novo indivíduo muito melhor adaptado às características de seu meio ambiente.

Os Algoritmos Genéticos utilizam uma analogia direta deste fenômeno de evolução na natureza, onde cada indivíduo representa uma possível solução para um problema dado. A cada indivíduo se atribui uma pontuação de adaptação, dependendo da resposta dada ao problema por este indivíduo. Aos mais adaptados é dada a oportunidade de reproduzir-se mediante cruzamentos com outros indivíduos da população, produzindo descendentes com características de ambas as partes. Se um Algoritmo Genético for desenvolvido corretamente, a população (conjunto de possíveis respostas) convergirá a uma solução boa para o problema proposto, talvez até ótima.

Os processos que mais contribuem para a evolução são os chamados crossover e a adaptação baseada na seleção/reprodução. A mutação também tem um papel significativo, no entanto, seu grau de importância continua sendo um assunto em que os pesquisadores ainda não entraram em consenso.

Um Algoritmo Genético pode convergir em uma busca de azar, porém sua utilização assegura que nenhum ponto do espaço de busca tem probabilidade zero de ser examinado. Toda tarefa de busca e otimização possui vários componentes, entre eles:

O espaço de busca onde são consideradas todas as possibilidades de solução de um determinado problema e A função de avaliação (ou função de custo), uma maneira de avaliar os membros do espaço de busca.

As técnicas de busca e otimização tradicionais iniciam-se com um único candidato que, iterativamente, é manipulado utilizando algumas heurísticas (estáticas) diretamente associadas ao problema a ser solucionado. Por outro lado, as técnicas de computação evolucionária operam sobre uma população de candidatos em paralelo. Assim, elas podem buscar em diferentes áreas do espaço de solução, alocando um número de membros apropriado para a busca em várias regiões. Os Algoritmos Genéticos (AGs)

diferem dos métodos tradicionais de busca e otimização, principalmente nos seguintes aspectos:

- ✓ trabalham com uma codificação do conjunto de parâmetros e não com os próprios parâmetros;
- ✓ a busca é realizada a partir de uma população de pontos e não de um único ponto;
- ✓ utilizam informações de custo ou recompensa e não derivadas ou outro conhecimento auxiliar;
- ✓ são de fácil implementação, não sendo necessários conhecimentos matemáticos complexos;
- ✓ utilizam regras de transição probabilísticas e não determinísticas;
- ✓ são capazes de otimizar um grande número de variáveis, trabalhando com funções objetivo com superfícies de resposta complexas, reduzindo a incidência de mínimos ou máximos locais;
- ✓ fornecem uma gama de parâmetros ótimos e não uma simples solução;
- ✓ mesmo quando o número de variáveis de decisão é muito grande, o algoritmo é capaz de “varrer” o espaço de soluções de maneira bastante eficaz.

Algoritmos Genéticos são muito eficientes para busca de soluções ótimas, ou soluções boas, em diversos problemas, pois não impõem muitas das limitações encontradas nos métodos de busca tradicionais. Os pesquisadores referem-se a "algoritmos genéticos" ou a "um algoritmo genético" e não "ao algoritmo genético", pois AGs são uma classe de procedimentos com muitos passos separados, e cada um destes passos possui muitas variações possíveis.

5.3.2 Tipos de Algoritmos Genéticos

O conjunto completo de cromossomos em qualquer estágio da otimização representa uma geração, sendo que a população inicial de indivíduos ou soluções alternativas é gerada aleatoriamente no início do processo de otimização. Existem duas principais maneiras de acordo com as quais o processo iterativo evolui, produzindo populações subseqüentes (MICHAELEWICZ, 1994):

- ✓ Criando-se indivíduos filhos (novas soluções candidatas) em número suficiente para substituir a população presente, este procedimento é chamado substituição geracional; ou
- ✓ Criando-se um número reduzido de indivíduos filhos em substituição aos piores indivíduos da presente iteração, de acordo com o procedimento chamado steady-state. Assim poucos membros da população são modificados em cada iteração.

Os indivíduos pais de uma geração são escolhidos de maneira a maximizar a probabilidade de produção de filhos mais aptos ou adaptados, ou seja, que representem melhores soluções para o problema em estudo. Assim, o operador seleção determina os indivíduos a sofrerem recombinação e mutação, proporcionalmente ao seu valor de aptidão. O método mais comumente usado é o da roleta, também conhecido como amostragem estocástica com substituição. Observa-se que dessa maneira indivíduos representantes de valores de aptidão pobres podem ser selecionados.

Técnicas de soluções alternativas existem como aleatória uniforme e por torneio (GOLDBERG e DEB, 1990). A seleção tipo torneio faz os indivíduos competirem diretamente, com base nos respectivos valores de função aptidão (FITNESS). Uma maneira simples de implementá-lo é escolher aleatoriamente apenas dois indivíduos e preservar o melhor deles para a próxima geração.

A seleção baseada na ordenação das soluções dentro da população, ao invés dos valores da função aptidão, é utilizada uma escala uniforme automática.

Diversas são as propostas para a escala dos valores da função aptidão na população. Dentre elas destaca-se a escala linear, fazendo que o melhor valor da função de aptidão assuma um valor a vezes superior à média e o valor menor $1/a$ vezes menor que a média da população; a é uma constante de valor geralmente compreendido entre 1,5 e 2,5. Esta sistemática evita a reprodução excessiva e a conseqüente rápida

convergência para um eventual grande valor da função aptidão das iterações iniciais, quando tais valores podem ser muito distintos. Ao mesmo tempo possibilita que as pequenas diferenças nos valores de F.O. sejam acentuadas próximo da convergência para um ótimo local, quando tais diferenças tornam-se muito pequenas, Meier e Barkdoll (2000).

5.3.3 Operadores dos AGs

Recombinação

A recombinação ou cruzamento é o mecanismo de criação de indivíduos (novas soluções) filhos através da recombinação de indivíduos pais (soluções atuais). É o operador que torna os AGs diferentes dos outros algoritmos evolucionários. Geralmente é realizada através da simples permuta ou da combinação de características correspondentes entre soluções pais, sendo que o primeiro esquema mostra-se adequado ao caso de soluções representativas através de código binário, enquanto que o segundo é mais utilizado quando o alfabeto de representação de soluções é real.

A recombinação pode ser realizada de diversas maneiras. Dentre as mais usuais, pode-se citar o cruzamento de um ponto, dois pontos e uniforme (WARDLAW e SHARIF , 1999).

O cruzamento de um ponto prevê a criação de cromossomos a partir da troca de genes de determinada posição escolhida aleatoriamente até o comprimento total do string (cadeia de códigos representativos de determinada solução). O cruzamento de dois pontos define novos indivíduos a partir da troca de informações genéticas entre dois pontos aleatoriamente escolhidos dos cromossomos pais. Já o cruzamento uniforme

prevê que genes individuais sejam considerados na troca de informações para a criação de novos indivíduos, ao invés de blocos de genes ou material genético.

Mutação

A mutação é a sistemática que possibilita a introdução de características genéticas novas às soluções existentes, através da eventual substituição de genes dos indivíduos. Geralmente é realizada bit por bit (no caso do código binário) ou gene por gene (código real), possibilitando que cada bit ou gene seja alterado com uma pequena probabilidade ou taxa p_m entre 0,001 e 0,1, geralmente constante, ou variáveis de acordo com técnicas avançadas de ajuste dinâmico.

Diversas são as possibilidades de mutação. A mutação uniforme é realizada de forma que cada elemento ou gene de um cromossomo possui exatamente a mesma chance de sofrer mutação. A mutação não uniforme é um dos operadores responsáveis pelo refinamento das soluções, através de incrementos controlados nos valores das variáveis de decisão de acordo com a iteração.

A mutação uniforme modificada, segundo Wardlaw e Sharif (1999), permite a modificação de um gene de uma quantia positiva ou negativa especificada. Tais autores empregaram a referida sistemática, mas não especificaram claramente o procedimento adotado.

Condição de finalização

Após a aplicação dos operadores de recombinação e mutação, a nova população está pronta para a próxima avaliação, e o ciclo se repete até que a condição de

finalização seja considerada satisfeita. O critério de finalização mais simples é realizar um determinado número de iterações.

5.3.4 AGs multiobjetivo

A Primeira implementação real de um AG multiobjetivo foi realizada por Schaffer (1984), através do algoritmo VEGA (*Vector Evaluated GA*), para o qual a população solução apresentava tendência de se dividir em diferentes espécies, cada uma deles forte em termos de um objetivo.

Goldberg (1989), comentando o VEGA em seu livro, percebeu uma implementação melhor do princípio de dominância e sugeriu um novo procedimento baseado:

- no maior número de cópias de soluções não-dominadas, através da atribuição do valor de aptidão baseado em rank, e

- na diversidade das soluções, através do partilhamento do valor de aptidão e recombinação restrita entre soluções pertencentes à mesma região do espaço de objetivos/soluções (denominada nicho).

$$f'_i = f_i / m_i \quad m_i = \sum_{j=1}^N sh(d_{ij})$$

$$sh(d_{ij}) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{d_{ij}}{\sigma_s} \right)^\alpha & se \ d_{ij} < \sigma_s \\ 0 & se \ d_{ij} \geq \sigma_s \end{cases} \quad (C)$$

Sendo: f'_i = valor de aptidão partilhado,

m_i = conta do nicho,

d_{ij} = distância entre fenótipos ou genótipos de duas soluções i e j da mesma frente,

σ_s = máxima distância fenotípica permitida para que quaisquer soluções sejam consideradas membros do mesmo nicho, e

α = parâmetro de forma do nicho ($\alpha=2$ -circular).

A partir de então, vários grupos de pesquisadores trabalharam no sentido de produzir diferentes versões para os algoritmos genéticos multiobjetivo, razão pela qual a literatura indica uma grande diversidade de métodos evolucionários multiobjetivos que

diferem entre si na atribuição de valor fictício para a função de aptidão. Constituem exemplos desses métodos:

- ✓ MOGA(**Multiobjective Genetic Algorithm**), Fonseca e Fleming (1993) implementaram as sugestões de Goldberg(1989) de um modo diferente, o “Multi-objective Optimization Genetic Algorithm” ou MOGA usa um procedimento de ordenamento não dominado. Toda a população é verificada e todas as soluções não dominadas recebem uma posição ou ordem 1. Outras soluções são posicionadas segundo a não dominância delas em relação ao restante da população do seguinte modo: para cada solução, o número de soluções que a dominam estritamente é primeiramente determinado na população, logo, a posição no ordenamento desta solução será este número mais 1. Assim sendo, no final deste procedimento de ordenamento poderão existir muitas soluções compartilhando a mesma posição no ordenamento. A rotina de seleção usa este ordenamento para selecionar ou deletar blocos de pontos até escolher as soluções para reprodução. Este tipo de atribuição de aptidão por blocos leva a produzir uma grande pressão de seleção que pode causar convergência prematura. A implementação também usa o método de formação de nichos para distribuir a população através da região ótima de Pareto, além de compartilhar os valores da função de aptidão. Embora isto mantenha a diversidade nos valores da função de aptidão, pode não manter a diversidade no conjunto das variáveis, assim, o MOGA pode não estar apto a achar as múltiplas soluções em problemas onde diferentes pontos ótimos de Pareto correspondem para os mesmos valores de aptidões. O destaque relevante deste trabalho é o ordenamento das soluções por critérios de dominância.
- ✓ NPGA(Niched Pareto **Genetic Algorithm**), Horn *et al.* (1994) implementam um algoritmo genético geracional com sobreposição, isto é, nem todas as soluções são substituídas de uma geração para outra que foi denominado “Niched Pareto Genetic Algorithm” ou nPGA. Ele faz uso de um procedimento de ordenamento na etapa de seleção. Um conjunto de comparação compreendido de um número específico de soluções (t_{dom}) é tomado randomicamente da população no início de cada processo de seleção. Em seguida dois indivíduos são retirados da

população para a seleção de um vencedor conforme o seguinte procedimento: ambas soluções são comparadas com os membros deste conjunto de comparação para determinação da dominância segundo as funções objetivos. Se um deles é não dominado e o outro é dominado, então o ponto não dominado é selecionado, mas caso ambos sejam não dominados ou dominados, um contador de nicho é criado para cada indivíduo na população inteira. O contador é baseado no número de soluções na população com uma certa distância (f_{share}) do indivíduo. Assim, a solução que apresentar o menor contador de nicho é selecionada. O sucesso deste algoritmo é altamente dependente do parâmetro t_{dom} . Se um tamanho apropriado for escolhido, pontos não dominados (ótimos de Pareto) podem ser achados. Caso t_{dom} seja pequeno podem existir poucos pontos não dominados na população e valores grandes de t_{dom} podem levar à convergência prematura do algoritmo. O conceito de formação de nichos entre os pontos não dominados é o aspecto mais relevante do trabalho, que tem como inconveniente à introdução de mais parâmetros a serem configurados para o funcionamento do algoritmo genético.

- ✓ NSGA(*Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*), Srinivas e Deb (1994), apresentaram mais uma implementação baseada nas sugestões de Goldberg. A idéia por trás do algoritmo é a utilização de um procedimento de seleção por ordenamento ou ordenamento para enfatizar as soluções não dominadas correntes, juntamente com um método voltado para a criação de nichos para manter a diversidade da população. A diferença desta implementação em relação a um algoritmo genético simples está apenas no modo com que o operador de seleção é empregado. Tanto o operador de recombinação como o operador de mutação são os usuais da técnica. Antes do procedimento de seleção ser aplicado a população é ordenada com base num nível de não dominância das soluções, isto é, todas as soluções não dominadas da população corrente recebem valores altos de aptidão. Esta aptidão é a mesma para todas as soluções não dominadas, garantindo assim que todos possuam um mesmo potencial reprodutivo. Para manter a diversidade na população as soluções não dominadas compartilham os seus valores de aptidão segundo suas distâncias Euclidianas (também pode ser adotada a distância de Hamming - número de bits diferentes entre duas

soluções). Finalmente, divide-se o valor da aptidão de cada indivíduo pelo contador de nichos que é proporcional ao número de vizinhos ao seu redor. Este procedimento proporciona a co-existência de pontos ótimos múltiplos na população. O pior valor de aptidão compartilhada na solução da primeira fronteira não dominada é então guardada para uso posterior. Depois que o compartilhamento é executado e que as aptidões são modificadas as soluções não dominadas são ignoradas temporariamente para processar o resto dos membros da população. O procedimento para determinar novas soluções não dominadas (segundo nível) é novamente executado, sendo que agora eles recebem um valor de aptidão um pouco menor que o pior valor de aptidão compartilhada no nível anterior. Uma vez mais o procedimento de compartilhamento é executado entre as soluções não dominadas do segundo nível e as novas aptidões são calculadas como antes. Este processo é continuado até que todos os membros da população tenham um valor de aptidão compartilhada. A reprodução da população é efetuada utilizando-se a aptidão compartilhada, ou seja, como o primeiro nível de soluções não dominadas possui as mais altas aptidões, um maior número de cópias das suas soluções será realizado e levará a busca para a fronteira ótima de Pareto. A característica mais importante deste trabalho é que praticamente qualquer número de objetivos pode ser usado para os dois tipos de problemas: maximização ou minimização, bastando mudar o modo como os indivíduos não dominados são identificados. Como fraqueza este algoritmo exige alguns novos parâmetros de configuração que são sensíveis e provocam forte influência no desempenho da busca.

- ✓ PAES(Pareto Archived Evolution Strategy), Knowled e Corne (2000), por sua vez, consiste numa Estratégia evolutiva combinada com um arquivo que guarda algumas das soluções não dominadas encontradas ao longo da procura. Cada nova solução, resultante da aplicação da mutação ao progenitor, é comparada com as soluções presentes no arquivo. O PAES utiliza um mecanismo de *crowding*, baseado na definição de uma grelha no espaço dos objetivos. A diversidade é conseguida com base na contagem do número de soluções em cada uma das células da grelha. Neste algoritmo, as variáveis de decisão o, ao

contrário das tradicionais EEs, são representadas utilizando sequências de dígitos binários. Por outro lado, não é considerada a adaptação, ao longo da procura, dos parâmetros de mutação.

- ✓ SPEA(*Strongh Pareto Evolutionary Algorithm*), Zitler (2001), que foi utilizado neste estudo e por isso será melhor detalhado nos tópicos a seguir.

Zitzler e Thiele(1999) introduziram o elitismo através da manutenção de uma população externa. Esta população armazena um número fixo de soluções não-dominadas encontradas no início da simulação. A cada geração, as novas soluções não-dominadas são comparadas à população externa existente e as soluções não-dominadas resultantes são preservadas. Este algoritmo é chamado *Strength Pareto Evolutionary (SPEA)*, que além de preservar as melhores soluções, também as utiliza nas operações genéticas com as populações correntes, direcionando a população a se encaminhar em direção as boas regiões do espaço de busca.

Segundo Coello et al (2002), o SPEA pertence ao que ele considera a segunda geração de técnicas para desenvolvimento de algoritmos multiobjetivos. A segunda geração é caracterizada por primar pela eficácia dos métodos, em que é comum a presença de populações externas, e a busca por soluções não dominadas, e ao mesmo tempo, bem distribuídas por toda a frente Pareto. Um estudo realizado por Zitzler et al (2000) compara o desempenho de alguns algoritmos genéticos multiobjetivos, entre eles, VEGA, MOGA, NPGA, NSGA e SPEA. Algumas métricas são utilizadas para comparar as soluções encontradas pelo algoritmo, sempre levando em conta a distância entre a frente Pareto encontrado e a frente Pareto ideal, a distribuição das soluções na frente Pareto e o tamanho do intervalo de valores que cada um dos objetivos é capaz de cobrir. De acordo com essas métricas, os algoritmos foram testados em seis (6) funções teste, e uma hierarquia entre eles foi encontrada. O SPEA foi considerado o mais eficaz deles.(ZITZLER,2000)

5.3.5 Aplicações das Técnicas de Otimização aos Problemas Decisórios na Agricultura.

Bonfanti et al. (1997) sugerem ferramentas não convencionais para auxílio na tomada decisão, buscando uma agricultura sustentável que envolve a adoção de novas tecnologias e um planejamento de longo prazo. Com esse pensamento é sugerida uma ferramenta de suporte à decisão com uma estrutura de hierarquias capaz de subsidiar políticas de decisão agrícolas e ambientais.

Castro et al. (2001) cita o uso de ferramentas de características multi-níveis, multi-interesses, multi-atributos. Métodos de Análises Hierárquicas, Métodos multicritérios são utilizados no Programa de Desenvolvimento Sustentável de Recursos Hídricos para o Semi-Árido Brasileiro (PROÁGUA). O estudo envolve principalmente os métodos: Análise tradicional custo/benefícios, ELECTRE I e II, PROMETHEE, MACBETH e ME-MCDM.

Raju e Kumar (1999) examinaram planos de irrigação para Andhra Pradesh (Índia), considerando três objetivos conflitantes: benefício líquido, produção agrícola e geração de empregos. A motivação para tal estudo foi a baixa eficiência dos sistemas de irrigação utilizados nos países em desenvolvimento, que a torna não atraente economicamente. Para tanto realizaram uma análise em três estágios:

- ✓ Primeiro estágio, otimização multiobjetivo aplicada com a finalidade de gerar “alternativas não-dominadas” para a atividade em questão;
- ✓ Segundo estágio, análise de agrupamento visando reduzir essas alternativas não dominadas em subconjuntos gerenciáveis;
- ✓ Terceiro estágio, utilização dos métodos multicriteriais PROMETHEE-2 e EXPROM-2, para a ordenação dos sistemas de irrigação.

Como resultado, obtiveram uma ordenação dos sistemas de irrigação segundo os critérios pré-estabelecidos. Também ficou comprovado que o EXPROM-2 mostrou-se mais eficiente que o método PROMETHEE-2, e que a análise de agrupamento é uma eficiente ferramenta para reduzir o número de alternativas não dominadas para um subconjunto gerenciável.

Silva e Santos (2001) aplicaram métodos de programação multicriterial (análise hierárquica-AHP), inicialmente proposto por Dr. Thomas Saaty. A metodologia AHP se baseia:

- ✓ Na observação das pessoas que participam de um processo de estruturação e priorização de uma hierarquia, elas se empenham naturalmente em sucessivos agrupamentos de elementos dentro dos níveis e na distinção entre níveis de complexidade.
- ✓ Os indivíduos informados sobre um determinado problema podem estruturá-lo hierarquicamente de maneira um tanto diferente, mas se seus julgamentos forem semelhantes, suas respostas gerais deverão ser semelhantes.
- ✓ Uma forma matematicamente racional de lidar com os julgamentos.

