OTIMIZAÇÃO DE UM PROJETO HIDROAGRÍCOLA, NO MUNICÍPIO DE
GUAÍRA (SP), UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO LINEAR

Engenheiro Agrícola

Orientador: PROF. DR. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE

Dissertação apresentada à Escola
Superior de Agricultura "Luiz de
Queiroz", da Universidade de São
Paulo, para obtenção do título
de Mestre em Irrigação e Drena-
gem.

P I R A C I C A B A
Estado de São Paulo - Brasil
Junho - 1990

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da
Divisão de Biblioteca e Documentação - PCAP/USP

Boza Arce, Roberto Adolfo

B793o Otimização de um projeto hidroagrícola, no município
de Guaíra (SP), utilizando programação linear. Piraci
caba, 1990.

76p.

Diss.(Mestre) - ESALQ

Bibliografia.

1. Agricultura - Produtividade - Programação linear
2. Irrigação - Projeto - Programação linear 3. Modelo
matemático I. Escola Superior de Agricultura Luiz de
Queiroz, Piracicaba

CDD 631.7

OTIMIZAÇÃO DE UM PROJETO HIDROAGRÍCOLA, NO MUNICÍPIO DE
GUAÍRA (SP), UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO LINEAR

ROBERTO ADOLFO BOZA ARCE

Aprovada em: 17.08.1990

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. José Antonio Frizzone	ESALQ/USP
Prof. Dr. Tarlei Arriel Botrel	ESALQ/USP
Prof. Dr. Fernando Curi Pères	ESALQ/USP

PROF. DR. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE

Orientador

À MINHA AVÓ RAFAELA (in memoriam)

OFEREÇO

À MINHA ESPOSA, MARIA ELSA,

pelo seu amor, compreensão e paciência;

ÀS MINHAS FILHAS, YARA e VALÉRIA,

que me fazem sentir a continuidade da vida e
abrandam-me o coração com seu olhares meigos e
carinhosos;

AOS MEUS PAIS E IRMÃS,

que com humildade sempre ofereceram o carinho
e o apoio necessários à jornada da minha vida;

A MEU PAÍS,

na esperança de paz e progresso.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. José Antonio Frizzzone, pela segura orientação neste trabalho, amizade e ensinamentos recebidos.
- Aos Professores Dr. Fernando Curi Péres e Dr. Tarlei Arriel Botrel pelas sugestões apresentadas.
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudo concedida.
- À Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP, que possibilitam a nossa participação no curso de Pós-Graduação.
- Agradeço a meus colegas de turma pela sua amizade e apoio, em especial a Antonio M. Saad, Francisco R. Consigleiro e Cláudio Tomazzela.
- Aos Professores do Departamento de Engenharia Rural pelos ensinamentos recebidos.
- Às secretárias e pessoal técnico do Departamento de Engenharia Rural pela sua amizade e colaboração.
- À bibliotecária Eliana Maria Garcia Sabino pela sua colaboração na revisão das referências bibliográficas deste trabalho.
- À todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram para que este trabalho pudesse ser realizado.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	vii.
LISTA DE QUADROS	viii.
RESUMO	x.
SUMMARY	xiii.
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações Gerais	1
1.2. Identificação do Problema	2
1.3. Objetivos	3
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. A Programação Linear	4
2.1.1. Considerações gerais	4
2.1.2. Origem e utilização da programação li- near	5
2.1.3. Aplicação da programação linear a ges- tão da empresa agrícola	8
2.1.4. Utilização da programação linear em projetos de irrigação	9
2.1.5. Programação linear e alocação de recur- sos	10
2.1.6. Programação linear e alocação de recur- sos no Brasil	16
3. MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1. Localização e Descrição da Propriedade Agrí- cola	22