Os métodos de programação multicriterial, visando a ponderação dos objetivos e de geração de soluções eficientes, foram utilizados para auxiliar o pequeno produtor rural (5 hectares) do Projeto de Irrigação do Jaíba na região do Vale Médio São Francisco, no estado de Minas Gerais (SILVA, 2001). Esse projeto apresenta características semelhantes aos projetos de irrigação de regiões de clima semi-árido e árido em que a produção depende de sistemas de irrigação, dada a notória escassez de água e elevada evapotranspiração. A ponderação dos objetivos e a geração de soluções eficientes foram inseridas preconizando uma estratégia de produção mais econômica para um determinado período de tempo, período este que não é detalhado pelos autores, (subentende-se uma safra).

O estudo é fundamentado no fato de que os produtores não conseguem alcançar, entre outros objetivos: a margem bruta ideal para o processo produtivo; o nível ótimo de emprego de mão-de-obra por área irrigada; a utilização de horas de tratores e implementos agrícolas de forma eficiente; o uso racional da água e da energia. Visando solucionar parte destes problemas, o trabalho cria uma ferramenta eficiente para auxiliar na tomada de decisão estabelecendo e quantificando as atividades de um modo a contemplar:

- ✓ Margem bruta do processo produtivo.
- ✓ Mão de obra disponível.
- ✓ Impactos ambientais

Margem bruta do processo produtivo, ou seja, o quanto o produtor é remunerado pelo produto, fornecendo ao tomador de decisão o ordenamento de estratégias de produção a serem adotadas para um determinado período, possibilitando, ao produtor,

uma escolha consciente; otimizar o emprego de mão-de-obra disponível, no caso mão de obra de baixa qualificação; minimizar o risco econômico no processo produtivo e no planejamento financeiro do pequeno produtor, aumentando assim o conhecimento sobre a atividade, possibilitando utilizar outros recursos, como o financiamento na produção do período; minimizar os impactos ambientais, fornecendo ao produtor rural a decisão da melhor estratégia quanto à quantidade de água e agro-tóxicos a serem requeridas no período, levando-se em conta característica do solo onde será feito o plantio; e otimizar o uso do lote no que se refere à área destinada a produção, bem como o produto a ser produzido.

No estudo foram comparadas 9 culturas diferentes e o resultado foi um ordenamento das atividades quanto à margem bruta ou seja a remuneração do produtor pelo produto produzido (lucro + custo de produção), risco econômico e danos ambientais. Com isso os autores obtiveram a preleção de algumas culturas em relação a outras.

A aplicação de métodos de programação multicriterial (análise hierárquica), de ponderação dos objetivos e de geração de soluções eficientes tem flexibilidade no sentido de produzir soluções que levem em conta fatores mais específicos e particulares a cada situação de decisão.

Parsons (2002), motivado pela compra de uma propriedade agrícola de 129,5 hectares, elaborou um sistema de suporte à decisão para auxiliar o gerenciador agrícola no processo decisório. A ferramenta compara até 5 alternativas diferentes de produção considerando: o retorno do proprietário da terra, retorno ao arrendatário, redução dos riscos associados às intempéries, flexibilidade, investimento, requisitos de mão de obra, controle de erosão e sustentabilidade. As alternativas são ordenadas usando os métodos PROMETHEE I e II e da Média Ponderada por Pesos, implementados e trabalhados em plataforma do Microsoft EXCEL (*Agland decision Tool*).

Ele apresentou uma aplicação para a região ocidental de Nebraska, EUA, para demonstrar as potencialidades do sistema. O autor empregou três culturas diretamente comercializáveis e três alternativas de pastagem para construir cinco planos alternativos para comparação, conseguindo identificar claramente duas opções, mostrando-se este capaz de comparar vários planos de produção agrícolas, embora seja somente um protótipo para o futuro desenvolvimento de ferramentas multicriteriais de suporte a produção agrícola.

O trabalho de Ganoulis (2001) foi motivado por:

- ✓ Debate entre a União Européia e os países do mediterrâneo (meio-oeste e norte da África) na negociação de um livre comércio, tendo em vista a produção alimentos e o custo da água;
- ✓ A massiva produção de alimentos e aumento das áreas de irrigação e conseqüente aumento do consumo de água, o que gera um problema ambiental que envolve a qualidade da água, pois ocorre a contaminação através do uso de fertilizantes e pesticidas e também em termos de quantidade, pois os sistemas de irrigação podem tornar-se ineficientes, ocorrendo o desperdício de água e energia;
- ✓ A política de cobrança pelo uso da água também, confere à relação uma divergência econômica, pois, se o preço da água praticado por um determinado país for irrisório, seus produtos seriam excessivamente baratos em relação aos produtos de outros países, do mesmo modo se os valores praticados, preço da água, forem excessivos tornariam o produto incapaz de competir no mercado mediterrâneo.

Para auxiliar na resolução destes problemas sobre o uso da água na atividade agrícola, Ganoulis (2001) propôs uma ordenação de estratégias alternativas para o uso e cobrança pelo uso da água na agricultura euro-mediterrânea. Para tanto sugeriu uma simulação de custo da água destinada à agricultura desta região, considerando aspectos econômicos, técnicos, ambientais e sociais do gerenciamento dos recursos hídricos. Estratégias alternativas de estabelecimento do custo da água foram avaliadas através da análise da decisão multicriterial (ELECTRE III, ELECTRE IV e Programação de Compromisso).

Ganoulis mostrou dois estudos de caso desenvolvidos para Espanha e Grécia. Os critérios usados para identificar a melhor alternativa possível incluíram, primeiramente, fatores econômicos, com o custo inicial do sistema de irrigação, custo de manutenção e benefício da irrigação na produção; o segundo critério utilizado foram os fatores ambientais, como: volume de água utilizado, poluição da água durante e depois da irrigação e a eficiência do uso da água; o terceiro critério foi o fator social, que incluía o desenvolvimento ou evolução dos postos de trabalho. Isso possibilitou a ordenação de diferentes estratégias, que foram formuladas através destas ferramentas de análise

multicritério, combinando: custo da água, tipo do esquema de irrigação, distribuição das culturas. Como resultado obtiveram a mesma estratégia ótima para ambos os casos (Espanha e Grécia) e segundo as três ferramentas empregadas, como uma indicação da robustez do custo sustentável da água e comprovando a eficiência de ferramentas de análise multicritério no planejamento de políticas para a produção agrícola.

Santos (2007) desenvolveu um modelo de otimização para o estudo da operação integrada de sistemas de reservatórios e perímetros irrigados, além de outros usos da água, objetivando a alocação ótima dos recursos hídricos entre os múltiplos usos e o estabelecimento de políticas operacionais via uma análise multiobjetivo. As não-linearidades intrínsecas aos processos de cada um de seus componentes foram implementadas através de um procedimento iterativo, fazendo uso da programação linear sequencial. O modelo desenvolvido é baseado em programação linear, onde foi utilizado o Toolbox Optimization do software MATLAB 6.5 com o Método do Ponto Interior para a busca da solução ótima. O comportamento do sistema foi analisado para cinco objetivos (estabelecidos para o atendimento do abastecimento humano, vazão ecológica, volume meta, receita líquida e mão-de-obra oriunda da atividade agrícola) e três cenários hidroclimáticos (seco, normal, chuvoso) para os períodos de um e cinco anos. Os resultados mostraram a eficiência do modelo em análise multiobjetivo e na seleção de regras operativas para a alocação da água atendendo as demandas, os objetivos estabelecidos e as restrições físicas estabelecidas. Com relação ao perímetro irrigado, o tomate, na safra e entressafra, e as culturas perenes como banana, coco, manga, graviola e goiaba são as culturas mais atrativas para o universo de 5 anos estimados.

Assim, pretende-se nesta revisão contemplar os conceitos básicos da otimização multiobjetivo e apresentar os modelos não convencionais propostos na literatura.

6. MATERIAL E MÉTODOS

O modelo computacional proposto para ordenamento dos processos produtivos agrícolas é desenvolvido em três fases distintas. A primeira fase, denominada etapa preliminar, contempla os estudos que envolvem a busca por informações dos processos. Essas informações englobam: culturas a serem desenvolvidas para região, dados

produtivos das respectivas culturas, remuneração pelo produto, custos de implantação e manutenção do pomar e sistemas de irrigação, e consumo de água e energia elétrica das culturas e sistemas de irrigação

Na segunda fase do modelo proposto, denominada etapa de avaliação, identificam-se soluções de melhor compromisso através de algoritmos de otimização que contemplam vários objetivos simultaneamente. Para esse fim, é utilizado um algoritmo genético multiobjetivo denominado *Strength Pareto Evolutionary Algorithm* – SPEA. Cinco funções objetivo (maximização de benefício econômico, minimização de consumo hídrico, minimização do consumo de energia elétrica, maximização de geração de empregos e maximização da produção de alimentos) são propostas para serem otimizadas simultaneamente. Quanto à cobrança da água discriminada na Lei Federal 9.433 de 8 de janeiro de 1997, foram investigados valores de US\$5, US\$ 10, US\$15, US\$20 e US\$ 25 por mil metros cúbicos, valores estes comumente encontrados na literatura.

As fases de desenvolvimento do trabalho compreenderam:

A) Levantamento de dados

- ✓ Delimitação e caracterização da área a ser simulada;
- ✓ Levantamento das culturas e sistemas de irrigação utilizados na área de referência;
- ✓ Levantamento da demanda hídrica da região em questão;
- ✓ Elaboração de projetos específicos levando em conta a cultura a ser adotada, bem com o sistema de irrigação a ser implantado;
- ✓ Levantamento da demanda hídrica de cada cultura específica e seu comportamento segundo o tempo na região em questão;
- ✓ Levantamento do custo de implantação dos pomares e dos respectivos sistemas de irrigação, através de preços médios de insumos, materiais e mão de obra;
- ✓ Cálculo da depreciação dos pomares e também dos sistemas de irrigação levando em conta a vida útil de cada um deles;

- ✓ Levantamento dos preços médios praticados pelos órgãos na cobrança pelo uso da água e também levantamento do preço da energia elétrica praticado na região sob a tipificação de água para irrigação em setor rural;
- ✓ Estimativa da produção média de cada cultura a ser empregada;
- ✓ Elaboração da receita dos produtores nos possíveis projetos, levando em conta o preço médio e mínimo pago ao produtor por unidade de produto no estado de São Paulo.

B) Escolha do algoritmo genético multiobjetivo

- ✓ Determinação dos objetivos econômico-financeiros, ambientais e sociais a serem considerados: maximização do benefício líquido (F1), minimização do consumo de água (F2), maximização da geração de empregos (F3), maximização da diversidade na produção de alimentos(F4).

C) Simulação computacional

- ✓ Elaboração da rotina de cálculo em linguagem C++ em programa BordlandC++Builder 5, utilizando algoritmo genético multiobjetivo SPEA;
- ✓ Adequação dos dados levantados para a leitura pelo programa.

D) Interpretação dos resultados.

6.1 Tamanho da Área a ser simulada

Estabeleceu-se como referência um módulo rural fiscal, Unidade de medida expressa em hectares, fixada para cada município, considerando os seguintes fatores:

- ✓ Tipo de exploração predominante no município;
- ✓ Renda obtida com a exploração predominante;
- ✓ Outras explorações existentes no município que, embora não predominantes, sejam significativas em função da renda ou da área utilizada;
- ✓ Conceito de propriedade familiar, que varia conforme a região do país.

No município de Botucatu, SP, o módulo rural equivale a 20 hectares. Para efeito deste estudo dividiu-se hipoteticamente a área em 4 partes iguais, de 5 ha cada, visando uma busca de soluções que permitiam diversidade no que se refere às culturas e ao sistema de irrigação a implantar. Foram necessários, portanto, o levantamento das temperaturas médias históricas da região de Botucatu, cálculo do balanço hídrico, cálculo da demanda hídrica da(s) cultura na região, o levantamento de custos de implantação e manutenção das culturas(mão de obra e insumos), levantamento de custos de implantação e manutenção dos sistemas de irrigação(mão de obra e consumo de energia elétrica e de água), levantamento das produtividades médias das culturas em questão para o estado de São Paulo, levantamento dos preços pagos ao produtor no período de janeiro de 2004 a dezembro de 2006 no estado de São Paulo.

6.2 Dimensionamento das Culturas

O número de plantas por hectare, bem como a adubação de plantio e manutenção e tratos culturais que são em função do número de plantas, foram determinados através do Manual Técnico das Culturas da Secretaria da Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo, 1997.

O manual possibilita em alguns casos na questão de espaçamento entre plantas, neste momento foi escolhido o espaçamento mais praticado na região de Botucatu, em conformidade com a Tabela 6.1.

Tabela 6.1 Número de plantas por hectare

Cultura	Número de plantas por hectare
Ameixa	417
Atemóia	417
Caqui	417
Goiaba	417
Pêssego	417
Maçã	1250

Fonte: adaptado do Manual de Técnico das Culturas, 1997.

6.3 Dimensionamento do Sistema de Irrigação

A base para o dimensionamento dos sistemas de irrigação foi o Manual de Irrigação de Salassier Bernardo, de 1995. Os dimensionamentos seguiram os seguintes critérios:

- ✓ lâmina líquida (volume de água aplicado à cultura por dia) em função da cultura e seu estágio de desenvolvimento, em mm;
- ✓ lâmina bruta (volume de água aplicado à área) em função do sistema de irrigação adotado e da cultura implantada e seu respectivo desenvolvimento, em mm;
- ✓ turno de rega, tempo necessário para que o sistema de irrigação volte a operar na mesma posição, em dias;
- ✓ período de irrigação, tempo total de operação do sistema, em horas por dia;
- ✓ escolha do emissor(aspersor, microaspersor e gotejador), pois suas características determinam o espaçamento entre os emissores;
- ✓ tempo de irrigação por posição, tempo que o sistema fica operando no mesmo local;
- ✓ número de posições irrigadas por lateral, em função do tipo de emissor e espaçamento;
- ✓ número total de posições de lateral, em função do espaçamento da cultura e do emissor utilizado;
- ✓ número de posições a serem irrigadas por dia, em função do tipo de emissor e período de irrigação e;
- ✓ número de laterais necessárias, em função do tipo de emissor e espaçamento da cultura.

A determinação da lâmina líquida para o cálculo de dimensionamento do sistema de irrigação utilizou-se o coeficiente de cultura (K_c) recomendado pela FAO em caso de dimensionamento, de valor igual a 0,9 para todas as culturas.

O dimensionamento foi feito em planilhas do Microsoft Excel, Anexo A deste estudo. Levando também em conta os seguintes dados

A) Relativo à área e aos recursos hídricos

- ✓ área a ser irrigada: 5 ha
- ✓ dimensionamento e forma: 250m x 200m, retangular.
- ✓ fonte de água: superficial.
- ✓ vazão disponível: atende a demanda
- ✓ classificação: satisfatória, sendo necessária a filtragem para os sistemas de irrigação por gotejamento e microaspersão.
- ✓ evapotranspiração para dimensionamento: 3,13 mm/dia (media dos valores de pico de 4 anos) obtida através do método de Thornthwaite e Mather (1955)
- ✓ Coeficiente de Cultura (kc): 0,9 (recomendado pela FAO)

B) Relativos à cultura

- ✓ espaçamento entre plantas, que depende da cultura, no caso 2 espaçamentos, 6m x 4m, para ameixa, atemóia, caqui, goiaba e pêssago, e 4m x 2m para as culturas de maçã.
- ✓ quantidade de plantas, também em função da cultura, 2085 plantas para ameixa, atemóia, caqui, goiaba e pêssago, e 6250 plantas para as culturas de maçã.
- ✓ profundidade efetiva da raiz, para todas as culturas: 0,6 m, obtida através de dados médios.
- ✓ proporção da área sombreada, para todas as culturas: 60%

Observa-se que os dados de espaçamento que determina a quantidade de plantas por hectare foram adotados com base no manual de técnico das culturas , CATI (1997); e os dados de profundidade efetiva das raízes e proporção de área sombreada foram baseados em recomendações de Bernardo (1995).

6.3.1 Dimensionamento do Sistema de Irrigação localizada por gotejamento e microaspersão.

A irrigação tem como objetivo de repor a quantidade de água perdida na evapotranspiração, para isso é necessário o cálculo da evaporação média para o projeto. Para os cálculos a seguir foram utilizadas recomendações e roteiro de equações conforme Bernardo (1995).

No cálculo da evapotranspiração média na área do projeto utilizou-se a seguinte equação:

$$E_{tg} = E_{Tpc} \cdot \frac{P}{100} \quad (1)$$

Em que:

E_{tg} = evapotranspiração média, na área irrigada por emissor, em mm/dia;

E_{Tpc} = evapotranspiração potencial da cultura, em mm/dia;

P = percentagem da área molhada, em relação à área total irrigada.

Para se calcular o valor de ***E_{Tpc}***, utiliza-se a seguinte equação:

$$E_{Tpc} = K_c \cdot E_{to} \quad (2)$$

Onde:

K_c = coeficiente de cultura, para fins de dimensionamento tem o valor 0,9, recomendado pela FAO.

Eto = evapotranspiração de referência, em mm/dia, que neste estudo se refere à evapotranspiração(***ETP***) máxima da região em mês de déficit hídrico dividido por 30, para obter o resultado em mm/dia. Neste caso o valor máximo (1999-2003) para ***ETP*** foi 93,85 no mês de outubro. Portanto, a ***Eto*** da região de Botucatu foi de 3,128mm/dia.

Para se calcular o valor de ***P***, que é em função do espaçamento entre os emissores e do tipo de emissor (microaspersor ou gotejador), usa-se a seguinte equação:

$$P = 100.n.\frac{Sg.Sm}{AI} \quad (3)$$

Onde:

n = número de gotejadores ou de pontos de emissão;

Sg = espaçamento entre gotejadores, em metros;

Sm = largura da faixa molhada, é variável conforme o emissor e o tipo de solo, utilizado valor igual 1,5 conforme recomendação (Bernardo,1995).

AI = área representada por planta, em função do espaçamento entre elas, ameixa espaçamento 6m x 4m, portanto ***AI*** = 24 m².

Calculada a ***Etg***, deve-se calcular a Irrigação real necessária (***IRN***). Para tal utiliza-se a seguinte equação:

$$IRN = ETg.TR \quad (4)$$

Onde:

IRN = irrigação real necessária, em mm/rega;

Etg = evapotranspiração média, na área irrigada por emissor, em mm/dia;

TR = turno de rega ou intervalo entre as irrigações no mesmo local, em dias.

De posse da ***IRN***, deve-se calcular a irrigação total necessária, que leva em conta a eficiência do sistema de irrigação:

$$ITN = \frac{IRN}{Ea} \quad (5)$$

Onde:

ITN = irrigação total necessária, em mm/rega;

IRN = irrigação real necessária, em mm/rega;

Ea = eficiência do sistema de irrigação, que varia conforme o sistema utilizado, 95% para gotejamento, 90% para microaspersão e 80% para aspersão convencional.

Após o cálculo da **ITN** deve-se calcular o tempo de funcionamento do emissor naquele local para que o mesmo supra a demanda de água :

$$T = ITN \cdot \frac{AI}{n \cdot q} \quad (6)$$

Onde:

T = tempo de funcionamento no local, em horas;

ITN = irrigação total necessária, em mm/rega;

AI = área representada por cova, em função do espaçamento entre plantas, ameixa espaçamento 6m x 4m, portanto **AI** = 24 m².

n = número de emissores por árvores;

q = vazão do emissor, em litro/hora, a vazão do emissor utilizada foi retirada de tabela de produtos comerciais, o fabricante do emissor fornece a vazão dos emissores em diferentes condições de pressão.

Após o cálculo do tempo de funcionamento (**T**), faz-se necessário o cálculo do numero de unidades operacionais(**N**) em que o projeto de irrigação deve ser dividido, sendo determinado pela seguinte equação:

$$N \leq \frac{TR \cdot 24}{T} \quad (7)$$

Onde:

TR = turno de rega ou intervalo entre as irrigações no mesmo local, em dias.

T = tempo de funcionamento no local, em horas;

Sendo que **N** tem que ser um número inteiro e de preferência um número par, podendo ser igual ou menor ao valor encontrado pela fórmula. Para este estudo foram adotados para os sistemas de irrigação por gotejamento com espaçamento de 6m x 4m, o valor 8, já para os sistemas de irrigação por microaspersão, com espaçamento de 6m x 4m, o valor 10.