	Página
3.2. Solos	24
3.3. Climatologia	26
3.3.1. Classificação climática	26
3.3.2. Precipitação pluviométrica	26
3.3.3. Temperatura do ar	27
3.3.4. Umidade relativa	28
3.3.5. Evaporação	28
3.3.6. Ventos	30
3.4. Recursos Hídricos	30
3.4.1. Recursos hídricos subterrâneos	30
3.4.2. Recursos hídricos superficiais	31
3.4.3. Barragens armazenadoras	34
3.5. O Sistema de Irrigação	36
3.5.1. Características dos sistemas de irrigação	36
3.5.2. Operação atual do sistema de irrigação.	36
3.6. Padrão de Culturas	37
3.7. Requerimentos de Irrigação	37
3.7.1. Precipitação	39
3.7.2. Evapotranspiração de referência	39
3.7.3. Coeficientes de culturas	40
3.7.4. Lâmina bruta de irrigação	40
3.8. Coeficientes Técnicos das Culturas	41
3.9. Instrumental Analítico	48

	Página
3.9.1. Modelo matemático da programação linear	48
3.9.2. Componentes do modelo de programação linear	49
3.9.3. Pressuposições da programação linear ..	50
3.9.4. Formulação do modelo básico	52
3.9.5. Solução do problema	55
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1. Padrão de Cultivos	57
4.2. Consumos de Água Estimado Pelo Modelo	59
4.3. Análise de Sensibilidade	59
4.3.1. Análise de sensibilidade da função objetivo	61
4.3.2. Análise de sensibilidade do recurso terra	63
4.3.3. Análise de sensibilidade do recurso água	64
4.3.4. Sugestões para novas pesquisas	67
5. CONCLUSÕES	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 Localização da Fazenda Lagoa do Fogão, Guaíra - São Paulo.	23
2 Regiões hidrológicas semelhantes.	33
3 Regiões hidrológicas quanto ao parâmetro C.	33
4 Barragens Armazenadoras	35

LISTA DE QUADROS

Quadro		Página
1	Características físicas do solo.	25
2	Capacidade de campo, ponto de murcha permanente e capacidade de água disponível do solo da Fazenda Lagoa do Fogão.	25
3	Precipitação média da região de Guaíra.	27
4	Temperatura média mensal, da região de Guaíra. .	28
5	Umidade relativa da região de Guaíra.	29
6	Evaporação do tanque classe "A" da região de Guaíra	30
7	Velocidade média dos ventos na região de Guaíra.	29
8	Padrão de culturas.	37
9	Dados climatológicos para realizar o balanço hídrico (ciclo de inverno).	38
10	Coeficientes das culturas.	40
11	Lâminas brutas de irrigação.	42
12	Custos de produção do tomate.	43
13	Custos de produção do trigo.	44
14	Custos de produção da batata.	45

Quadro	Página
15 Custos de produção da ervilha.	46
16 Custos de produção do feijão.	47
17 Receita líquida das culturas em BTNf.	48
18 Distribuição de culturas por pivô.	58
19 Consumo de água sob o pivô 1 (em decímetroxhec- tare) estimado pelo modelo.	60
20 Consumo de água sob o pivô 2 (em decímetroxhec- tare) estimado pelo modelo.	61
21 Análise de sensibilidade da função objetivo. ...	63
22 Análise de sensibilidade do recurso terra.	63
23 Análise de sensibilidade do recurso água no pivô 1.	65
24 Análise de sensibilidade do recurso água no pivô 2.	67

OTIMIZAÇÃO DE UM PROJETO HIDROAGRÍCOLA, NO MUNICÍPIO DE
GUAÍRA (SP), UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO LINEAR

Autor: ROBERTO ADOLFO BOZA ARCE

Orientador: PROF. DR. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE

RESUMO

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de desenvolver um modelo de programação linear para quantificar as variáveis ou atividades do processo de produção que otimizam a operação do projeto de irrigação, de forma a maximizar o lucro da propriedade agrícola. O modelo procura representar o sistema de produção da Fazenda Lagoa do Fogão, propriedade da família Sakai, localizada no município de Guaíra (SP), com um total de 207 ha irrigados por três sistemas de irrigação do tipo pivô-central.