Nas culturas de espaçamento de 4m x 2m para ambos sistemas(gotejamento e microaspersão) o valor utilizado foi 10.

Feito isso calcula-se a Vazão Necessária(***Q***), que é a capacidade do sistema determinada pela seguinte equação:

$$Q = 2,78 \cdot \frac{A.Etg.TR}{N.T.Ea} \quad (8)$$

Onde:

Q = vazão necessária para o projeto, em litros por segundo (L/s);

A = área do projeto, em hectares;

Etg = evapotranspiração média, na área irrigada por emissor, em mm/dia;

TR = turno de rega ou intervalo entre as irrigações no mesmo local, em dias;

N = número de unidades operacionais adotado;

T = tempo de funcionamento no local, em horas;

Ea = eficiência do sistema de irrigação, que varia conforme o sistema utilizado, 95% para gotejamento, 90% para microaspersão e 80% para aspersão convencional;

Com a determinação da vazão necessária em cada lateral, passa-se aos cálculos de dimensionamento da linha lateral.

A linha lateral é a linha na qual estão inseridos os emissores, a determinação do seu comprimento e diâmetro, é em função da variação de vazão entre o primeiro e o último emissor ao longo da linha lateral, neste caso por se tratar de irrigação suplementar utiliza-se o limite de 20% na vazão. Já a variação de pressão ao longo da linha lateral é determinada pela perda de carga(***J***), conforme a seguinte equação (*Hazen-Williams*):

$$J = 1,21 \cdot 10^{10} \cdot \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,852} \cdot D^{-4,87} \quad (9)$$

Onde:

J = perda de carga unitária, em m/m;

Q = vazão necessária para o projeto, em litros por segundo (L/s);

C = coeficiente do material do tubo, neste estudo adotado 144, (Bernardo,1995).;

D = diâmetro da tubulação, em mm;

Em seguida calcula-se a perda de carga na linha lateral (ΔH), com a seguinte equação:

$$\Delta H = J.L.F.\left(\frac{C}{C_g}\right)^{1,852} \quad (10)$$

Onde:

ΔH = perda de carga na linha lateral, em metros;

J = perda de carga unitária, em metros de coluna d'água/metros de tubulação;

L = comprimento da linha lateral, em metros;

C = coeficiente do material do tubo, neste estudo adotado 144 (Bernardo,1995).;

C_g = coeficiente de Hazen-Williams da linha com emissor, (Bernardo,1995);

F = fator de Christiansen, para compensação das múltiplas saídas, também tabelado, (Bernardo,1995).

A perda de carga na linha lateral não deverá ultrapassar 20% da pressão de serviço do emissor, caso ultrapasse o diâmetro deverá ser mudado para ajustar a perda de carga ao limite estabelecido, garantindo assim uniformidade mínima entre os emissores.

Calculada a perda de carga da linha lateral calcula-se então a pressão necessária no início da linha lateral(P_{in}), pela equação:

$$P_{in} = P_s + 0,75\Delta H \pm 0,4\Delta Z \quad (11)$$

Onde:

P_{in} = pressão início da linha lateral;

P_s = pressão de serviço do emissor, neste estudo utilizado o valor 10 m.c.a. para gotejadores, 15 m.c.a. para microaspersores, conforme recomendação do produto comercial;

ΔH = perda de carga na linha lateral, em metros;

ΔZ = variação de cota, em metros, neste estudo foi desprezada com o valor igual a 0 (zero).

Com a determinação da pressão no início da linha lateral, concluem-se os cálculos para a linha lateral. Assim, passa-se aos cálculos da linha de derivação.

A linha de derivação é a linha na qual estão inseridas as linhas laterais, isto é, a linha que faz conexão da linha principal com as linhas laterais. O seu dimensionamento é idêntico ao dimensionamento das linhas laterais, sendo o fator F , neste caso, em função do número de linhas laterais conectadas à linha de derivação e o limite máximo de perda de carga permitido de 10% da pressão de serviço dos emissores.

A pressão necessária, no início da linha de derivação, será a soma da pressão requerida para a linha lateral, com a perda de carga e a possível variação de cota ao longo da linha lateral. Portanto, repetem-se os cálculos realizados através das equações 9 e 10 utilizadas para o cálculo da pressão necessária na linha lateral ajustando-se o comprimento, número de saídas e o diâmetro da tubulação. Já a pressão no início da linha lateral é obtida através da equação.

$$Pin = Pin(linha lateral) + \Delta H + 0,8 \quad (12)$$

Onde:

Pin = pressão início da linha de derivação;

$Pin(linha lateral)$ = pressão início da linha lateral;

ΔH = perda de carga na linha de derivação, em metros;

$0,8$ = ajuste recomendado para perda de carga no registro e na válvula, (Bernardo,1995).

Concluída esta etapa, passa-se ao dimensionamento da linha principal. A linha principal é a que faz a conexão do cabeçal de controle² com as linhas de derivação.

O dimensionamento da linha principal foi realizado com o apoio do layout do projeto para determinar a vazão máxima requerida, de acordo com a posição e manejo das linhas laterais na área irrigada. A distribuição de pressão na linha principal não é o somatório das pressões das diversas linhas laterais, porém a distribuição das vazões é aditiva. São dois os critérios utilizados para dimensionamento da linha principal. O primeiro é o critério técnico, utilizado neste estudo, que estabelece uma variação de pressão no trecho compreendido entre a primeira e a última posições da lateral, no máximo igual a 15% da pressão de serviço dos emissores ou que a velocidade da água na tubulação não exceda 2,0 m/s. O segundo, critério econômico, consiste em minimizar a soma do custo fixo anual da tubulação com o custo anual de perda de carga. Para este

² Cabeçal de controle é o conjunto de equipamentos necessários para o correto funcionamento dos sistemas de irrigação localizada, : medidor de vazão, filtro, injetor de insumos, válvula de controle de pressão, registros e manômetro.

critério é necessário conhecer os custos das tubulações de diferentes diâmetros e o custo de energia, entre outros. A adoção do critério técnico se justifica por ser mais prático e também foi alvo de ajustes, objetivando sempre diâmetros menores.

Para tal dimensionamento fez-se uso novamente das equações 9 e 10, já para o cálculo da perda de carga(ΔH) na linha principal utiliza-se a seguinte equação:

$$\Delta H = J.L \quad (13)$$

Onde:

ΔH = perda de carga na linha principal, em metros;

J = perda de carga unitária, em m/m;

L = comprimento da linha principal, em metros.

Prossegue-se com o cálculo da pressão no início da tubulação principal(Bernardo, 1995):

$$Pin = Pin(linhaderivação) + \Delta H + 1,5 \quad (14)$$

Onde:

Pin = pressão inicio da linha de principal;

$Pin(linhaderivação)$ = pressão inicio da linha de derivação;

ΔH = perda de carga na linha de principal, em metros;

$1,5$ = ajuste recomendado para perda de carga nas tubulações, Bernardo, 1995

E, finalmente, de posse dos dados de vazão a ser recalçada e altura manométrica requerida pelo sistema (a altura manométrica é a soma da pressão requerida na entrada da linha lateral e perdas de carga nas linhas principais), obtidos nas etapas de cálculo anteriores, seleciona-se o conjunto motobomba. Os dados são trabalhados e um ajuste quanto à eficiência é adicionado (deve-se admitir uma folga, ou margem de segurança, na potência instalada; esta folga é função da potência calculada e também encontra-se tabelada no manual), determinando assim a potência e modelo de bomba capaz de atender aos requisitos de funcionamento e, posteriormente a potência do motor

$$P = \frac{Q.Hman}{75.Emb} \quad (15)$$

Onde:

P = potência na entrada do motor, em cv;

Q = vazão bombeada, em litros por segundo(L/s);

H_{man} = altura manométrica total requerida no sistema (P_{in} da linha de principal), em m.c.a.;(usar mH₂O)

Emb = eficiência do conjunto motobomba, em decimal, neste estudo utilizou-se o valor 0,6, resultante do produto das eficiências individuais recomendadas para bomba 65% e motor 92%.

Posteriormente, por segurança, adiciona-se 30% à potência instalada conforme a Tabela 6.2.

Tabela 6.2 Relação entre potência instalada e acréscimo a ser adotado em motobombas

<i>Potência instalada</i>	<i>Acréscimo</i>
< 2cv	30%
2 a 5 cv	25%
5 a 10 cv	20%
10 a 12 cv	15%
>20 cv	10%

Fonte: Bernardo, 1995.

6.3.1.1 *Layouts* de apoio à avaliação dos custos para cada sistema de irrigação localizada.

Para efeito do dimensionamento dos sistemas de irrigação, foram adotados os *layouts* de apoio, figuras 6.1 e 6.2, descritos a seguir:

A) Maça com espaçamento em metros de 4x2 em sistema de irrigação por gotejamento, ficou dividida em 10 setores, cada um com 5000 m², a linha principal tem 160 metros de comprimento, as 10 linhas de derivação possuem 125metros cada, as 310 linhas laterais possuem 40 metros de comprimento e cada uma conta com 40 gotejadores, totalizando 12400 gotejadores;

B) Maça com espaçamento em metros de 4x2 em sistema de irrigação por microaspersão, ficou dividida em 10 setores, cada um com 5000 m², a linha principal

tem 160 metros de comprimento, as 10 linhas de derivação possuem 125 metros cada, as 310 linhas laterais possuem 40 metros de comprimento e cada uma conta com 20 microaspersores, totalizando 6200 microaspersores;

Figura 6.1 Figura representativa sistema de irrigação por gotejamento e microaspersão em culturas de espaçamento 4x2.

C) Ameixa, atemóia, caqui, goiaba e pêssgo com espaçamento em metros de 6x4 em sistema de irrigação por gotejamento, ficou dividida em 8 setores, cada um com 6250 m², a linha principal tem 150 metros de comprimento, as 8 linhas de derivação possuem 125 metros cada, as 168 linhas laterais possuem 50 metros de comprimento e cada uma conta com 25 gotejadores, totalizando 4200 gotejadores;

D) Ameixa, atemóia, caqui, goiaba e pêssgo com espaçamento em metros de 6x4 em sistema de irrigação por microaspersão, ficou dividida em 10 setores, cada um com 5000 m², a linha principal tem 160 metros de comprimento, as 10 linhas de

derivação possuem 125metros cada, as 168 linhas laterais possuem 40 metros de comprimento e cada uma conta com 25 microaspersores, totalizando 4200 microaspersores;

Figura 6.2 Figura representativa sistema de irrigação por gotejamento em culturas de 6x4.

6.3.2 Dimensionamento do Sistema de Irrigação por aspersão.

Embora a irrigação por aspersão tenha a mesma finalidade, ou seja, a reposição de água no solo, este sistema tem peculiaridades que impõem cálculos diferentes dos sistemas de irrigação localizada ao dimensionamento.

Para o cálculo da quantidade de água requerida para o sistema de irrigação por aspersão, inicialmente calculamos a Disponibilidade Total de Água no Solo (**DTA**), através da seguinte equação:

$$DTA = \frac{(Cc - Pm).Da}{10} \quad (16)$$

Onde:

DTA = disponibilidade total de água no solo, em mm/cm de solo;

Cc = capacidade de campo, % em peso;

Pm = ponto de murchamento, % em peso;

Da = densidade aparente do solo, em g/cm³.

O termo capacidade de campo (**Cc**) corresponde à quantidade máxima de água que um solo pode reter em condições normais, ou seja, corresponde à quantidade de água submetida a tensões as quais tornam o movimento descendente, por drenagem natural, suficientemente pequeno em relação ao volume de água retido pelo solo. Para este estudo utilizou-se a **Cc** média com o valor de 32%, porém para fins de dimensionamento recomenda-se a utilização de 80% do valor em questão, pois evita assim os riscos de erosão associada a intensidade de precipitação do aspersor, Bernardo, 1995.

Ponto de murchamento (**Pm**) é usado para representar o teor de umidade no solo, em que abaixo dele a planta não conseguirá retirar a água do solo, na mesma intensidade em que ela transpira, aumentando a cada instante a deficiência d'água na planta. Para este estudo utilizou-se um valor médio para solos com a característica da região com o valor de 17%.

Define-se densidade do solo (**Da**) como a razão entre a massa seca do solo em um volume conhecido de solo (volume ocupado pelas partículas + volume ocupado pelos poros). Portanto, a densidade aparente depende da porosidade, e pode também variar com a textura e o teor de matéria orgânica do solo. A porosidade é a razão entre o volume ocupado pelos poros e o volume aparente do solo. Levando-se em conta o solo da área referência para este estudo, utilizou-se o valor de 1,2 g/cm³ para a densidade do solo.

Encontrado o valor da disponibilidade total de água no solo (**DTA**), deve-se calcular a capacidade total de água no solo (**CTA**), que é um ajuste ao **DTA** quanto à cultura, levando em conta a profundidade das raízes:

$$CTA = DTA.Z \quad (17)$$

Onde:

CTA = capacidade total de água no solo, em mm;

DTA = disponibilidade total de água no solo, em mm/cm de solo;

Z = profundidade efetiva do sistema radicular, em cm.

Para este estudo utilizou-se o valor de 60 centímetros para **Z**, conforme Bernardo(1995), para cultura de frutíferas.

Feito o ajuste quanto a profundidade da raiz, faz-se necessário o cálculo da capacidade real de água no solo(**CRA**), que tem por objetivo evitar que os níveis de água no solo se aproxime do ponto de murchamento:

$$CRA = CTA.f \quad (18)$$

Onde:

CRA = capacidade real de água no solo, em mm;

CTA = capacidade total de água no solo, em mm;

f = fator de disponibilidade.

O fator de disponibilidade(**f**) é função da cultura desenvolvida e varia entre 0,2 e 0,8. Os valores menores são usados para culturas mais sensíveis ao déficit hídrico e os maiores para as culturas mais resistentes. O valor usado para este estudo foi de 0,5 conforme a recomendação de Bernardo (1995).

O próximo passo é a determinação da irrigação real necessária (**IRN**), ou seja, a quantidade real de água a ser aplicada pela irrigação:

$$IRN = ETpc.TR \quad (19)$$

Onde:

IRN = irrigação real necessária, em mm/rega;

ET_{pc} = evapotranspiração potencial da cultura, em mm/dia, calculada através da equação (2);

TR = turno de rega ou intervalo entre as irrigações no mesmo local, em dias.

Para este cálculo foi utilizado um turno de rega (***TR***) de 7 dias.

Concluído o cálculo da ***IRN***, avalia-se a seguir a Irrigação total necessária (***ITN***), o qual ajusta a quantidade de água a ser irrigada em função da eficiência do sistema de irrigação:

$$ITN = \frac{IRN}{Ea} \quad (20)$$

Onde:

ITN = irrigação total necessária, em mm/regagem;

IRN = irrigação real necessária, em mm/regagem;

Ea = eficiência do sistema de irrigação, que varia conforme o sistema utilizado, 95% para gotejamento, 90% para microaspersão e 80% para aspersão convencional.

De posse da irrigação total necessária (***ITN***), é possível calcular o tempo de irrigação por posição (***Ti***), através da equação:

$$Ti = \frac{ITN}{Qa} \quad (21)$$

Onde:

Ti = tempo de irrigação por posição, em horas;

ITN = irrigação total necessária, em mm/regagem;

Qa = Quantidade de água aplicada pelo aspersor, em mm/h, em função da vazão e pressão, tabela 6.3.

Neste estudo utilizou-se o aspersor de 4,5 x 4,8 milímetros de bocal, na pressão de 2,5 Pa, fornecendo uma ***Qa*** de 7,9mm/h. O aspersor escolhido é um dos modelos mais utilizados pelos agricultores. Visando o ajuste real do tempo, uma vez que existe um intervalo para desmontagem do equipamento na área já irrigada e também para a montagem na área a ser irrigada, foi acrescido 0,4 hora a ***Ti***, tempo suficiente para a troca de posições.

Prosseguindo o dimensionamento, faz-se o cálculo do número de posições irrigadas por lateral dia (***n***), que se obtêm através da seguinte equação:

$$n = \frac{nhd}{Ti} \quad (22)$$

Onde:

n = número de posições irrigadas por lateral dia;

nhd = número de horas trabalhadas por dia, neste estudo foi adotado 12 horas por dia;

Ti = tempo de irrigação por posição, em horas;

Calculado o número de posições irrigadas por dia(n), agora se calcula o número total de posições (emissores) por lateral(N):

$$N = \frac{2.Lárea}{E espaçamento Aspensor} \quad (23)$$

Onde:

N = número total de posições (emissores) por lateral;

$Lárea$ = comprimento total da área a ser irrigada, neste estudo, igual 250metros;

$E espaçamento Aspensor$ = espaçamento recomendado pelo fabricante do emissor, conforme a Tabela 6.3.

Tabela 6.3 Características do aspensor em função da pressão de serviço.

CARACTERÍSTICAS DO ASPENSOR							
Dimensão dos bocais	Pressão de serviço	Raio	Vazão	Espaço/o	Área util	Irrigação	Vazão
	(atm)	(m)	m³/h	(m)	m²	mm/h	L/s
4,5mm x 4,8 mm	2,0	14,0	2,29	18	216	10,6	0,64
	2,5	14,7	2,56	18	324	7,9	0,71
	3,0	15,6	2,8	18	324	8,64	0,78

Fonte: Bernardo,(1995)

Prossegue o cálculo, agora visando encontrar o número de posições a serem irrigadas por dia (Nd), pela equação:

$$Nd = \frac{N}{Pi} \quad (24)$$

Onde:

Nd = número de posições (laterais) a serem irrigadas por dia;

N = número total de posições (emissores) por lateral;

Pi = período de irrigação, neste caso adotado $Pi = TR$ (de rega ou intervalo entre as irrigações no mesmo local) com valor igual a 7 dias.

Nesta etapa do projeto de dimensionamento o executor tem subsídios para determinar com quantas linhas laterais irá trabalhar. Neste estudo foi escolhido trabalhar com 2 linhas laterais, portanto NL (número de linhas aproximado) = 2 linhas, pois este dado será utilizado em equações a seguir.

O próximo passo é determinar a intensidade de aplicação de água (IA), através da seguinte equação:

$$IA = \frac{q.360}{S^1.S^2} \quad (25)$$

Onde:

IA = intensidade de aplicação de água, em mm/h;

q = vazão do aspersor, litros por segundo;

S^1 = espaçamento entre aspersores, em metros;

S^2 = espaçamento entre linhas laterais, em metros.

De posse do valor de IA calcula-se a vazão requerida pelo sistema, também chamada de capacidade requerida para o sistema(Q):

$$Q = 2,78. \frac{A.IRN}{Ec.Ea.nhd.Pi} \quad (26)$$

Onde:

Q = capacidade requerida para o sistema, em litros por segundo;

A = área do projeto, em hectares;

IRN = irrigação real necessária, em mm/regas;

Ec = eficiência da condução da água, neste estudo adotado o valor 1;

Ea = eficiência do sistema de irrigação, que varia conforme o sistema utilizado, 95% para gotejamento, 90% para microaspersão e 80% para aspersão convencional.

nhd = número de horas trabalhadas por dia, neste estudo foi adotado 12 horas por dia;
Pi = período de irrigação, neste caso adotado ***Pi*** = ***TR*** (de rega ou intervalo entre as irrigações no mesmo local) com valor igual a 7 dias.

Terminado o cálculo da capacidade requerida para o sistema, da-se prosseguimento ao dimensionamento hidráulico da linha lateral. Para tal, deve-se contabilizar as informações já obtidas, o comprimento da linha lateral é de 100 metros, valor referente à metade da largura do terreno. O número de aspersores por lateral é determinado levando-se em conta o espaçamento entre eles, no caso, 6 aspersores e a vazão requerida por esta linha(***Ql***), que é simples multiplicação da vazão de cada aspersor (Tabela nº 6.3) pelo número deles, em m³/s.

Prossegue-se calculando a perda de carga permitida (***hf***), que será no máximo 20% da pressão de serviço. Como a pressão de serviço é igual a 25 atm, então a perda de carga máxima admissível na linha lateral (***hf***) é igual a 0,5 atm ou 5 m.c.a. (usar mH₂O).

Calcula-se então a perda de carga na tubulação da linha lateral (***hf'***), uma vez que já se sabe o limite de perda de carga:

$$hf^1 = \frac{hf}{F} \quad (27)$$

Onde:

hf' = perda de carga na tubulação da linha lateral;

hf = perda de carga máxima admissível na linha lateral;

F = fator de correção, em função do número de saídas, tabelado ,(Bernardo,1995), para 6 saídas(emissores) e pela equação de Hazen-Williams com valor para m=185, para este estudo ***F*** é igual a 0,435.

De posse da perda de carga na tubulação da linha lateral (***hf'***), calcula-se a perda de carga unitária(***J***), dividindo-se ***hf'*** pelo comprimento da linha lateral.

Calcula-se então o diâmetro da tubulação:

$$D = \left(\frac{Ql}{0,2788 \cdot c \cdot J^{0,54}} \right)^{\frac{1}{2,63}} \quad (28)$$

Onde:

D = diâmetro econômico da tubulação da linha lateral calculado através da equação de Hazen-Williams, em metros;

Ql = vazão requerida na linha lateral, em m³/s;

c = coeficiente de Hazen-Williams para tubos de PVC,(Bernardo,1995);

J = perda de carga unitária, em m/m.

O cálculo do diâmetro foi feito de forma econômica, portanto deve ser ajustado à um diâmetro comercial. Neste estudo para ambos espaçamentos de cultura (6x4 e 4x2) o diâmetro mais próximo para linha lateral foi o de 2 polegadas ou seja 0,05m. De posse do diâmetro comercial da tubulação calcula-se novamente a perda de carga unitária(J) através da equação (28). Avalia-se, então, a perda de carga na tubulação hf^s , multiplicando-se a perda de carga unitária pelo comprimento da tubulação.

Em seguida repete-se o procedimento para a correção do hf^s multiplicando-o pelo fator F novamente, encontrando hf^o . O hf^o é comparado a perda de carga máxima admissível, se hf^o for igual ou inferior a hf o diâmetro esta aprovado e prossegue-se o cálculo, caso contrario ajustes no diâmetro da tubulação serão necessários.

Cálculo da pressão necessária na linha lateral(Pn);

$$Pn = \frac{3}{4}hf^o + Ps + Aa \quad (29)$$

Onde:

Pn = diâmetro pressão necessária na linha lateral, em m.c.a.;

hf^o = perda de carga ajustada para a linha lateral, em m.c.a.;

Ps = pressão de serviço do emissor, neste estudo utilizado o valor 25 m.c.a.;

Aa = altura do aspersor, em metros, neste caso adotado 1,5metros.

Parte-se agora para o dimensionamento da linha principal, inicialmente através da perda de carga admissível na linha principal, que é obtida através da equação:

$$hfp = 0,20.Ps \quad (30)$$

Onde:

hfp = perda de carga admissível na linha principal, em m.c.a.;

Ps = pressão de serviço do emissor, neste estudo utilizado o valor 25 m.c.a..

O próximo passo é encontrar a perda de carga unitária para a linha principal, neste caso, dividindo-se hfp pelo comprimento da linha principal, ou seja, por 250 metros. Na sequência, calcula-se a vazão necessária na linha principal. Vale lembrar que as 2 linhas laterais funcionam simultaneamente, portanto a vazão requerida é a multiplicação da vazão individual de cada aspersor pelo número de aspersores nas duas

linhas. Feito isso estima-se o diâmetro comercial menor possível que seja capaz de suprir as duas linhas laterais.

6.3.2.1 Layouts de apoio à avaliação dos custos resultantes para sistema de irrigação por aspersão.

A) Ameixa, atemóia, caqui, goiaba e pêssago com espaçamento em metros de 6x4 em sistema de irrigação por aspersão, ficou dividida em 2 setores, cada um com 25000 m², a linha principal tem 250 metros de comprimento, com 28 saídas, sendo 14 para cada lado, nestas saídas serão acopladas as linhas laterais com o comprimento de 100 cada, o projeto prevê o funcionamento de 2 linhas laterais simultaneamente, e o número de aspersores em cada linha lateral será de 6 aspersores.

B) Maçã com espaçamento em metros de 4x2 em sistema de irrigação por aspersão, ficou dividida em 2 setores, cada um com 25000 m², a linha principal tem 250 metros de comprimento, com 28 saídas, sendo 14 para cada lado, nestas saídas serão acopladas as linhas laterais com o comprimento de 100 cada, o projeto prevê o funcionamento de 2 linhas laterais simultaneamente, e o número de aspersores em cada linha lateral será de 6 aspersores.

A Figura 6.3 representa o sistema da irrigação por aspersão para ambos os espaçamentos. Maiores detalhes de materiais e diâmetros de tubulação utilizados nos diferentes sistemas estão presentes no Anexo A deste documento.

Figura 6.3 Esquema representativo do sistema de irrigação de aspersão nos 5 hectares, para todas as culturas e espaçamentos

6.4. Determinação da demanda hídrica da região

A determinação da demanda hídrica da região foi feita através do Balanço Hídrico Climatológico Thornthwaite & Mather – 1955, com auxílio da planilha desenvolvida na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", no departamento de Física e Meteorologia, de autoria de Glauco de Souza Rolim e Paulo César Sentelhas, a partir de dados normais de temperatura média do ar atmosférico e precipitação pluvial total mensal entre os anos 1999 e 2003, tabela 6.4, fornecidos pela Faculdade de Ciências Agronômicas.

Tabela 6.4 Dados Normais de Temperatura Média do ar atmosférico e Precipitação Pluvial Total Mensal 1999-2003

Mês	(mm)	(°C)
Janeiro	325.26	22.45
Fevereiro	209.34	22.96
Março	151.96	22.68
Abril	40.22	21.41
Maio	59.84	17.48
Junho	38.18	17.56
Julho	34.78	16.59
Agosto	47.56	18.09
Setembro	75.96	19.07
Outubro	80.2	21.93
Novembro	133	21.62
Dezembro	189	22.33

Fonte: FCA-UNESP

O balanço hídrico climatológico, descrito por Thornthwaite e Mather (1955) monitora o armazenamento de água no solo, levando em conta o suprimento natural de água para o solo e demanda atmosférica. O balanço hídrico fornece estimativas do armazenamento de água no solo, evapotranspiração real, da deficiência hídrica e do excedente hídrico em diversas escalas de tempo.

Em função da tomada de decisão, o balanço hídrico pode ser classificado como o balanço hídrico climatológico e o balanço hídrico seqüencial. Neste estudo, utilizamos o balanço hídrico normal ou climatológico, apresentado na escala mensal. O balanço hídrico normal é importante ferramenta para o planejamento agrícola, caracterização climática de uma região, servindo de subsídio para a determinação da melhor época e tipo de manejo da exploração agrícola. O Balanço hídrico seqüencial é o acompanhamento da disponibilidade de água no solo no momento de seu cálculo, ou seja, monitoramento diário, por isso não serve para fins de planejamento um dos objetivos deste estudo.

A visualização gráfica dos resultados facilita sua interpretação, sendo que Camargo & Camargo (1993) sugerem a apresentação seqüencial dos excedentes e das deficiências para destacar os períodos de suas ocorrências e suas intensidades.

Abaixo exemplo de representação gráfica do balanço hídrico na região de Botucatu-

SP, figura 6.4, sendo que o primeiro trata-se de um balanço hídrico normal, calculado em escala mensal, com os referidos déficits e excedentes, dados obtidos no período de 1999-2003.

Figura 6.4. Balanço Hídrico Climatológico Botucatu-SP

Tabela 6.5. Balanço hídrico através do método de Thornthwaite & Mather para Botucatu-SP

BALANÇO HÍDRICO CLIMÁTICO														
Meses	Num	T	P	N	I	a	ETP	P-ETP	NEG-AC	ARM	ALT	ETR	DEF	EXC
	de	°C	mm	horas			Thornthwaite	mm		mm	mm	mm	mm	mm
	dias						1948							
Jan	30	22,5	325,3	13,3	9,7	2,2	104,29	221,0	0,0	125,00	0,00	104,3	0,0	221,0
Fev	28	23,0	209,3	13,0	10,1	2,2	99,85	109,5	0,0	125,00	0,00	99,8	0,0	109,5
Mar	31	22,7	152,0	12,5	9,9	2,2	103,35	48,6	0,0	125,00	0,00	103,4	0,0	48,6
Abr	30	21,4	40,2	11,8	9,0	2,2	83,36	-43,1	-43,1	88,51	-36,49	76,7	6,7	0,0
Mai	31	17,5	59,8	11,2	6,7	2,2	52,11	7,7	-32,7	96,25	7,73	52,1	0,0	0,0
Jun	30	17,6	38,2	10,8	6,7	2,2	48,98	-10,8	-43,5	88,28	-7,97	46,1	2,8	0,0
Jul	31	16,6	34,8	10,7	6,1	2,2	44,29	-9,5	-53,0	81,81	-6,47	41,2	3,0	0,0
Ago	31	18,1	47,6	11,0	7,0	2,2	55,22	-7,7	-60,7	76,94	-4,86	52,4	2,8	0,0
Set	30	19,1	76,0	11,6	7,6	2,2	63,13	12,8	-41,4	89,77	12,83	63,1	0,0	0,0
Out	31	21,9	80,2	12,2	9,4	2,2	93,85	-13,6	-55,0	80,49	-9,29	89,5	4,4	0,0
Nov	30	21,6	133,0	12,8	9,2	2,2	92,47	40,5	-4,0	121,02	40,53	92,5	0,0	0,0
Dez	31	22,3	189,0	13,2	9,6	2,2	105,93	83,1	0,0	125,00	3,98	105,9	0,0	79,1
Total		244,2	1385,3	144,0	101,0	26,6	946,85	438,5		1223	0,00	927,1	19,7	458,2
Média		20,3	115,4	12,0	8,4	2,2	78,90	36,5		101,9		77,3	1,6	38,2

Pode-se observar na tabela 6.5 o balanço hídrico da região alvo deste estudo, as linhas que estão em vermelho acusam os meses de déficit de água.

Os dados climáticos, temperatura e precipitação e ajustes de coordenadas necessários para o cálculo do balanço hídrico através da planilha de cálculo, figura 6.5, em questão foram obtidos através do Professor Dinival Martins do departamento de Ciências Ambientais da Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp de Botucatu. As medições são disponibilizadas aos agricultores da região.

Balanço Hídrico Normal por Thornthwaite & Mather (1955) Glauco de Souza Rolim Paulo Cesar Sentelhas Departamento de Física Meteorologia ESALQ-USP BHnorm V5.0 1999									
CIDADE	⇒	Botucatu	LATITUDE	22,57	PERÍODO	1999-2003			
ESTADO	⇒	SP	LONGITUDE	48,27	FONTE	UNESP			
CAD (mm)	⇒	125	ALTITUDE	825,00					
Comentários : Cálculos OK!									
PLANILHA DE ENTRADA DOS DADOS									
Meses	Num de dias	T °C	P mm	N horas	I	a	ETP Thornthwaite 1948	Cálculos ajuste latitude	
								Latitude = -22,57	
								NDA	δ
								hn	N
Jan	30	22,45	325,26	13,30	9,72	2,22	104,29	1	-23,011637
Fev	28	23,0	209,34	12,98	10,05	2,22	99,85	31	-17,782271
Mar	31	22,68	152,0	12,47	9,87	2,22	103,35	59	-8,6700405
Abr	30	21,41	40,22	11,81	9,04	2,22	83,36	90	3,61854184
Mai	31	17,48	59,84	11,20	6,65	2,22	52,11	120	14,5869963
Jun	30	17,56	38,18	10,77	6,70	2,22	48,98	151	21,898483
Jul	31	16,59	34,78	10,69	6,15	2,22	44,29	181	23,1844895
Ago	31	18,09	47,6	11,00	7,01	2,22	55,22	212	18,1710308
Set	30	19,07	76,0	11,56	7,59	2,22	63,13	243	8,10460873
Out	31	21,93	80,2	12,20	9,38	2,22	93,85	273	-3,8178245
Nov	30	21,62	133,0	12,82	9,18	2,22	92,47	304	-15,056183
Dez	31	22,33	189,0	13,23	9,64	2,22	105,93	334	-21,969868

Figura 6.5. Máscara da planilha de cálculo Balanço Hídrico Climatológico do Departamento de Física e Meteorologia da Esalq-USP

6.5. Determinação da demanda hídrica da cultura

A determinação da demanda hídrica para as culturas pode ser realizada pelo coeficiente de cultura (*kc*). Este coeficiente representa a integração dos efeitos de três características que distinguem a evapotranspiração da cultura (*Etc*) da evapotranspiração

de referência(**Eto**) ou seja, ajusta o valor da evapotranspiração levando em conta o estágio de desenvolvimento da cultura.

$$Kc = \frac{Etc}{Eto} \quad (3)$$

Onde:

Kc = coeficiente de cultura;

Etc = evapotranspiração da cultura, em mm/dia;

Eto = evapotranspiração potencial de referência, em mm/dia, que neste estudo se refere a evapotranspiração(**ETP**) somatória da região em mês de déficit hídrico dividido por 30, para obter o resultado em mm/dia.

Portanto, **kc** é um indicador de grande significado físico e biológico, uma vez que depende da arquitetura e da transpiração da planta (JENSEN 1969, ALLEN 1998).

Na maioria das culturas anuais, o valor de **kc** aumenta a partir da emergência até um valor máximo no período em que é alcançado seu pleno desenvolvimento, diminuindo a partir daí até a maturação (DOORENBOS & KASSAN 1979). Nas culturas perenes, a curva de **kc** apresenta valores baixos nos períodos de formação e estabelecimento da cultura no campo e, quando esta atinge dossel máximo, a curva de **kc** tende a se estabilizar com valores próximos à unidade, ocorrendo oscilações temporais decorrentes de processos fisiológicos e do manejo da cultura, e da disponibilidade hídrica.

Neste estudo foram utilizados os coeficientes indicados pela FAO para as culturas em questão, pois a literatura é escassa sobre coeficiente de culturas perenes em condições de solos brasileiros, porém os valores utilizados dão uma margem segura para o planejamento e o estudo desenvolvido. A tabela de **kc** indicada pela FAO esta disponível no Anexo B deste documento.

Assim a demanda hídrica para fim de irrigação foi obtida através da evapotranspiração potencial de referência (**Eto**) calculada mês a mês pela planilha de cálculo de balanço hídrico climatológico, levando em conta o **kc** da cultura para o determinado período.

Exemplo prático de demanda hídrica da cultura de ameixa no mês de junho para o segundo ano de cultivo. De posse dos dados trabalhados na planilha de cálculo de balanço hídrico climatológico nota-se que os meses de déficit hídrico histórico são abril, junho, julho agosto e outubro, portanto será necessária a irrigação nesses meses. A

planilha (Tabela n 6.5) além de fornecer os meses também fornece a quantidade de água evapotranspirada expressa em milímetros para cada mês, a partir deste dado e utilizando a equação (2) encontra-se a ***Etpc***, feito isso se prossegue os cálculos feitos no dimensionamento dos sistemas de irrigação porém substituindo o valor(0,9 utilizado no dimensionamento) do ***kc*** pelo da cultura em seu estadio de desenvolvimento, portanto:

$$ETpc = Kc.Eto$$

Onde:

Kc = coeficiente de cultura ameixa 2ºano, valor recomendado 0,45;

Eto = evapotranspiração potencial de referência do mês de junho, 48,98mm por mês que equivale a 1,63 mm/dia;

Portanto, ***Etpc*** = 0,734 mm/dia

$$Etg = ETpc. \frac{P}{100}$$

Etg = evapotranspiração média, na área irrigada por emissor, em mm/dia;

ETpc = 0,734 mm/dia;

P = percentagem da área molhada, para gotejamento 25%.

Portanto, ***Etg*** = 0,18 mm/dia

$$IRN = ETg.TR$$

IRN = irrigação real necessária, em mm/rega;

Etg = 0,18 mm/dia;

TR = turno de rega 4dias, conforme o dimensionamento feito.

Portanto, ***IRN*** = 0,73 mm/rega.

$$ITN = \frac{IRN}{Ea}$$

Onde:

ITN = irrigação total necessária, em mm/rega;

IRN = 0,73 mm/rega;

Ea = eficiência do sistema de irrigação 95%.

Portanto, $ITN = 0,77$ mm/rega.

$$T = ITN \cdot \frac{AI}{n \cdot q}$$

Onde:

T = tempo de funcionamento no local, em horas;

$ITN = 0,77$ mm/rega;

AI = área representada por cova, em função do espaçamento entre plantas, ameixa espaçamento 6m x 4m, portanto $AI = 24$ m².

n = número de emissores por árvores, 2 emissores;

q = vazão do emissor, em litro/hora, 8 litros por hora.

Portanto, $T = 1,16$ horas.

Conclui-se que o sistema de irrigação por gotejamento no mês de junho, na cultura de ameixa, no segundo ano de cultivo, terá que funcionar 1,16 horas a cada 4 dias e fornecer uma lâmina de 0,77mm a cada 4 dias, totalizando uma demanda hídrica de 48,98mm e uma irrigação de 51,56mm para o mês de junho, de posse destes dados estima-se o consumo de energia elétrica do sistema de irrigação. Neste trabalho este procedimento foi repetido cada ocasião, somente assim foi possível conhecer o consumo médio de água e conseqüente consumo de energia elétrica do sistema de irrigação para cada cultura em certo estadio de desenvolvimento em cada mês de déficit hídrico histórico.

6.6. Custos de insumos e tratos culturais nas culturas de frutíferas

Os custos de implantação das frutíferas e manutenção, e também os dados produtivos foram baseados em manuais técnicos de culturas, da Secretaria da Agricultura e Abastecimento, e levantamentos do Instituto de Economia Agrícola, ambos do governo do Estado de São Paulo, descritos anualmente, conforme podemos observar Tabela 6.6.

Os custos e receitas de implantação e cultivo levam em conta desde o preparo da terra até a reposição de mudas falhas no final do primeiro ano. Portanto os custos do primeiro ano de cultivo são considerados como custos de implantação do pomar. Os

custos de implantação e manutenção foram calculados e detalhados em planilhas. Sendo necessária uma planilha para cada cultivo. Os procedimentos para cada cultura foram os seguintes:

1) Coleta de dados da cultura

- ✓ Cultura a ser desenvolvida;
- ✓ Espaçamento (pés/ha);
- ✓ Produtividade média (kg/ha)

2) Levantamento de procedimentos e operações necessárias para a implantação da cultura e manutenção, divididos em:

- ✓ Operações mecânicas, onde foram apontadas todas as atividades em que se faz necessário o uso de implementos agrícolas, estimando a atividade e o recurso necessário para execução da mesma.
- ✓ Operações manuais, onde foram apontadas as atividades em que se faz necessária a utilização de mão de obra, estimando a atividade e o tempo gasto em homens-dia para execução da mesma.
- ✓ Insumos, onde foram apontados os insumos (adubos, corretivos e defensivos) estimados para uma produção em um terreno de condições médias de fertilidade e sanidade.
- ✓ Administração, onde foram estimados os custos com contador, depreciação administrativa e impostos.
- ✓ O custo de depreciação do pomar foi estabelecido dividindo-se o custo total da implantação do mesmo pelo número de anos de sua vida útil, nos fornecendo um valor por ano que foi agregado aos custos operacionais.

De posse de todos os dados apontados foi possível a estimativa do custo de implantação e manutenção, e também a pretendida receita, ou seja, a remuneração do produtor pela a atividade. Levando em conta a diferença da vida útil dos pomares das diferentes culturas estabeleceu-se um método para adequar a depreciação dos mesmos, para isso foi necessário dividir o custo inicial de implantação do pomar por sua vida útil expressa em anos, resultando em um valor anual, valor este que é contabilizado como

prejuízo ano a ano, possibilitando assim uma melhor comparação entre diferentes frutíferas.

Exemplo, a vida útil esperada do pomar de maçã 25 anos, enquanto o pomar de ameixa possui uma vida útil esperada de 15 anos, chama-se vida útil esperada pois espera-se que o pomar produza normalmente durante este período, porém esta vida útil depende de muitos fatores, e alguns deles independem do manejo, uma geada por exemplo pode estressar as plantas e consequentemente reduzir sua vida útil.

Então para ajustar essa diferença entre as culturas fez-se o procedimento acima descrito, o pomar de maçã teve um custo em sua implantação de R\$ 12.472,40, portanto dividi-se este valor por 25 anos e encontra-se o valor a ser contabilizado anualmente que é R\$ 498,89, enquanto a cultura da ameixa apresentou um custo de implantação de R\$ 9.185,15, este valor foi dividido por 15 anos e o resultado foi uma depreciação anual de R\$ 612,34.

A seguir exemplo da planilha utilizada para o levantamento dos custos.

Tabela 6.6. Exemplo planilha base para composição dos custos de implantação e manutenção.