A função objetivo consistiu em maximizar a receita líquida da propriedade, utilizando as culturas de inverno tradicionalmente cultivadas nesta propriedade, sob regime de irrigação, a saber: tomate industrial, trigo, batata, ervilha e feijão. As restrições à função objetivo foram de terra, água e de mercado, para o tomate industrial. O modelo consistiu de 86 restrições e 95 variáveis.

Os resultados obtidos, em função da metodologia empregada e das análises efetuada, permitiram as seguintes conclusões:

- a) Na área sob o pivô 1, devem ser cultivados 33 ha de tomate e 61 ha de feijão. Na área sob o pivô 2, devem ser cultivados 64 ha de feijão, sendo que sob esse pivô, ficarão ociosos 2 ha de terra por falta de água disponível. No pivô 3 não se deverá cultivar com irrigação, pois não há disponibilidade de água.
- b) Para irrigação da área sob o pivô 1, foram consumidos 73 dmxha de água (73000 m^3), havendo uma sobra de água, em relação à disponibilidade total, igual a 10 dmxha (10000 m^3). Na área sob o pivô 2, foram consumidos 125 dmxha (125000 m^3), correspondentes ao volume total disponível.
- c) A combinação ótima de culturas nas áreas irrigadas, para o volume de água disponível, sempre foi feijão e tomate, devido aos seus valores de receita marginal. Na área sob o pivô 1, no caso do feijão, a receita marginal poderá variar entre os limites de 2234 e 2407 BTNf, sem alterar a solução ótima. Para a cultura do tomate, a receita marginal poderá variar entre os limites de 4423 e 4575 BTNf. Na área sob o pivô 2, o valor mínimo da receita marginal para o feijão foi de

2269 BTNf. Nesta área, só deverá plantar tomate se for liberada a restrição de mercado.

- d) Na área sob o pivô 3 não se praticará agricultura irrigada, uma vez que não há água disponível.
- e) A área cultivada sob regime de irrigação no pivô 1 é de 94 ha, podendo variar de 88 a 100 ha sem alterar a solução ótima. Para aumentar a área irrigada além dos 94 ha até o limite de 100 ha, pode-se pagar um máximo de 2269 BTNf por cada hectare à mais.
- f) Na área sob o pivô 2, permitiu-se cultivar 64 ha de feijão, consumindo-se toda a água disponível, isto é, 125 dmxha. Para valores maiores de utilização de água, pode-se pagar no máximo 1151,78 BTNf por 1 dmxha (1000 m³) utilizado a mais. Para o pivô 1, houve folga de água e a área disponível de 94 ha foi toda ocupada.

THE OPTIMIZATION OF A HYDRO-AGRICULTURAL PROJECT IN THE
GUAÍRA COUNTY (SP), USING LINEAR PROGRAMMING

Author: ROBERTO ADOLFO BOZA ARCE

Adviser: PROF. DR. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE

SUMMARY

This work was carried out aiming the development of a linear programming model, in order to quantify the process variables or activities for the production which optimizes the irrigation project operation aiming the profit in the agricultural property. The model envisages representing the farm production in "Lagoa do Fogão", owned by the Sakai family in the Guaíra (SP) county, of which 207 ha are irrigated by three center pivot systems.

The objective function consisted in maximizing the net income for the property. Growing winter crops usually cultivated under irrigation in this property, are: industrial tomatoes, wheat, potatoes, peas and beans. The restrictions to the objective function were area, water and markets for the industrial tomato. The model consisted of 86 restrictions and 95 variables.