Levantamento de custos de implantação e manutenção de 5 ha Julho/2007									
Ameixa									
Espacamento(m)	6	x	4	Prod.	Ano 3	10000	kg/ha		
Densidade	417	pés/ha		Esperada	Ano 4	16000	kg/ha		
Solo	Latosolo				Ano 5-10	20000	kg/ha		
Preço Médio	R\$ 1,70	por Kg			Ano 10-15	17000	kg/ha		
					Média	16231	kg/ha/ano		
DESCRIÇÃO	ESPECIFICAÇÃO	V.U.	FASE				PRODUÇÃO CRESCENTE		
			IMPRODUTIVA				MANUTENÇÃO		
			ANO 1		ANO 2		ANO 3		ANO 4
			Qtde.	Valor	Qtde.	Valor	Qtde.	Valor	Qtde. Valor
1. OP. MECÂNICAS									
1.1 PREPARO DO SOLO									
Subsolagem	subsolador	55,87	2	111,74		0		0	0
gradagem	grade	34,91	2,5	87,28		0		0	0
Niveladora	niveladora	33,9	1,4	47,46		0		0	0
Calagem	distribuidor	37,28	1,5	55,92		0	1	37,28	0,5 18,64
Curva de nível	terraceador	46,16	0,7	32,31		0		0	0
Carreadores		88,84	0,4	35,54		0		0	0
1.2 IMPLANTAÇÃO									
Sulco	sulcador	29,86	9	268,74		0		0	0
Adubação cova	adubadora	32,95	1	32,95		0		0	0
Plantio	carreta	31,78	1,5	47,67		0		0	0
Replanteio	carreta	31,78	0,3	9,53		0		0	0
1.3 TRATOS CULTURAIS									
Pulverização 1	pulverizador	42,25	3	126,75	8,8	371,8	16	676	0
Pulverização 2	pulverizador	39,22		0		0		0	18 705,96
Rocagem	roçadeira	31,95	3,9	124,61	3,9	124,61	3,9	124,61	4,5 143,78
Herbicida	pulverizador	45,49	2,2	100,08	7,7	350,27	4,4	200,16	3,3 150,12
Adubação química	adubadora	32,95		0	9,9	326,21	4,4	144,98	4,4 144,98
Adubação orgânica	distribuidor	37,28	3	111,84		0		0	0
Menu. Carreador		30,26	0,3	9,08	0,3	9,08	0,3	9,08	0,3 9,08
1.4 IRRIGAÇÃO									
Irrigação	R\$/ha/ano			0		0		0	0
1.5 COLHEITA									
Colheita	carreta	31,78		0		0	4,5	143,01	4,5 143,01
TOTAL PARCIAL em R\$				1201,49		1181,96		1335,11	1315,56

As planilhas de composição de custos e receitas médias estão detalhadas no Anexo C deste documento, o resumo dos custos de podemos observar na tabela 6.7.

Tabela 6.7 Resumo dos custos , implantação e manutenção, das culturas

	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5-10	Ano10-15
AMEIXA	R\$ 9.797,49	R\$ 5.936,33	R\$ 6.656,52	R\$ 6.863,48	R\$ 7.451,38	R\$ 7.289,85
ATEMÓIA	R\$ 9.669,56	R\$ 6.051,40	R\$ 6.771,59	R\$ 6.978,55	R\$ 7.566,44	R\$ 7.404,92
CAQUI	R\$ 9.199,77	R\$ 5.222,85	R\$ 5.886,57	R\$ 5.950,42	R\$ 6.636,54	R\$ 6.524,50
GOIABA	R\$ 9.864,53	R\$ 4.787,59	R\$ 5.655,46	R\$ 5.944,47	R\$ 6.841,39	R\$ 6.883,55
PÊSSEGO	R\$ 10.050,66	R\$ 6.028,43	R\$ 8.115,13	R\$ 7.503,94	R\$ 8.348,33	R\$ 8.482,37
MAÇÃ	R\$ 12.971,30	R\$ 6.465,09	R\$ 6.896,96	R\$ 8.108,20	R\$ 8.680,20	R\$ 8.518,67

6.7. Estimativa de produção e renda das frutíferas

A produção estimada para as frutíferas em questão foi baseada na produtividade média dos pomares segundo o manual técnico de culturas da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo, assim também foi estimada a vida útil dos pomares para este trabalho, a qual foi estabelecida em 15 anos.

O levantamento do preço pago ao produtor teve como base de dados as cotações diárias feitas pelo CEAGESP(Central de Armazéns Gerais do Estado de São Paulo) realizadas no CEASA(Central de Abastecimento de Alimentos) São Paulo, e foi admitido um preço resultante das médias históricas dos preços praticados nos anos de 2004, 2005 e 2006, os preços médios foram estabelecidos através da relação preço x quantidade de produto, tabelas 6.9, 6.10 e 6.11, comercializado:

Tabela 6.8 Exemplo planilha base para composição de preços médios e mínimos.

Ameixa Rubi				
		Preço R\$	Quantidade comercializada	Total arrecadado por mês
2004	Janeiro	R\$ 1,60	215.350	R\$ 344.560,00
2004	Fevereiro	R\$ 2,19	61.634	R\$ 134.978,46
2004	Novembro	R\$ 2,60	175.374	R\$ 455.972,40
2004	Dezembro	R\$ 1,96	514.637	R\$ 1.008.688,52
2005	Janeiro	R\$ 1,67	173.980	R\$ 290.546,60
2005	Fevereiro	R\$ 1,52	51.996	R\$ 79.033,92
2005	Outubro	R\$ 2,51	19.319	R\$ 48.490,69
2005	Novembro	R\$ 3,72	77.816	R\$ 289.475,52
2005	Dezembro	R\$ 2,82	363.612	R\$ 1.025.385,84
2006	Janeiro	R\$ 2,28	184.515	R\$ 420.694,20
2006	Fevereiro	R\$ 2,53	50.832	R\$ 128.604,96
2006	Março	R\$ 2,57	12.105	R\$ 31.109,85
2006	Novembro	R\$ 2,78	155.886	R\$ 433.363,08
2006	Dezembro	R\$ 2,20	393.395	R\$ 865.469,00
No preço pago ao produtor, se desconta uma taxa de 16 % de comercialização. O preço mínimo adotado é o menor preço pago pelo produto em todos os períodos			Total Comercializado	Total geral arrecadado
			2450451	R\$ 5.556.373,04
			Preço médio	Preço mínimo
			R\$ 2,27	R\$ 1,52
			Preço médio pago	Preço mínimo pago
			R\$ 1,90	R\$ 1,28

Já os preços mínimos foram determinados pelo menor valor pago pelo produto nos últimos 3 anos, como pode-se ver na tabela 6.8.

O registro diário dos preços pagos ao produtor, das frutas abordadas neste estudo, começaram a serem feitos a partir de 2004, até então o CEAGESP só registrava valores pagos a culturas de grãos, hortaliças e frutas de maior importância econômica.

Tabela 6.9 Exemplo planilha base para composição das receitas das culturas, preços médios.

Receita		ANO 2		ANO 3		ANO 4	
	Preço médio	Prod. *	Receita	Prod.	Receita	Prod.	Receita
Ameixa	R\$ 1,90	0	R\$ 0,00	10000	R\$ 19.000,00	16000	R\$ 30.400,00
Atemóia	R\$ 3,01	0	R\$ 0,00	13000	R\$ 39.130,00	20000	R\$ 60.200,00
Caqui	R\$ 1,74	0	R\$ 0,00	15000	R\$ 26.100,00	20000	R\$ 34.800,00
Goiaba	R\$ 1,00	4000	R\$ 4.000,00	14000	R\$ 14.000,00	25000	R\$ 25.000,00
Pêssego	R\$ 2,38	0	R\$ 0,00	15000	R\$ 35.700,00	20000	R\$ 47.600,00
Maçã	R\$ 1,88	0	R\$ 0,00	8000	R\$ 15.040,00	35000	R\$ 65.800,00

* Produção esperada expressa em Kg.

A análise de sensibilidade quanto a receita foi estabelecida através da adoção de preços médios e mínimos de cada cultura em série histórica (2004, 2005 e 2006), possibilitando assim maior segurança ao produtor quanto ao planejamento agrícola.

Tabela nº 6.10 Resumo das receitas das culturas, preços mínimos.

	Preço kg	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5-10	Ano 10-15
Ameixa	R\$ 1,28	R\$ 0,00	R\$ 12.800,00	R\$ 20.480,00	R\$ 25.600,00	R\$ 21.760,00
Atemóia	R\$ 2,51	R\$ 0,00	R\$ 32.630,00	R\$ 50.200,00	R\$ 65.260,00	R\$ 65.260,00
Caqui	R\$ 1,34	R\$ 0,00	R\$ 20.100,00	R\$ 26.800,00	R\$ 40.200,00	R\$ 40.200,00
Goiaba	R\$ 0,60	R\$ 2.400,00	R\$ 8.400,00	R\$ 15.000,00	R\$ 22.500,00	R\$ 30.600,00
Pêssego	R\$ 1,78	R\$ 0,00	R\$ 26.700,00	R\$ 35.600,00	R\$ 44.500,00	R\$ 37.380,00
Maçã	R\$ 1,60	R\$ 0,00	R\$ 12.800,00	R\$ 20.800,00	R\$ 28.800,00	R\$ 32.000,00

Tabela nº 6.11 Resumo das receitas das culturas, preços médios.

	Preço kg	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5-10	Ano 10-15
Ameixa	R\$ 1,90	R\$ 0,00	R\$ 19.000,00	R\$ 30.400,00	R\$ 38.000,00	R\$ 32.300,00
Atemóia	R\$ 3,01	R\$ 0,00	R\$ 39.130,00	R\$ 60.200,00	R\$ 78.260,00	R\$ 78.260,00
Caqui	R\$ 1,74	R\$ 0,00	R\$ 26.100,00	R\$ 34.800,00	R\$ 52.200,00	R\$ 52.200,00
Goiaba	R\$ 1,00	R\$ 4.000,00	R\$ 14.000,00	R\$ 25.000,00	R\$ 37.500,00	R\$ 51.000,00
Pêssego	R\$ 2,38	R\$ 0,00	R\$ 35.700,00	R\$ 47.600,00	R\$ 59.500,00	R\$ 49.980,00
Maçã	R\$ 1,88	R\$ 0,00	R\$ 15.040,00	R\$ 65.800,00	R\$ 75.200,00	R\$ 84.600,00

6.8 Custos de implantação Sistemas de Irrigação

As técnicas de irrigação de maneira geral exigem um bom investimento, são técnicas de custos consideráveis na sua implantação para a simulação proposta por esse estudo foi realizada uma simulação dos custos de implantação de uma área hipotética de 5 ha, sendo 200m de largura com 250m de comprimento, com solo "latossolo vermelho amarelo", de declividade entre 0 a 5%, características padrões para a região das propriedades agrícolas aqui referenciadas. O levantamento dos custos, tabela 6.12, foi feito através de uma empresa do ramo de irrigação agrícola. O dimensionamento foi feito a partir do cabeçal de controle, englobando toda a unidade de irrigação. (detalhes descritivos no Anexo A)

Tabela 6.12 Estimativa do custo de materiais dos sistemas de irrigação por Aspersão em modulo de 5ha.

RELAÇÃO DE MATERIAIS			
I- BOMBEAMENTO			
Qtde.	Descrição	Preço	
1	Motobomba para 30m³/h e 40 mca	R\$ 1.420,00	R\$ 1.420,00
1	Chave partida Direta 6 cv, 220 V, trifásica	R\$ 1.050,00	R\$ 1.050,00
1	Conjunto de cabos para ligação da chave	R\$ 150,00	R\$ 150,00
1	Tubulação de saída da bomba completa	R\$ 248,00	R\$ 248,00
II - CABEÇAL DE FILTRAGEM			
1	Filtro Plástico 3" Discos 120 mesh 50m³/h	R\$ 75,00	R\$ 75,00
1	Conjuntos conexões + acessórios	R\$ 48,00	R\$ 48,00
2	Reduções 4"/3"	R\$ 45,00	R\$ 90,00
1	Registro 5"	R\$ 200,00	R\$ 200,00
III - ADUÇÃO DISTRIBUIÇÃO EMISSORES			
34	Tubos PVC 2"	R\$ 25,00	R\$ 850,00
29	Tubos PVC 3"	R\$ 42,00	R\$ 1.218,00
13	Tubos PVC 4"	R\$ 80,00	R\$ 1.040,00
14	Cruzetas	R\$ 49,00	R\$ 686,00
8	Redução 4"solda/2" engate rápido	R\$ 35,00	R\$ 280,00
20	Redução 3"solda/2" engate rápido	R\$ 25,00	R\$ 500,00
11	Aspersores ZE30D	R\$ 12,00	R\$ 132,00
11	Saída para aspersores 3"/1	R\$ 29,00	R\$ 319,00
11	Tubos PVC Branco 1,5mts 1"	R\$ 4,50	R\$ 49,50
28	Caps macho 3"	R\$ 15,00	R\$ 420,00
1	Redução 4"/3"	R\$ 45,00	R\$ 45,00
IV - VALVULAS			
1	Válvula alivio 3"	R\$ 25,00	R\$ 25,00
1	Registro 4"	R\$ 80,00	R\$ 80,00
4	Registros 3"	R\$ 60,00	R\$ 240,00
		TOTAL	R\$ 9.165,50

6.9 Custos de manutenção de Sistemas de Irrigação

Os custos de consumo de água e energia elétrica foram compostos da seguinte maneira:

A) O demanda de água foi estabelecido através da demanda hídrica da cultura resultante da interação da evapotranspiração obtida através da planilha de cálculo do balanço hídrico e o kc cultural no determinado estágio fisiológico, diferenciado neste caso anualmente. A demanda foi estabelecida em metros cúbicos por mês, e valorada através das alternativas de preços para a cobrança da água (US\$ 5, 10 e 25/1000 m³).

B) O consumo de energia levou em conta a demanda hídrica através do número de horas de irrigação utilizadas em um mês para supri-la. Fornecendo a quantidade em kwh por ano no consumo de energia, este foi multiplicado pelo valor da tarifa praticada a energia elétrica para irrigação pela operadora do local, R\$ 0,22169/kwh, conforme o Anexo D.

O custo de depreciação do sistema de irrigação, tabela 6.13, foi estabelecido dividindo-se o custo total da implantação do sistema pelo número de anos de sua vida útil, nos fornecendo um valor por ano que foi agregado aos custos operacionais.

Tabela 6.13. Depreciação anual dos sistemas de Irrigação.

Depreciação anual irrigação						
	Ameixa	Atemóia	Caqui	Goiaba	Pêssego	Maçã
Gotejamento	R\$ 1.320,53	R\$ 1.320,53	R\$ 1.320,53	R\$ 1.320,53	R\$ 1.320,53	R\$ 2.434,73
Microaspersão	R\$ 2.829,07	R\$ 2.829,07	R\$ 2.829,07	R\$ 2.829,07	R\$ 2.829,07	R\$ 3.689,73
Aspersão	R\$ 611,03	R\$ 611,03	R\$ 611,03	R\$ 611,03	R\$ 611,03	R\$ 611,03

6.10 Valores atribuídos ao uso da água

Os valores aqui empregados são uma coletânea dos valores praticados nas diversas regiões do país onde já ocorre a cobrança pelo uso da água para fins de produção agrícola, como por exemplo:

- ✓ Bacia do rio Curu – Ceará com valor calculado em US\$ 30/1000m³ (Lanna e Ribeiro, 1999).
- ✓ Bacia do rio dos Sinos – Rio Grande do Sul, em estudo realizado para o Conselho de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul (Pereira et al., 1996) com valor calculado para o setor agrícola em US\$ 5/1000 m³
- ✓ Estado de São Paulo estudos para a implantação da cobrança pela utilização dos recursos hídricos foram desenvolvidos pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica-DAEE (órgão responsável pelo gerenciamento dos recursos hídricos no Estado) em parceria com o Consórcio Nacional de Engenheiros e Consultores e com a Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas (FIPE), com valores calculados para o setor agrícola entre US\$ 5 a 25/1000 m³
- ✓ Estado do Ceará, a COGERH (Companhia de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado do Ceará) iniciou, no final de 1996, de forma pioneira no Brasil, a cobrança pela retirada de água. Cobra-se, atualmente, o valor de US\$ 5/1000 m³.

No presente estudo foram simulados valores de US\$5,00, US\$10,00, US\$15,00, US\$20,00 e US\$25,00 por 1000m³ de água consumida

6.11 Metodologia multiobjetivo

Dentre as possibilidades que a biblioteca MOMLIB ++ apresenta em termos dos algoritmos multiobjetivo (SPEA, NSGA e NSGAI), optou-se por utilizar o SPEA que, além de ser elitista, é considerado um dos métodos multiobjetivos mais eficientes. Detalham-se a seguir o algoritmo, bem como a maneira como foi implementado.

6.11.1 SPEA (*Strongh Pareto Evolutionary Algorithm*)

O algoritmo SPEA(*Strongh Pareto Evolutionary Algorithm*), conforme proposto por Zitzler et al(1999), usa uma população interna e uma população externa. Introduz o elitismo através da criação de uma população externa que armazena um número fixo de soluções não-dominadas encontradas ao longo das gerações. O valor de aptidão para as soluções é baseado na dominância Pareto.

A cada geração, novas soluções não-dominadas são comparadas com a população externa existente e as soluções não-dominadas resultantes são armazenadas.

O algoritmo não somente preserva as melhores soluções, mas também utiliza-as para participar das operações genéticas com o objetivo de atingir melhores regiões dentro do espaço de busca.

Os dados de Entrada necessários ao SPEA são:

- ✓ - Dimensão da população: POP
- ✓ - Probabilidade de recombinação: Pr
- ✓ - Probabilidade de mutação: Pm
- ✓ - Dimensão da população externa:POPe
- ✓ - Número máximo de gerações: GER

O funcionamento do SPEA pode assim ser dividido em dez (10) etapas:

Etapas 1 – População inicial

Geração da população inicial aleatória considerando o parâmetro de entrada POP.

Etapas 2 – População externa

Criação da população externa vazia de dimensão POPe (parâmetro de entrada).

Etapas 3 – Avaliação das funções objetivo

Cada vetor solução pertencente à população inicial é avaliado de acordo com as funções objetivo consideradas.

Etapas 4 – Atualização da população externa

Identificação das soluções não-dominadas da população corrente.

Cópia das soluções não dominadas encontradas para a população externa.

Remoção das soluções dominadas da população externa.

Adequação do conjunto externo, conforme dimensão da população externa POP, através do algoritmo de cluster. Esse algoritmo reduz a dimensão da população externa corrente para a dimensão limite (POPe), fornecida nos dados de entrada.

Por exemplo, se o conjunto externo possui 20 soluções, inicialmente para o algoritmo de corte, considera-se a existência de 20 clusters. Assim, as distâncias entre pares de clusters são calculadas. Em geral, a distância (d_{kp}) entre dois clusters (C_k e C_p) é definida como sendo a distância euclidiana de todos pares de soluções (i pertence a C_k ; j pertence a C_p):

$$d_{kp} = \frac{1}{|C_k||C_p|} \sum_{i \in C_k; j \in C_p} d(i, j) \quad (31)$$

sendo que a distância $d(i,j)$ pode ser calculada no espaço de variáveis de decisão ou no espaço de objetivos. No SPEA, os autores preferiram trabalhar no espaço de objetivos. Uma vez que todas as distâncias de clusters são calculadas, os dois clusters com distância mínima são combinados para formarem um cluster maior. Assim, as distâncias de cluster são recalculadas para todos os pares de clusters, para posteriormente dois clusters serem unidos novamente. O processo continua até que o número de clusters na população externa é reduzido. Conseqüentemente, em cada cluster, a solução de distância mínima média das outras soluções no cluster é retida e as outras são excluídas.

Etapas 5 – Convergência

Nessa etapa o algoritmo verificará seu critério de convergência. Em geral, adota-se o número máximo de iterações para essa verificação. Se tal critério for satisfeito o algoritmo chega a seu objetivo e o processo é finalizado, caso contrário, o algoritmo segue para a etapa 6.

Etapas 6 – Avaliação SPEA

O módulo de avaliação atribui valores de aptidão às soluções como forma de prepará-las para o operador seleção.

Esse procedimento é realizado em duas etapas:

Primeiro todos os vetores solução i pertencentes à população externa são classificados e recebem um valor de aptidão S_i (strength). Esse valor de aptidão, para um dado vetor solução i , é proporcional a n_i , o número de soluções dominadas pela solução externa i na população corrente:

$$S_i = \frac{n_i}{n_{população} + 1} \quad (32)$$

1 na equação anterior garante que soluções externas tenham valores de aptidão menores que 1 pois, o valor de aptidão deve ser minimizado, isto é, menores valores de aptidão correspondem a altas probabilidades de cópias (reprodução), na próxima população.