The following was concluded:

- a) In the area under pivot one, 33 ha of tomatoes should be cultivated, plus 61 ha of beans. In the area under pivot 2, 64 ha of beans should be cultivated, but under this pivot an area of 2 ha will stay idle for lack of water. Under pivot 3 there will no be cultivation with irrigation due to lack of water.
- b) In order to irrigate the area under pivot 1, 73 dm³/ha of water (73.000 m³) were used. 10.000 m³ or 10 dm³/ha of water remained unused from the total availability. In the area under pivot 2, 125 dm³/ha (1125.000 m³) were used, or the total water available.
- c) The optimal combination in irrigated areas crops according to the available water, was always beans and tomatoes, due to their marginal income. In the case of beans, in the area under pivot 1, the marginal income may vary between 2.234 and 2.407 BTNf without affecting the optimal solution. For the tomato crop, the marginal income may vary between the limits of 4.423 and 4.575 BTNf. In the area under pivot 2, the minimum value of the marginal income for beans was 2.269 BTNf. In this area tomatoes will be grown only when the market restrictions would allow.
- d) In the area under pivot 3, there will not be any irrigated crop, because there is no water.

- e) The area cultivated with irrigation under pivot 1 has 94 ha, although it may vary from 88 to 100 ha without affecting the optimal solution. In order to increase the irrigated area beyond the 94 ha, a maximum of 2.269 BTNf for each extra hectare, may be paid.
- f) In the area under pivot 2, it was possible to grow 64 ha of beans, using all the available water, that is 125 dm³/ha. For higher water amount uses, the maximum expenditure may come to 1151,78 BTNf for each 1 dm³/ha (1,000 m³) extra used. For the pivot 1, there was more than enough water and the available area of 94 ha was completely occupied.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Gerais

Um dos principais problemas que ocorre nos países em desenvolvimento é a baixa eficiência com que são utilizados os recursos disponíveis, pois a utilização que se faz deles afasta-se muito daquela que pode oferecer os melhores resultados possíveis.

No âmbito da economia agrícola, uma produção eficiente e rentável deve constituir um dos principais objetivos econômicos da sociedade. Para esse fim, os fatores de produção devem ser utilizados racionalmente no processo social de produção, de tal maneira que sejam obtidos os mais altos níveis de produtividade econômica.

O agricultor, ao procurar otimizar a sua decisão, deve escolher, dentre as alternativas de produção disponíveis, a mais eficiente na utilização dos recursos produtivos e a que satisfaz a certos objetivos preestabelecido. Em situações onde a tomada de decisão está relacionada com a alocação de recursos limitados, esta alocação é função da decisão e da racionalidade do agricultor que depende, por sua vez, de métodos eficientes que o auxiliem na otimização da sua decisão. Para resolver estes tipos de problemas

decisórios, o modelo matemático mais comumente empregado é a programação linear.

De forma geral os problemas de programação linear tratam de quantificar de forma otimizada os recursos limitados, para satisfazer os objetivos propostos, ou seja a programação linear trata de situações onde os recursos disponíveis devem ser combinados de tal forma que se maximizem os lucros ou minimizem os custos.

1.2. Identificação do Problema

O Município de Guaria atualmente desenvolve uma agricultura irrigada, baseada na utilização de sistemas de irrigação do tipo pivô-central, contando com mais de 15000 ha irrigados. Parte desse desenvolvimento foi possibilitado pela disponibilidade de recursos hídricos, representada pela contribuição das bacias dos rios Pardo e Sapucaí, e pelas condições edáficas e topográficas favoráveis.

Contudo, apesar de ocupar essa posição privilegiada, a prática da irrigação tem sido dificultada pela falta de planejamento na implantação desses sistemas de irrigação, proporcionando escassez do recurso hídrico, ou dificuldades na captação de água devido a inadequada localização dos sistemas de irrigação. Isto ocorre principalmente aos usuários que possuem suas estações de bombeamento localizadas nos afluentes das bacias de drenagem citadas. É comum nesta região, a ocorrência de sistemas de irrigação

ociosos, por terem sido adquiridos sem um prévio conhecimento da disponibilidade real de água ou da capacidade máxima de armazenamento de água na propriedade.