Posteriormente, calculam-se os valores de aptidão (F_j) para toda solução j pertencente à população corrente. Esse valor de aptidão é calculado como sendo a soma

$$F_j = 1 + \sum_{i \in POPE, i \preceq j} S_i \quad (33)$$

de todos os valores de aptidão S_i das soluções externas i que dominam a solução j da população corrente:

Valores de aptidão da população corrente inferiores aos da população externa. Portanto, soluções com valores de aptidão inferiores são melhores.

Etapas 7 – Seleção

A técnica de seleção utilizada no SPEA é a seleção por torneio. Após todas as soluções, pertencentes aos conjuntos externo e corrente, terem recebido seus respectivos valores de aptidão (F), os conjuntos POP e POPE são unidos para ser aplicado o operador de seleção.

A seleção por torneio no SPEA é desenvolvida da seguinte forma: cria-se um conjunto temporário ($tempP$) de dimensão igual à do conjunto unificado; selecionam-se aleatoriamente duas soluções (i e j) pertencentes ao conjunto unificado;

se $F_j > F_i$, i é incluído em $tempP$

caso contrário, j é incluído em $temp\ P$ (note que a melhor solução é a que apresenta menor valor de aptidão F).

Etapa 8 – Recombinação

Nessa etapa o SPEA se assemelham aos AEs simples.

Etapa 9 – Mutação:

em geral, esse operador é aplicado como na estrutura dos AGs convencionais

Etapa 10 – Nova População:

A nova população é resultante da aplicação dos operadores de recombinação e mutação. Assim, é necessário que uma nova avaliação seja realizada para cada vetor solução pertencente a essa nova população. Portanto, volta-se à etapa 3.

6.11.2 Representação das soluções

O Problema multiobjetivo tratado visou identificar as culturas e os sistemas de irrigação a serem empregados em quatro glebas de 5 ha cada, caracterizando uma pequena propriedade rural da região de Botucatu, SP. Foi considerado o horizonte de planejamento de 15 anos, e uma taxa de juros de 4% ao ano para anualização dos benefícios líquidos.

As soluções do problema foram codificadas de maneira a representar as culturas e os sistemas de irrigação para as quatro glebas, de maneira que as primeiras quatro variáveis podem assumir os valores inteiros 0, 1,...ou 6, representativos das culturas de ameixa (0), atemóia (1), caqui (2), goiaba (3), pêssego (4), e maçã (5), e as quatro variáveis seguintes podem assumir os valores inteiros 0, 1 e 2, representativos dos sistemas de irrigação por gotejamento (0), microaspersão (1) e aspersão (2), respectivamente.

Assim, a solução codificada como (**1**, **4**, **3**, **7**, **0**, **2**, **1**, **0**), por exemplo, representa a opção de: cultivo de atemóia usando o sistema de irrigação por gotejamento na gleba 1(em vermelho), cultivo de pêssego usando o sistema de irrigação por aspersão na gleba 2(em azul), cultivo de goiaba usando o sistema de irrigação por microaspersão

na gleba 3(em verde) e cultivo de maca usando o sistema de irrigação por gotejamento na gleba 4(em preto).

6.11.3 O Uso do Algoritmo Genético multiobjetivo SPEA

Definidos o número de variáveis e o número de opções de valores para cada qual, a enumeração completa teria que examinar, $7^4 \times 3^4$ (=194481) possíveis soluções para posterior construção da frente Pareto correspondente. Assim optou-se pelo uso do algoritmo genético multiobjetivo SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm), como ferramenta de identificação das soluções não-dominadas do problema.

O algoritmo SPEA foi implementado com o suporte da biblioteca MOMLIB ++, a partir do código construído por Cheung (2003). Esse código exige a construção de três arquivos(Anexo E) em C++, main.cpp, TP.cpp e TS.cpp. No arquivo main.cpp são definidos o algoritmo multiobjetivo a ser utilizado, bem como seus parâmetros

```
TesteNSGA.SetParameters(100,1000, 1,2000, 100, true); // Spea
```

O arquivo TP.cpp define basicamente a dimensão da cadeia representativa das soluções, no caso de dimensão dez (10, 7 culturas e 3 sistemas de irrigação), a faixa de valores que cada variável de decisão da cadeia pode assumir e se cada qual dos objetivos é de minimização ou maximização.

No arquivo TS.cpp são introduzidas as rotinas de leitura de dados, avaliação das funções objetivo e os operadores de recombinação e mutação. Os operadores de recombinação e mutação adotados foram BL-X e a mutação não uniforme, os quais foram codificados na linguagem C++, juntamente com a função de avaliação dos objetivos específicos para o problema em estudo.

Os dados são lidos do arquivo entrada.txt, conforme descrição do item 6.11.5.

Verificou-se ainda que, para a população de soluções de 100 elementos, 10.000 gerações eram mais que suficientes para geração das frentes Pareto, de forma que o tempo de processamento computacional não se mostrou restritivo.

Os diversos valores adotados para as probabilidades de recombinação e mutação mostraram-se indiferentes à geração das frentes Pareto. Essa característica talvez se deva ao fato do problema em estudo apresentar número reduzido de variáveis de decisão

(=10). Assim, utilizaram-se as probabilidades de recombinação e mutação de 0,7 e 0,1 ($<1/\text{comprimento da cadeia representativa das soluções}$).

Considerando ainda que o algoritmo SPEA não é apropriado à identificação das soluções dos extremos da frente Pareto, adotaram-se populações externas de dimensão (=1000) suficiente para armazenar as frentes Pareto todas.

6.11.4 Objetivos Considerados

Vislumbrou-se inicialmente que objetivos econômico-financeiros, ambientais e sociais fossem contemplados na identificação das soluções de melhor compromisso. Assim, foram apontados os seguintes objetivos: maximização do benefício líquido (F1), minimização do consumo de água (F2), maximização da geração de empregos (F3), maximização da diversidade na produção de alimentos (F4) expressos por:

F1= maximização do benefício líquido, formado pela RECEITA que por sua vez é formada pelo preço pago ao produtor (CR e CT) multiplicado pela respectiva produção, subtraídos os custos necessários para a produção que é formado por: custo de implantação do pomar (CIP), custo de investimento do sistema de irrigação em função da cultura e método de irrigação (CISI), consumo de água para cada sistema de irrigação e para cada cultura (CONSA), custo da mão de obra em função do sistema de irrigação (HD), custo da mão de obra mais custo consumo energia elétrica (CEMO);

F2= minimização do consumo de água, que é em função da cultura e do sistema de irrigação adotados, contabilizados pelo CONSA (consumo de água para cada sistema de irrigação e para cada cultura);

F3= maximização da geração de empregos, que também é em função da cultura e do sistema de irrigação adotados, contabilizados pelo HD (custo da mão de obra em função do sistema de irrigação);

F4= maximização da diversidade na produção de alimentos;

6.11.5 Formulação das Funções Objetivo

Visando o alcance dos objetivos considerados foram necessárias definições das funções objetivo:

F1 maximização do benefício líquido, composto pela receita da venda dos produtos agrícolas subtraindo-se os custos de produção e possíveis custos da água:

$$F1 = \max [BENEFÍCIO - (CUSTO + CA * AGUA)]; // \text{maximização do benefício líquido}$$

Sendo:

$$BENEFÍCIO = \sum_{gleba=1}^4 \sum_{ano=1}^{horizonte} [RECEITA_i(cultura(gleba), ano)]$$

$$CUSTO = \sum_{gleba=1}^4 \left\{ CIP(cultura(gleba)) + CISI(cultura(gleba), sistema(gleba)) + \sum_{ano=1}^{horizonte} [CEMO_i(cultura(gleba), ano) + CMP_i(cultura(gleba), ano)] \right\}$$

$i = \text{sistema de irrigação da gleba}$

Portando o custo é formado pelo CIP(Custo de implantação do pomar) mais o CISI(Custo de implantação o sistema de irrigação em questão), mais o CEMO(fator que engloba custo de mão de obra e custo da energia elétrica consumida), mais o CMP(custo de manutenção do pomar); o custo é estabelecido ano a ano em função da cultura e do sistema de irrigação adotado em cada gleba.

A receita da cultura para uma gleba, no ano considerado. É um parâmetro lido pelo programa, que corresponde ao produto da produtividade (PROD) e o preço de venda de referência da cultura considerada, CT(cultura(gleba)):

$$RECEITA(cultura(gleba), ano) = PROD * CR(cultura(gleba));$$

Esse valor pode ser recalculado para que se possa variar o preço de venda nas simulações, admitindo um outro valor unitário para a cultura da gleba, CT(cultura(gleba)), multiplicando-o por:

$$razão = CT(cultura(gleba)) / CR(cultura(gleba))$$

AGUA= varia conforme valor simulado, US\$ 5,00, US\$ 10,00, US\$ 15,00, US\$ 20,00 e US\$ 25,00; transformados em Reais utilizando para conversão R\$ 1,80= US\$ 1,00, custo unitário da água (R\$ /1000 m³)

$CIP(cultura(gleba))$ = custo de investimento do pomar relativo à cultura da gleba (em reais)

$CISI(cultura(gleba), sistema(gleba))$ =custo de investimento para a cultura e sistema de irrigação da gleba considerada (em reais)

$CEMO_i(cultura(gleba), ano)$ =custo de mão de obra e energia elétrica/ano para a cultura e o sistema de irrigação i da gleba, no ano considerado (em reais)

$CMP_i(cultura(gleba), ano)$ =custo de manutenção do pomar (insumos, mão de obra) para dada cultura e determinado sistema de irrigação, no ano considerado (em reais)

$$CA = \sum_{gleba=1}^4 \sum_{ano=1}^{horizonte} [CONSA_i(cultura(gleba), ano)]$$

$CONSA_i(cultura, ano)$ =consumo de água para a cultura e o sistema de irrigação i da gleba, no ano considerado (m^3/ano)

$AGUA$ =custo unitário da água varia conforme valor simulado ($R\$/m^3$)

O F2 se refere a minimização do consumo de água para as glebas em diferentes condições de cultura e sistema de irrigação, portanto:

$$F2 = \min CA // \text{minimização do consumo de água}$$

O F3 tem como objetivo maximizar os dias de trabalho necessários para a produção agrícola no determinado período, portanto:

$$F3 = \max \sum_{gleba=1}^4 \sum_{ano=1}^{horizonte} HD_i(cultura(gleba), ano) // \text{geração de empregos expressa em}$$

termos da maximização da mão de obra

Sendo:

$HD_i(\text{cultura}(\text{gleba}), \text{ano}) = \text{mão de obra para a cultura e sistema de irrigação } i \text{ da gleba no ano considerado (homens.dia)}$

E finalmente o F4 tem como objetivo a maximização da diversificação na produção agrícola, expresso por:

$F4 = \max(\text{número total de culturas diferentes nas 4 glebas}) // \text{maximização da produção de alimentos expressa em termos da variabilidade das culturas}$

6.11.6 Arquivo de entrada (entrada.txt)

O arquivo de entrada de dados é formado por 77 linhas. As primeiras linhas contêm as informações relativas ao número de anos do horizonte de planejamento adotado, taxa de juros anuais, número de culturas investigadas, número de sistemas de irrigação analisados e número de glebas em que cada propriedade foi subdividida. Em seguida, são apresentados sete agrupamentos de 11 linhas cada, relativos a determinada cultura. Cada agrupamento de 11 linhas é assim dividido:

Primeira Linha: constam da primeira linha desse arquivo, os seguintes dados, assim ordenados: custo de implantação do pomar(CIP) e custos de manutenção do pomar(CMP), sendo os custos de manutenção do pomar: um único valor para o primeiro e segundo anos, outro valor para o terceiro ano e novo valor para os demais anos do horizonte de planejamento (4° ao 15°).

Segunda Linha: Esta linha se refere ao sistema de irrigação por gotejamento e inicia-se com o custo de implantação do sistema de irrigação (CISI) de gotejamento para a cultura. O segundo item na linha é um único valor relativo ao consumo de água (CONSA) para a cultura nos anos 1 e 2. Em seguida, lê-se um único valor relativo ao custo da mão de obra e energia elétrica (CEMO) para o 1° e 2° anos, seguido dos dados de consumo de água (CONSA) e custo da mão de obra e energia elétrica (CEMO) para o 3° ano, e dos dados de consumo de água (CONSA) e custo da mão de obra e energia elétrica (CEMO) a serem considerados do 4° ao 15° ano.

Terceira e Quarta Linhas: Os dados apresentados na terceira e na quarta linha possuem a mesma estrutura da 2ª linha, referindo-se, porém, aos sistemas de microaspersão e aspersão, respectivamente.

Quinta Linha: A quinta linha refere-se à receita obtida ano a ano com a comercialização da produção (RECEITA). Admitem-se valores distintos para os 6 primeiros anos e, a partir de então, o sexto valor da linha, referente ao 6º ano de produção, é adotado para o restante da vida útil do pomar.

Sexta Linha: A sexta linha refere-se à mão de obra (HD) vinculada ao sistema de irrigação de gotejamento para a cultura determinada na primeira linha, para o 1º e 2º ano é considerado o mesmo valor, 3º ano com valor específico e para o 4º ao 15º também é considerado um valor único.

Sétima e Oitava Linhas: Têm a mesma estrutura da sexta linha, porém, refere-se respectivamente aos sistemas de irrigação de microaspersão (7ª linha) e aspersão (8ª linha).

Tabela 6.14 Exemplo de linhas para cultura de ameixa no arquivo de entrada.

1ª linha	48987.47		29681.67		33282.6		34317.42
2ª linha	19808	1930.1	1099.3	2757.29	1511.71	2478.15	1376.53
3ª linha	42436	2716.44	558.05	3880.63	709.87	3487.77	664.57
4ª linha	8671.5	23423.55	4124.41	30445.68	5544.72	27997.03	4363.56
5ª linha	0	0	19000	30400	38000	32300	
6ª linha	39	55	50				
7ª linha	16	22	20				
8ª linha	121	180	132				

7. Resultados e Discussão

Os resultados obtidos nas simulações estão de forma integral no Anexo F deste documento.

7.1. Simulações com preços mínimos de venda para a produção agrícola

O procedimento de identificação de soluções pelo algoritmo SPEA, alimentado com preços mínimos históricos(2004-2006) pagos a produção agrícola das referidas culturas gerou alternativas para cada valor a ser cobrado pela água.

7.1.1 Resultados para água sem custo, em condição de remuneração mínima para a produção.

Ao analisar os resultados o SPEA forneceu 151 alternativas sendo que dentre elas somente 10 alternativas conseguiram resultado econômico positivo, ou seja não dariam prejuízo ao produtor. Os resultados para a simulação de remuneração com preço mínimo, sem cobrança pelo uso da água apontam a Atemóia(1), a Maçã(5) e o Caqui(2), como as culturas de desempenho econômico positivo, ou seja que deram lucro, sendo que as demais culturas representaram prejuízo para os agricultores. Lembrando ainda que o desempenho de cada cultura está relacionado ao sistema de irrigação utilizado, o sistema de irrigação de melhor desempenho foi o de gotejamento(0), seguido pelo sistema de aspersão(2) e por último o sistema de microaspersão(1).

Quanto as culturas: a atemóia ficou responsável por 82,5 por cento dos resultados positivos, seguida pela cultura de maçã responsável por 10,0 por cento dos resultados positivos e a cultura de caqui foi a ultima a alcançar resultados positivos, com a pequena participação de 7,5 por cento. Figura 7.1

Figura 7.1. Gráfico de desempenho das culturas economicamente viáveis, sem custo para água

Os sistemas de irrigação ficaram assim distribuídos: 77,5 por cento para o sistema de irrigação por gotejamento, 20 por cento para o sistema de aspersão e somente 2,5 para o sistema de irrigação por microaspersão. Figura 7.2.

Figura 7.2. Gráfico de desempenho dos sistemas de irrigação, sem custo para a água.

Quanto a diversificação na produção agrícola, os melhores resultados foram obtidos em situações de glebas com cultura homogênea(figura 7.5), ou seja a produção mais rentável tende a ser só de uma cultura em específico, no caso a atemóia, como podemos notar na tabela 7.1

A Tabela 7.1 contém as soluções economicamente viáveis identificadas pelo algoritmo SPEA e os respectivos valores das funções objetivos, considerando o preço médio de remuneração do produtor e o valor de US\$ 0,00 por mil metros cúbicos de água.

Tabela 7.1. Alternativas economicamente viáveis, para um custo da água de US\$ 0,00 por 1000m³

F1(RECEITA) Reais	F2(ÁGUA) M ³	F3(HD) Homens/dia	F4(DIVERSIDADE)	CULTURAS ADOTADA				SISTEMA DE IRRIGAÇÃO			
203048	160220	3188	1	1	1	1	1	0	0	0	0
157626	534665	5031	1	1	1	1	1	0	0	0	2
136796	183719	2878	2	1	1	1	5	0	0	0	0
121715	183172	2645	2	1	1	1	5	0	0	0	1
112204	909110	6874	1	1	1	1	1	2	0	2	0
96777	556891	5141	2	1	1	1	5	0	0	0	2
64716	158504	3154	2	2	1	1	1	0	0	0	0
51355	931336	6984	2	1	1	1	5	2	0	0	2
20212	527140	4941	2	2	1	1	1	2	0	0	0
19294	532949	4997	2	1	1	2	1	0	0	0	2

Vislumbrou-se inicialmente que objetivos econômico-financeiros, ambientais e sociais fossem contemplados na identificação das soluções de melhor compromisso. Assim, foram apontados os seguintes objetivos: maximização do benefício líquido (F1), minimização do consumo de água (F2), maximização da geração de empregos (F3), diversidade de culturas(F4).

F1x F2

Considerando que é mais fácil visualizar as frentes Pareto determinadas com base em dois objetivos, iniciaram-se as análises considerando simultaneamente F1 (maximização do benefício líquido) e F2 (minimização do consumo hídrico), com base nas 151 alternativas fornecidas pelo SPEA obteve-se o seguinte gráfico, figura 7.3 :

Figura 7.3 Gráfico relação F1 e F2 em condições de preço mínimo e sem cobrança de água

F1xF3

Considerando-se ainda F1 (maximização do benefício líquido) e F3 (maximização da geração de emprego) simultaneamente, os mesmos resultados são obtidos com pequenas diferenças de benefício líquido, obteve-se o seguinte gráfico, figura 7.4 :

Figura 7.4 Gráfico relação F1 e F3 em condições de preço mínimo e sem cobrança de água

F1xF4

Os melhores resultados econômicos foram obtidos em condições de diversidade de produção menores, como podemos observar na figura 7.5

Figura 7.5 Relação F1 e F4 em condições de preço mínimo e sem cobrança de água

7.1.2 Custo da água U\$5,00 por mil metros cúbicos.

Na simulação com a possível cobrança da água no valor de US\$5,00 para cada mil metros cúbicos consumidos foram geradas 302 alternativas, destas somente 17 obtiveram resultado econômico positivo. A Tabela 7.2 contém as soluções economicamente viáveis identificadas pelo algoritmo SPEA e os respectivos valores das funções objetivos, considerando o preço médio de remuneração do produtor e o valor de U\$ 5,00 por mil metros cúbicos de água.

Tabela 7.2. Alternativas economicamente viáveis, para um custo da água de U\$ 5,00 por 1000m³

F1(RECEITA) Reais	F2(ÁGUA) M ³	F3(HD) Homens/dia	F4(DIVERSIDADE)	CULTURAS					IRRIGAÇÃO		
152814	534665	5031	1	1	1	1	1	0	2	0	0
135143	183719	2878	2	1	5	1	1	0	0	0	0
135143	183719	2878	2	5	1	1	1	0	0	0	0
120066	183172	2645	2	1	5	1	1	0	1	0	0
120066	183172	2645	2	1	5	1	1	0	1	0	0
104022	909110	6874	1	1	1	1	1	0	0	2	2
104022	909110	6874	1	1	1	1	1	2	2	0	0
91765	556891	5141	2	1	1	1	5	0	0	0	2
91765	556891	5141	2	1	5	1	1	0	2	0	0
63290	158504	3154	2	1	1	1	2	0	0	0	0
63290	158504	3154	2	2	1	1	1	0	0	0	0
42973	931336	6984	2	1	5	1	1	0	2	0	2
42973	931336	6984	2	1	1	1	5	0	0	2	2
15468	527140	4941	2	2	1	1	1	2	0	0	0
15468	527140	4941	2	1	1	1	2	0	0	0	2
14498	532949	4997	2	1	1	2	1	0	2	0	0
14498	532949	4997	2	1	1	2	1	0	2	0	0

A tabela 7.2 aponta a atemóia(1), a maçã(5) e a caqui(2), como as culturas de melhor desempenho econômico como pode-se observar na figura 7.6, sendo que as demais culturas representaram prejuízo para os agricultores. Lembrando ainda que o desempenho de cada cultura está relacionado ao sistema de irrigação utilizado, o sistema de irrigação de melhor desempenho foi o de gotejamento(0) seguido pelo sistema de aspersão(1) e em último ficou o sistema de microaspersão(2), figura 7.7.

Figura 7.6. Gráfico de desempenho das culturas economicamente viáveis, US\$ 5,00 por mil m³.

Figura 7.7. Gráfico de desempenho dos sistemas de irrigação, US\$ 5,00 por mil m³.

F1xF2

A seguir a figura 7.8, demonstra a relação entre os diferentes objetivos a maximização do benefício líquido e o consumo hídrico da produção, onde podemos observar que não há uma relação direta entre o consumo hídrico e a renda do produtor.

Figura 7.8 Relação F1 e F2 em condições de preço mínimo e US\$ 5,00 por mil m³.

F1xF3

Considerando-se ainda F1 (maximização do benefício líquido) e F3 (maximização da geração de emprego) simultaneamente, os mesmos resultados são obtidos com pequenas diferenças de benefício líquido, obteve-se o seguinte gráfico :

Figura 7.9 Relação F1 e F3 em condições de preço mínimo e US\$ 5,00 por mil m³.

F1xF4

A relação entre F1 e F4 foi praticamente a mesma obtida na simulação anterior, os melhores resultados econômicos foram obtidos em menores condições de diversidade de produção, como podemos observar na figura 7.10

Figura 7.10 Relação F1 e F4 em condições de preço mínimo e US\$ 5,00 por mil m³.

7.1.3 Custo da água U\$10,00 por mil metros cúbicos

A simulação com o custo da água em U\$10,00 por mil metros cúbicos obteve 151 alternativas, destas somente 10 apresentaram resultado econômico (F1) positivo, tabela 7.3.

Tabela 7.3. Alternativas economicamente viáveis, custo da água de U\$ 10,00/1000m³

F1(RECEITA) Reais	F2(ÁGUA) M ³	F3(HD) Homens/dia	F4(DIVERSIDADE)	CULTURAS				IRRIGAÇÃO			
200164	160220	3188	1	1	1	1	1	0	0	0	0
148002	534665	5031	1	1	1	1	1	0	0	0	2
133489	183719	2878	2	5	1	1	1	0	0	0	0
118418	183172	2645	2	1	1	5	1	0	0	1	0
95840	909110	6874	1	1	1	1	1	0	0	2	2
86753	556891	5141	2	1	1	5	1	0	0	2	0
61863	158504	3154	2	1	2	1	1	0	0	0	0
34591	931336	6984	2	1	5	1	1	0	2	0	2
10724	527140	4941	2	2	1	1	1	2	0	0	0
9701	532949	4997	2	1	2	1	1	2	0	0	0

As culturas de melhor desempenho econômico foram: atemóia (1), caqui(2) e maçã(5) igual a simulação anterior, com uma sensível diferença em relação a simulação nos percentuais de cada cultura e a segunda colocação passou a ser da cultura de caqui. A cultura de ameixa representou a 65% na participação das alternativas economicamente viáveis, seguida pela caqui com 25%, enquanto a maçã representou 10% das alternativas, figura 7.11.

Figura 7.11. Gráfico de desempenho das culturas, custo da água de U\$ 10,00 /1000m³

Os sistemas de irrigação ficaram assim distribuídos: sistema de irrigação por gotejamento 77,5%, sistema de irrigação por aspersão 20,0% e o sistema de irrigação por microaspersão representou 2,5% das alternativas, figura 7.12.

Figura 7.12. Desempenho dos sistemas de irrigação, para um custo da água de US\$ 10,00/1000m³

F1xF2

Análises considerando simultaneamente F1 (maximização do benefício líquido) e F2 (minimização do consumo hídrico), com base nas 151 alternativas fornecidas pelo SPEA obteve-se o seguinte gráfico (figura 7.13):

Figura 7.13 Relação F1 e F2 em condições de preço mínimo e custo US\$ 10,00/1000m³

F1xF3

Figura 7.14 Relação F1 e F3 em condições de preço mínimo e custo US\$ 10,00/1000m³

F1xF4

Figura 7.15 Relação F1 e F4 em condições de preço mínimo e US\$ 10,00 por mil m³.

7.1.4 Custo da água U\$15,00 por mil metros cúbicos

Para a simulação com U\$15,00 por mil metros cúbicos resultou em 151 alternativas, destas somente 10 apresentaram resultado econômico positivo, o desempenho da cultura de maçã superou o caqui em relação aos resultados obtidos na simulação com valor da água a U\$10,00 por mil metros cúbicos, conforme podemos observar na tabela 7.3 e na figura 7.16.

Tabela 7.4. Alternativas economicamente viáveis, custo da água de U\$ 15,00/1000m³

F1(RECEITA) Reais	F2(ÁGUA) M ³	F3(HD) Homens/dia	F4(DIVERSIDADE)	CULTURAS				IRRIGAÇÃO			
198722	160220	3188	1	1	1	1	1	0	0	0	0
143190	534665	5031	1	1	1	1	1	0	0	2	0
131836	183719	2878	2	1	1	1	5	0	0	0	0
116769	183172	2645	2	1	1	5	1	0	0	1	0
87658	909110	6874	1	1	1	1	1	0	0	2	2
81741	556891	5141	2	1	1	5	1	0	0	2	0
60436	158504	3154	2	1	2	1	1	0	0	0	0
26209	931336	6984	2	1	1	5	1	0	2	2	0
5979	527140	4941	2	2	1	1	1	2	0	0	0
4904	532949	4997	2	1	2	1	1	2	0	0	0

Figura 7.16. Desempenho das culturas, custo da água de U\$ 15,00 /1000m³

Quanto aos sistemas de irrigação, não houve diferença nos percentuais de participação dos sistemas em comparação a simulação feita com o custo de US\$ 10,00 por mil m³, figura 7.17.

Figura 7.17. Desempenho dos sistemas de irrigação, para um custo da água de US\$ 15,00/1000m³

F1xF2

A seguir a figura 7.18, demonstra a relação entre os diferentes objetivos a maximização do benefício líquido e o consumo hídrico da produção.

Figura 7.18 Relação F1 e F2 em condições de preço mínimo e custo de m³ de água US\$15,00

F1xF3

Considerando-se ainda F1 (maximização do benefício líquido) e F3 (maximização da geração de emprego) simultaneamente, os mesmos resultados são obtidos com pequenas diferenças de benefício líquido, figura 7.19.

Figura 7.19 Relação F1 e F3 em condições de preço mínimo e custo de m³ de água US\$15,00

F1xF4

Figura 7.20 Relação F1 e F4 em condições de preço mínimo e US\$ 15,00 por mil m³.

7.1.5 Custo da água US\$ 20,00 por mil metros cúbicos

Para a simulação com US\$ 20,00 por mil metros cúbicos o desempenho das culturas em relação as simulação anterior foi muito semelhante(150 alternativas, destas

somente 10 apresentaram resultado econômico positivo), feita com valores da água a U\$ 15,00 por mil metros cúbicos. As alternativas viáveis ficaram distribuídas conforme a tabela 7.5. O desempenho das culturas (figura 7.21) e dos sistemas de irrigação (figura 7.22) também foram idênticos, o sistema de irrigação por gotejamento representou 77,5% das alternativas e os sistemas de irrigação por aspersão e microaspersão representaram 20,0% e 2,5% respectivamente.

Tabela 7.5. Alternativas economicamente viáveis, custo da água de U\$ 20,00/1000m³

F1(RECEITA) Reais	F2(ÁGUA) M ³	F3(HD) Homens/dia	F4(DIVERSIDADE)	CULTURAS				IRRIGAÇÃO			
197280	160220	3188	1	1	1	1	1	0	0	0	0
138378	534665	5031	1	1	1	1	1	2	0	0	0
130182	183719	2878	2	1	1	5	1	0	0	0	0
115121	183172	2645	2	1	1	1	5	0	0	0	1
107837	532949	4997	2	1	2	1	1	0	0	2	0
79476	909110	6874	1	1	1	1	1	2	0	0	2
76729	556891	5141	2	5	1	1	1	2	0	0	0
59010	158504	3154	2	1	1	2	1	0	0	0	0
17827	931336	6984	2	5	1	1	1	2	2	0	0
1235	527140	4941	2	1	1	1	2	0	0	0	2

Figura 7.21. Desempenho das culturas, custo da água de U\$ 20,00 /1000m³

Figura 7.22. Desempenho dos sistemas de irrigação, para um custo da água de US\$ 20,00/1000m³

F1xF2

A seguir a figura 7.23, demonstra a relação entre os diferentes objetivos a maximização do benefício líquido e o consumo hídrico da produção.

Figura 7.23 Relação F1 e F2 em condições de preço mínimo e custo de m³ de água US\$20,00

F1xF3

Considerando-se ainda F1 (maximização do benefício líquido) e F3 (maximização da geração de emprego) simultaneamente, os mesmos resultados são obtidos com pequenas diferenças de benefício líquido, figura 7.24.

Figura 7.24 Relação F1 e F3 em condições de preço mínimo e custo de m³ de água US\$20,00

F1xF4

Figura 7.25 Relação F1 e F4 em condições de preço mínimo e US\$ 20,00 por mil m³.

7.1.6 Custo da água U\$ 25,00 por mil metros cúbicos

A simulação com U\$25,00 por mil metros cúbicos, obteve resultados 150 alternativas sendo que destas somente 8 eram economicamente viáveis, tabela 7.6.

Tabela 7.6. Alternativas economicamente viáveis, custo da água de U\$ 25,00/1000m³

F1(RECEITA) Reais	F2(ÁGUA) M ³	F3(HD) Homens/dia	F4(DIVERSIDADE)	CULTURAS				IRRIGAÇÃO			
195838	160220	3188	1	1	1	1	1	0	0	0	0
133566	534665	5031	1	1	1	1	1	0	0	0	2
128529	183719	2878	2	1	1	5	1	0	0	0	0
113472	183172	2645	2	1	1	5	1	0	0	1	0
71717	556891	5141	2	1	1	5	1	0	0	2	0
71294	909110	6874	1	1	1	1	1	2	0	2	0
57583	158504	3154	2	1	1	2	1	0	0	0	0
9445	931336	6984	2	1	1	1	5	0	0	2	2

As culturas obtiveram o seguinte desempenho: Atemóia 84,3%, Maçã 12,5% e Caqui 3,1%, figura 7.26.

Figura 7.26. Desempenho das culturas, custo da água de U\$ 25,00 /1000m³

Os sistemas de irrigação têm o comportamento descrito na figura 7.27, sem modificações significativas em relação a simulação anterior com custo da água a US\$ 20,00 por mil m³.

Figura 7.27. Desempenho dos sistemas de irrigação, para um custo da água de US\$ 25,00/1000m³

F1xF4

Figura 7.28 Relação F1 e F4 em condições de preço mínimo e US\$ 25,00 por mil m³.

7.2 Simulação com preços médios de venda para a produção agrícola

Simulação feita com preços médios históricos(2004-2006) para as determinadas culturas, foi repetida utilizando uma receita gerada pela remuneração mínima do produto, para todos os valores de água de US\$ 5,00 a US\$25

7.2.1 Resultados para água sem custo, em condição de remuneração mínima para a produção.

Ao analisar os resultados o SPEA forneceu 242 alternativas sendo que dentre elas 174 alternativas conseguiram resultado econômico positivo, ou seja não dariam prejuízo ao produtor. Os resultados para a simulação de remuneração com preço médio, sem cobrança pelo uso da água apontam a Atemóia(1), Pêssego(4), Caqui(3), e Maça(5) como as culturas de maior destaque desempenho econômico positivo, já que todas as culturas deram lucro, figura 7.29 , lembrando ainda que o desempenho de cada cultura está relacionado ao sistema de irrigação utilizado, o sistema de irrigação de melhor desempenho foi o de gotejamento(0), seguido pelo sistema de aspersão(2) e por último o sistema de microaspersão(1).

Figura 7.29. Gráfico de desempenho das culturas economicamente viáveis, sem custo para água

Os sistemas de irrigação ficaram assim distribuídos: 64 por cento para o sistema de irrigação por gotejamento, 33 por cento para o sistema de aspersão e somente 2,1 para o sistema de irrigação por microaspersão. Figura 7.30.

Figura 7.30. Gráfico de desempenho dos sistemas de irrigação, sem custo para a água.

Quanto a diversificação na produção agrícola, os melhores resultados foram obtidos em situações de glebas com cultura homogênea (figura 7.31), ou seja a produção mais rentável tende a ser só de uma cultura em específico para todas as 4 glebas e para o mesmo sistema de irrigação.

Considerando que é mais fácil visualizar as frentes Pareto determinadas com base em dois objetivos, iniciaram-se as análises considerando simultaneamente F1 (maximização do benefício líquido), F2 (minimização do consumo hídrico), F3 (maximização da geração de emprego) e F4 (maximização da diversidade de produção), obteve-se os seguintes gráficos, figuras 7.31, 7.32 e 7.33 :

F1x F2

Figura 7.31 Gráfico relação F1 e F2 em condições de preço médio e sem cobrança de água

F1xF3

Figura 7.32 Relação F1 e F3 em condições de preço médio e sem cobrança de água

F1xF4

Figura 7.33 Relação F1 e F4 em condições de preço médio e sem cobrança de água

7.2.2 Custo da água U\$5,00 por mil metros cúbicos.

Na simulação com a possível cobrança da água no valor de US\$5,00 para cada mil metros cúbicos consumidos foram geradas 243 alternativas, destas 175 obtiveram resultado econômico positivo. O desempenho das culturas e sistemas de irrigação foram bem semelhantes aos obtidos na simulação sem custo algum para a água, como podemos observar nas figuras 7.34 e 7.35.

Figura 7.34. Gráfico de desempenho das culturas economicamente viáveis, US\$ 5,00 por mil m³.

Figura 7.35. Gráfico de desempenho dos sistemas de irrigação, US\$ 5,00 por mil m³.

A seguir as figuras 7.36, 7.37 e 7.38 demonstram a relação entre os diferentes objetivos a maximização do benefício líquido, consumo hídrico da produção, mão de obra empregada e diversificação de culturas.

Figura 7.36 Relação F1 e F2 em condições de preço médio e US\$ 5,00 por mil m³.

Figura 7.37 Relação F1 e F3 em condições de preço médio e US\$ 5,00 por mil m³.

Figura 7.38 Relação F1 e F4 em condições de preço médio e US\$ 5,00 por mil m³.

7.2.3 Custo da água U\$10,00 por mil metros cúbicos

A simulação com o custo da água em U\$10,00 por mil metros cúbicos obteve 242 alternativas, destas 172 apresentaram resultado econômico positivo. O desempenho das culturas e sistemas de irrigação foram bem semelhantes aos obtidos nas simulações anteriores com remuneração a preço médio, como podemos observar nas figuras 7.39 e 7.40.

Figura 7.39. Gráfico de desempenho das culturas, custo da água de U\$ 10,00 /1000m³

Figura 7.40. Desempenho dos sistemas de irrigação, para um custo da água de U\$ 10,00/1000m³

Nas análises considerando simultaneamente F1 (maximização do benefício líquido), F2 (minimização do consumo hídrico), F3 (maximização da geração de emprego) e F4 (maximização da diversidade de produção), obteve-se os seguinte gráficos, figuras 7.41, 7.42 e 7.43.

Figura 7.41 Relação F1 e F2 em condições de preço médio e custo US\$ 10,00/1000m³

Figura 7.42 Relação F1 e F3 em condições de preço médio e custo US\$ 10,00/1000m³

Figura 7.43 Relação F1 e F4 em condições de preço médio e US\$ 10,00 por mil m³.

7.2.4 Custo da água U\$15,00 por mil metros cúbicos

Para a simulação com U\$15,00 por mil metros cúbicos resultou em 242 alternativas, destas 167 apresentaram resultado econômico positivo, O desempenho das culturas foram bem semelhantes aos obtidos nas simulações anteriores com remuneração a preço médio, como podemos observar na figura 7.44 e os sistemas de irrigação obtiveram resultados idênticos aos da simulação com custo de água US\$ 10,00, figura 7.45.

Figura 7.44. Desempenho das culturas, custo da água de U\$ 15,00 /1000m³

Figura 7.45. Desempenho dos sistemas de irrigação, para um custo da água de US\$ 15,00/1000m³

Nas análises considerando simultaneamente F1 (maximização do benefício líquido), F2 (minimização do consumo hídrico), F3 (maximização da geração de emprego) e F4 (maximização da diversidade de produção), obteve-se os seguinte gráficos, figuras 7.46, 7.47 e 7.48.

Figura 7.46 Relação F1 e F2 em condições de preço mínimo e custo de m³ de água US\$15,00

Figura 7.47 Relação F1 e F3 em condições de preço mínimo e custo de m³ de água US\$15,00

Figura 7.48 Relação F1 e F4 em condições de preço mínimo e US\$ 15,00 por mil m³.

7.2.5 Custo da água US\$ 20,00 por mil metros cúbicos

Para a simulação com US\$ 20,00 por mil metros cúbicos não existiu alteração alguma do desempenho das culturas em relação as simulação anterior, 486 alternativas, destas somente 337 apresentaram resultado econômico positivo. No desempenho das culturas (figura 7.49) podemos destacar a queda no desempenho da cultura do pêsego que desta vez teve desempenho inferior ao da maçã, quanto aos sistemas de irrigação (figura 7.50) os resultados foram idênticos.

Figura 7.49. Desempenho das culturas, custo da água de US\$ 20,00 /1000m³

Figura 7.50. Desempenho dos sistemas de irrigação, para um custo da água de US\$ 20,00/1000m³

Nas análises considerando simultaneamente F1 (maximização do benefício líquido), F2 (minimização do consumo hídrico), F3 (maximização da geração de emprego) e F4 (maximização da diversidade de produção), obteve-se os seguinte gráficos, figuras 7.51, 7.52 e 7.53.

Figura 7.51 Relação F1 e F2 em condições de preço médio e custo de m³ de água US\$20,00

Figura 7.52 Relação F1 e F3 em condições de preço médio e custo de m³ de água US\$20,00

Figura 7.53 Relação F1 e F4 em condições de preço médio e US\$ 20,00 po mil m³.

7.2.6 Custo da água U\$ 25,00 por mil metros cúbicos

A simulação com U\$25,00 por mil metros cúbicos, obteve resultados 243 alternativas sendo que destas 161 eram economicamente viáveis. No desempenho das culturas a cultura do pêssgo tem uma pequena melhora no rendimento, porém ineficaz para tomar o lugar da cultura da maçã, figura 7.54.

Figura 7.54. Desempenho das culturas, custo da água de U\$ 25,00 /1000m³

Os sistemas de irrigação têm o comportamento descrito na figura 7.55, sem modificações significativas em relação a simulação anterior com custo da água a US\$ 20,00 por mil m³.

Figura 7.55. Desempenho dos sistemas de irrigação, para um custo da água de U\$ 25,00/1000m³

Nas análises considerando simultaneamente F1 (maximização do benefício líquido), F2 (minimização do consumo hídrico), F3 (maximização da geração de emprego) e F4 (maximização da diversidade de produção), obteve-se os seguinte gráficos, figuras 7.56, 7.57 e 7.58

Figura 7.56 Relação F1 e F2 em condições de preço médio e custo de m³ de água US\$25,00

Figura 7.57 Relação F1 e F3 em condições de preço médio e custo de m³ de água US\$25,00

Figura 7.58 Relação F1 e F4 em condições de preço médio e US\$ 25,00 por mil m³.

7.3.Comparação entre as simulações preço mínimo e preço médio.

Quanto as culturas, nas simulações com preços mínimos somente 3 culturas obtiveram resultados econômicos positivos, atemóia, maçã e caqui, como podemos observar em termos percentuais na tabela 7.7, e no figura 7.59.

Tabela 7.7. Dados em porcentagem de culturas economicamente viáveis, com remuneração mínima

Valor da água	Ameixa	Atemóia	Caqui	Goiaba	Pêssego	Maçã
US\$ 0,00	0,00	82,50	7,50	0,00	0,00	10,00
US\$ 5,00	0,00	79,41	8,82	0,00	0,00	11,76
US\$ 10,00	0,00	65,00	25,00	0,00	0,00	10,00
US\$ 15,00	0,00	82,50	7,50	0,00	0,00	10,00
US\$ 20,00	0,00	82,50	7,50	0,00	0,00	10,00
US\$ 25,00	0,00	84,37	3,10	0,00	0,00	12,50

Figura 7.59 Culturas economicamente viáveis, com remuneração mínima

Nas simulações com preços médios todas as culturas apresentaram alternativas economicamente viáveis de produção, conforme podemos observar na tabela 7.8 e na figura 7.60.

Tabela 7.8. Dados em porcentagem de culturas economicamente viáveis, com remuneração média

Valor da água	Ameixa	Atemóia	Caqui	Goiaba	Pêssego	Maçã
US\$ 0,00	3,72	36,25	22,06	3,58	23,07	10,74
US\$ 5,00	3,57	36,43	22,00	3,71	23,00	11,00
US\$ 10,00	3,76	36,71	21,53	3,47	22,69	10,98
US\$ 15,00	3,13	37,05	21,43	3,87	22,77	9,67
US\$ 20,00	3,41	37,17	21,59	3,78	3,19	11,05
US\$ 25,00	2,48	37,73	21,43	4,04	6,68	11,49

Figura 7.60 Culturas economicamente viáveis, com remuneração mínima

Os sistemas de irrigação tem certa sensibilidade quanto ao preço final de venda do produto, que somado ao custo da água influenciam de maneira notável na participação dos diferentes sistemas de irrigação nos resultados simulados como podemos observar na tabela 7.9 e na figura 7.61.

Tabela 7.9. Participação dos sistemas de irrigação condições de custo de água e remuneração diferentes.

Participação em % dos sistemas de irrigação em produção a preço mínimo			
Custo da água	Gotejamento	Microaspersão	Aspersão
US\$ 0,00	77,50	2,50	20,00
US\$ 5,00	75,00	2,94	22,06
US\$ 10,00	77,50	2,50	20,00
US\$ 15,00	77,50	2,50	20,00
US\$ 20,00	77,50	2,50	20,00
US\$ 25,00	78,12	3,12	18,75
média	77,19	2,68	20,14
Participação em % dos sistemas de irrigação em produção a preço médio			
US\$ 0,00	64,00	2,14	33,86
US\$ 5,00	64,29	1,88	34,25
US\$ 10,00	64,88	1,73	33,38
US\$ 15,00	65,33	1,79	32,89
US\$ 20,00	64,76	1,93	33,31
US\$ 25,00	65,68	1,86	32,45
média	64,82	1,89	33,36

Figura 7.61 Participação dos sistemas de irrigação em diferentes condições de remuneração.

8. Conclusões

Dois dos maiores entraves na produção agrícola são a falta de planejamento e a dependência de fatores climáticos. Para minimizar a dependência dos fatores climáticos pode-se fazer uso da irrigação e o planejamento, por sua vez, requer conhecimentos específicos fora do domínio do pequeno produtor rural.

O maior problema do planejamento agrícola é a natureza multiobjetivo da atividade, aliada às incertezas de mercado. Em geral, considera-se como principal objetivo, a eficiência econômica, por ser essa a principal motivação do produtor. Porém, a preocupação com recursos como água e energia elétrica vêm ganhando espaço no planejamento devido a sua eminente escassez e valorização. Outros objetivos devem ser perseguidos, tais como a produção de alimentos de maneira diversificada e a geração de empregos para o setor.

O presente trabalho de pesquisa foi desenvolvido com o propósito de demonstrar que tais objetivos podem ser considerados no planejamento de pequenas propriedades

rurais, oferecendo, assim, subsídios ao agricultor no que diz respeito à escolha de culturas frutíferas, obedecendo às vocações da região de estudo (Município de Botucatu-SP), e sistemas de irrigação a implantar. Além disso, tendo em vista a perspectiva de cobrança pelo uso da água, procurou-se investigar a influência dos possíveis custos na referida escolha.

Para tanto, o problema de planejamento agrícola foi formulado considerando cinco objetivos distintos, maximização do retorno financeiro de um determinado produto agrícola e o método de irrigação empregado na sua produção, minimização do consumo da água; maximização da geração de empregos diretos necessários para a produção, maximização da diversificação na produção de alimentos e investigação o efeito do valor a ser cobrado pelo uso da água. O algoritmo genético multiobjetivo SPEA (*strength Pareto evolutionary algorithm*), foi implementado a partir do código de Cheung (2003) e utilizado como ferramenta para resolução dos problemas de otimização correspondentes.

Um intensivo trabalho de levantamento de custos e dimensionamento de sistemas de irrigação foi realizado, incluindo avaliações de demanda hídrica para a irrigação, considerando as condições climáticas locais. Planilhas Excel foram especialmente construídas, para produzir dados de entrada para que o algoritmo SPEA pudesse realizar as avaliações numéricas dos objetivos.

Como resultados das simulações realizadas considerando seis frutíferas(atemóia, ameixa, caqui, goiaba, pêssego e maçã) e três sistemas de irrigação (gotejamento, microaspersão e aspersão), para as diferentes combinações de custo da água e preço de venda da produção agrícola, soluções Pareto ótimas foram produzidas, permitindo diversas conclusões.

Muitas combinações de culturas e sistemas de irrigação implicaram em prejuízo econômico, evidenciando que o produtor necessita do suporte de análises dessa natureza.

A cultura da atemóia mostrou-se uma alternativa atraente para a região, independentemente do custo da água, até mesmo sob condições de venda da produção ao preço mínimo de mercado praticado no período considerado (2004-2006).

O sistema de irrigação por gotejamento foi apontado como a melhor alternativa associada às diversas culturas. Tal fato se deve ao baixo consumo de energia elétrica característico desse sistema e maior eficiência (90%), quando comparado ao sistema de

aspersão (80%). O preço final de venda influenciou sensivelmente nos sistemas de irrigação evidenciando ainda mais que em condições críticas o sistema de irrigação por gotejamento como a melhor opção. Já o sistema de irrigação por aspersão demonstrou certa robustez devido a seu baixo custo de implantação e manutenção e também pela pouca interferência dos valores cobrados pela água.

Os valores investigados para a água, na faixa de \$5/1000 m³ a \$25/1000 m³, não interferiram de maneira significativa nas alternativas economicamente viáveis de produção de frutíferas. Essa indiferença se deve ao fato de que o custo da água é muito inferior aos custos de produção de frutíferas. Observa-se que conclusões muito diferentes são esperadas para a produção de grãos ou hortaliças, por exemplo, para as quais o custo da água pode representar grande contribuição no custo total.

Da maneira como os problemas de otimização foram formulados neste trabalho, não foram considerados os riscos inerentes à atividade agrícola, a não ser através de preços de venda reduzidos. Entretanto, riscos relativos a condições climáticas desfavoráveis não foram admitidos, mas devem constituir alvos de investigações futuras. Contudo, o presente trabalho representou um incentivo à utilização de instrumentos mais elaborados na atividade de planejamento agrícola, no caso, os algoritmos genéticos multiobjetivo, e espera-se que, como “semente”, ela venha a gerar “frutos” no futuro próximo.

9. Referências bibliográficas

- AGRIANUAL 2005: Anuário da Agricultura Brasileira. FNP, São Paulo, SP, 10^a edição, p. 349-352, 385-392, 439-443, 495-502, 513-520, 2005.
- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. (1998) Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO, Rome. 290 p. (Irrigation and Drainage 56).
- BASTOS, E.A.; NUNES, B.H.; ANDRADE JUNIOR, A.S.(2000) Dados agrometeorológicos para o município de Parnaíba, PI. Teresina: EMBRAPA. 27p. Documentos, 46.

- BOLETIM N°200, Instruções Agrícolas para o Estado de São Paulo. (1987). Instituto Agrônomo. Campinas. 4ª Edição. 231p.
- BONFANTI (1997). Bacias experimentais: Metodologia aplicada para a escolha em estudo de gestão de recursos hídricos. Disponível em:
http://www.abes-es.org.br/paginas/recursos_hidricos.asp>. Acesso em out. 2004.
- BRASIL (1934). Decreto nº 24.643, de 10 de Julho de 1934. Disponível em:
<http://www.hidricos.mg.gov.br/legisla/codaguas.htm>>. Acesso em set. 2004.
- BRASIL (1934). Decreto nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997. Disponível em:
http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm>. Acesso em ago. 2004.
- BRITO, R.; SCUDINO, P.; BALABRAM, V. (2001) Água: saber usar para não faltar. Minas faz Ciência. Belo Horizonte, n.5, p.4-9.
- CAMARGO, M.B.P.; CAMARGO, A.P. (1993) Representação gráfica informatizada do extrato do balanço hídrico de Thornthwaite & Mather. Bragantia, Campinas, v.52, p.169-172.
- CASTRO (2001). Simulation of farms' decision-making processes based upon agri-environmental policy effects: the IMAGES Project. Disponível em:
<http://www.uniud.it/cartesio/images/Articoli/Rabat.html>>. Acesso em dez. 2003.
- CASTRO, R. S. de; AZEVEDO, C. B.; NUNES, G. H. de S.; CARNEIRO, C. R. (2002) Utilização de efluente de viveiro de peixes para a irrigação do tomate cereja cultivado em diferentes substratos. Horticultura Brasileira, v.20, n.2, Suplemento 2, julho.
- CETESB, Diagnóstico da Área de Proteção Ambiental de Botucatu. Projeto DAEE 120.299, São Paulo, 1985.

- CHEUNG, P. (2004). Análise de reabilitação de redes de distribuição de água para abastecimento via algoritmo genético multi-objetivo. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- CHRISTOFIDIS, D.(2002) Irrigação: a fronteira hídrica na produção de alimentos. Irrigação e tecnologia moderna, Brasília, n.54, p.46-55.
- COELLO, C.A.C, (1996) “An Empirical Study of Evolutionary Techniques for Multiobjective Optimization in Engineering Design;” PhD. Thesis, Department of Computer Science, Tulane University, New Orleans, Louisiana.
- COELLO, C.A.C., LECHUGA, M.S. (2002). MOPSO: A proposal for Multiple Objective Particle Swarm Optimization. In. Proceedings of Congress on Evolutionary Computation (CEC’2002), Vol.2, IEEE, p. 1051-1056.
- DEB, K. (1999) ‘An introduction to genetic algorithms’, Sadhana 24, 293–315. Directorate of economics and statistics.: 1992, Statistical abstracts Andhra Pradesh, Government of Andhra Pradesh.
- DEB, K. (2001) Multi-Objective Using Evolutionary Algorithms. John Wiley & Sons, Ltd.
- DOORENBOS, J.; KASSAN, A.H.(1979) Yield response to water. Rome : FAO. 235p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).
- FONCECA, C. M., FLEMING, P. **J.** (1993). Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization. Genetic Algorithms, Urbana-Champaign, IL. 416-423.
- FRANCATO, A.L. (2002) Otimização Multiobjetivo para a Operação de Sistemas Urbanos de Abastecimento de Água. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 182p. Campinas.

- FRIZZONE, J.A.; BOTREL, T.A.; FREITAS, H.A.C.(1994) Análise comparativa dos custos de irrigação por pivô-central, em culturas de feijão, utilizando energia elétrica e óleo diesel. Engenharia Rural, Piracicaba, v.5, n.1, p.34-53.
- FUKUDA, H.(1976) Irrigation in the world, University of Tokyo Press, Japão p.328.
- GANOULIS, J.(2001) “Ranking Alternative Strategies of Agricultural Water use in the Euro-Mediterranean Area” Euro-Mediterranean Forum of Economic Institutes, Marseille, 2001.
- GOICOECHEA, A., DUCKSTEIN, L. FOGEL, M. M. (1979). Multiple Objectives under Uncertainty: an Ilustrative Aplication of Protrade. Water Resources Research. Washington, Vol. 15, N2, p. 203-210.
- GOICOECHEA A., HANSEN D., DUCKSTEIN L. (1982) Multiobjective Decision Analysis with Engineering and Business Applications. New York: Wiley.
- GOLDBERG, D. E., (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Adison-Wesley, USA.
- GOLDEBERG, D. E., DEB, K., KORB, B. (1990) Messy genetic algorithms revisited: Nonuniform size and scale Complex Systems, 4}, p415-444.
- GOMES, H. P(1999). Engenharia de Irrigação Hidráulica dos sistemas pressurizados aspersão e gotejamento. Universidade da Paraíba, Campina Grande, 3ª Edição. p. 45-50.
- HERNANDEZ, F. B. T. ; SUZUKI, M.A. ; FRIZZONE, J.A. ; TARSITANO, M.A.A. ; PEREIRA, G.T. ; CORRÊA, L.S .(1996). Função de resposta da figueira (Ficus carica L.) à aplicação de doses de nitrogênio e lâminas de água. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 16, p. 22-30.
- HINKLE, D., (1965). The change of personal constructs from the viewpoint of a theory of construct implications. Ph.D. Dissertation, Ohio State University.

- HORN, J., NAFPLIOTIOS, N. e GOLDBERG, D.E., (1994). A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization, Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence, 1, pp. 82–87.
- HOKKANEN, J., SALMINEN, P. (1994). “The Choice of a Solid Waste Management System By Using the ELECTRE III Decision-Aid Method”, In: Paruccini, M, Ed. Applying Multiple Criteria Aid for Decision to Environmental Management Kluwer Academic Publishers Dordrecht, Printed in the Netherlands. p. 111-153.
- JENSEN, M.E. 1969. Water consupcion by agricultural plants. p.1-22. In T.T. Koslowski. Water deficits and plantgrowth. Academic Press, New York. p. 200.
- KLAR, A. E. Critérios para escolha do método de irrigação. Irriga, Botucatu, v. 5, n. 1, p.52-82, 2000.
- KNOWLES, J.D., CORNE, D.W. (2000) Approximating the non-dominated front using the Pareto archived evolution strategy, Evolutionary Computation 8, pp. 149–172.
- LANNA, A. E. L., PEREIRA, J. S. 1996. Simulação da Cobrança pelo Uso da Água na Bacia do Rio dos Sinos. In: SIMPÓSIO ÍTALO-BRASILEIRO ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 3., 1996, Gramado. Anais. ABES/ANDIS.
- LOUCKS, D.P., STEDINGER, J.R. e HAITH, D.A (1981) "Water Resource Systems Planning and Analysis", Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, p.660.
- MANUAL TECNICO DAS CULTURAS, Tomo III Fruticultura (1997). Coordenadoria de Assistência Técnica Integral. Campinas. 2ªEdição.

- MARTINS, J. P.(2004) Água e cidadania em Campinas e região. O desafio do século 21. Campinas: Câmara Municipal de Campinas e Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S/A (SANASA). 116p.
- MEIER, R. W.; BARKDOLL, B. D. (2000). Sampling Design for Network Model Calibration Using Genetic Algorithms. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 126, n. 4, p. 245-250.
- MICHALEWICZ, Z.(1994) Genetic Algorithms+Data Structures=Evolution Programs, Springer-Verlag.
- MEIRELLES, F. (2000) “Impactos decorrentes nos principais usuários: Agricultura”. In: Thame, A. C. M. A (ed) Cobrança pelo uso da água, Capítulo 7, São Paulo, SP.
- MOUSSEAU, V., 1995. Eliciting information concerning the relative importance of criteria. In: Pardalos, Y., Siskos, C., Zopounidis, C. (Eds.), Advances in Multicriteria analysis. Kluwer Academic Publishers, p. 17-43.
- PARSONS, J. (2002). “Agland Decision Tool: A Multiobjective Decision Support System for Agricultural” International Environmental Modelling and Software Society Meeting. Disponível em: http://www.iemss.org/iemss2002/proceedings/pdf/volumetre/26_parsons2.pdf . Acessado em jan. 2004.
- PEREIRA, J. S. (1996). Análise de Critérios de Outorga e de Cobrança pelo Uso da Água na Bacia do Rio dos Sinos. Porto Alegre: UFRGS - Curso de Pós- Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 109f. Diss. Mestr. Engenharia Civil.
- RAJU, K.S. & KUMAR, D.N. (1999)“Multicriterion decision making in irrigation planning”. AGRICULTURAL SYSTEMS v. 62 , 2ª edição, p. 117-129.

- RAJU, K.S. & KUMAR, D.N. (2004), Irrigation Planning using Genetic Algorithms, Water Resources Management, 18(2), pp.163-176.
- RAJU, K.S, Pillai, C. R. S. (1999) . Multicriterion decision making in performance evaluation of an irrigation system. European Journal of Operational Research, 112(3),p.479-488.
- RIBEIRO, M. M. R., LANNA, A. E. L., PEREIRA, J. S. 1999. Elasticidade-Preço da Demanda e a Cobrança pelo Uso da Água. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 13., 1999, Belo Horizonte. Anais. ABRH
- ROY, B., PRESENT, M., SILHOL, D. (1986). A programming method for determining which Paris metro stations should be renovated. European Journal of Operational Research v.24, p.318-334.
- ROGERS, M., BRUEN, M. (1998). A new system for weighting environmental ELECTRE III criteria for use within. European Journal of Operational Research v.107, p. 552-563.
- SCHAFFER, J. D., (1984). "Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms," Ph.D. dissertation, Vanderbilt University.
- SEADE. Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados. População Residente e Taxas Anuais de Crescimento nas Regiões Administrativas, Regiões de Governo e Municípios,1996. IN: ANUÁRIO 1996. São Paulo, 1997.
- SILVA, J., SANTOS, H. (2001). "Tomada de decisão sob Critérios Múltiplos: Uma Aplicação ao Projeto de Irrigação do Jaíba. Apresentado ao XXXIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional Campos do Jordão.
- SIMOS, J. (1990). Evaluer L'Impact sur L'Environnement. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.

- SRINIVAS, N., DEB, K. (1994) Multiobjective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms, *Evolutionary Computation* 2, pp. 221–248.
- SZIDAROVSKY, F. GERSHON, M. DUCKSTEIN, L. (1986) *Techniques for Multiobjective Decision Making in Systems Management* volume 2, Elsevier Science Publishers B.V. Holanda.
- TESTEZLAF, R. MATSURA, E.E. CARDOSO, J.L.(2002) *Importância da irrigação no desenvolvimento do agronegócio*, Camara setorial de Equipamentos de Irrigação, ABIMAQ.
- TORNERO, M. T(1996). *Fotointerpretação da Cobertura Vegetal e da Rede de Drenagem da Bacia Experimental do Rio Pardo, no período de 15 anos*. Botucatu: UNESP, Faculdade de Ciências Agrônomicas, 1996. 129p. Dissertação de Mestrado.
- TUCCI, C. E.M.; HESPANHOL, I.; CORDEIRO NETTO, O. M. (2003) *Gestão da água no Brasil*. Brasília: Unesco.
- VELDHUIZEN, D. A. V. (1999), *Multiobjective Evolutionary Algorithms: Classifications, Analyses, and New Innovations*, PhD thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate School of Engineering, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, Ohio.
- VIEIRA, D. B. (1986). *Relação água, solo e planta* In: Telles, D. D. (ed). *Elaboração de projetos de irrigação*, capítulo 1, Brasília, Programa Nacional de Irrigação.
- WALSKI, T. M. (2001). The Wrong Paradigm-Why Water Distribution Optimization Doesn't Work. *Journal of Water Resources Planning ND Management*, v.122, N° 4, July, p.203-205.

- WARDLAW, R. SHARIF, M.(1999), "Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system operation", J. Water Resour. Plang. & Mgnt., American Society of Civil Engineers, 125(1), 25-33.
- ZADEH, L. A. (1965). Fuzzy sets, Information and Control 8: 338–353.
- ZITZLER, E., THIELE, L.(1999) Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 3. p.257-271.
- ZITZLER, E., THIELE, L., DEB, K. (2000). Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results. Evolutionary Computation,8. p. 173-195.
- ZITZLER, E., LAUMANN, M., THIELE, L.,(2001). SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. Technical Report 103, Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, Switzerland.
- ZUFFO, A. C. (1998).“Seleção e Aplicação de Método Computacional ao Planejamento Ambiental de Recursos Hídricos”. Tese de doutorado apresentada ao Depto de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo.
- ZUFFO, A. C., REIS, F. L. R., SANTOS, R. F. DOS E CHAUDHRY, F. H. (2002) – Aplicação de métodos multicriteriais ao planejamento de recursos hídricos. In: Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH, Vol. 7, no. 1, pp. 81/102.