Neste contexto global, encontra-se a propriedade agrícola Lagoa do Fogão, que possui três sistemas de irrigação do tipo pivô-central, abastecidos por um sistema de barragens armazenadoras de água, cuja capacidade de armazenamento é menor que o volume requerido pelos três pivôs-centrais, no período de máxima demanda hídrica. Conhecendo-se a natureza do problema dessa propriedade, torna-se necessário adotar medidas que possibilitem o planejamento do uso da água, auxiliando o agricultor na tomada de decisão, tendo com objetivo a maximização do lucro, dadas as restrições existentes.

1.3. Objetivos

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo de programação linear para quantificar as variáveis ou atividades do processo de produção que otimizam a operação do projeto de irrigação, de forma a maximizar o lucro da propriedade agrícola. O modelo procura representar o sistema de produção da fazenda Lagoa do Fogão, propriedade da família Sakai, localizada no município de Guaiara, Estado de São Paulo, com um total de 207 ha. irrigados por três sistemas de irrigação do tipo pivô central, focalizando a atividade agrícola no período de inverno, quando ocorre restrição de água quanto ao volume disponível.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A Programação Linear

2.1.1. Considerações gerais

O administrador frequentemente se defronta com decisões de alocação. Os métodos de análise usados para resolver os problemas de alocação podem ser variados. Por exemplo, as decisões baseadas no julgamento e na intuição podem ser satisfatórias quando o número de fatores do problema é limitado e a suas relações são claras (ESTACIO, 1975). Em situações onde o número de fatores são muitos, faz-se necessário a utilização de modelos matemáticos, os quais nos permitem representar alternativas propostas de solução ou simular condições reais que poderiam ocorrer. Para STOCKTON (1968), a programação linear é apropriada para os problemas complexos de alocação que não podem ser resolvidos satisfatoriamente com as técnicas analíticas convencionais.

A programação linear e suas extensões são métodos matemáticos que se vêm desenvolvendo e aperfeiçoando nos últimos anos. Procura, entre outros objetivos, resolver o problema fundamental da economia de alocação ótima de re-

curso, visando a encontrar a melhor distribuição de acordo com determinado objetivo e dos meios de produção disponíveis em quantidades limitadas pelas várias formas possíveis de sua utilização (NEVES *et alii*, 1984).

2.1.2. Origem e utilização da programação linear

A programação linear é um método matemático frequentemente útil em situações de tomada de decisão onde se requer a escolha de uma única alternativa dentre diversas. Ela foi utilizada inicialmente com fins militares durante a segunda guerra mundial, por George B. Dantzig, Marshall Wodd e seus colaboradores do US Department of the Air force os quais formaram o grupo chamado SCOP (Scientific Computation of Optimal Programs).

Dantzig formulou o problema de programação linear geral e idealizou o Método Simplex para solucionar os problemas de programação linear em 1947. Seu trabalho não foi acessível até 1951, quando o método de programação linear foi publicado no Cowles Commission Monograph N° 13 (CHADLEY, 1982).

Depois de 1951, o método tornou-se mais refinado e tem sido usado como instrumento de pesquisa na otimização de recursos e empreendimentos rurais, para sugerir ajustamentos desejáveis visando a maximização do lucro na produção de produtos agropecuários ou minimização de custos no processamento de produtos. De fato, a sua aplicação se

estende a qualquer tipo de problema que permita a definição de um objetivo em termos quantitativos (SIMONARD, 1966).

Segundo SOUZA (1965), os estudos de programação linear são muito importantes uma vez que fornecem informações ao administrador e possibilitam a orientação na escolha e combinação de explorações, indicando o uso eficiente de recursos para obtenção do maior lucro, e são úteis às instituições que prestam assistência técnica ao produtor rural, no estabelecimento de seus planos e programas de trabalho. Para BARROS (1968), ela é um dos instrumentos de grande utilidade na pesquisa operacional, entendendo-se por esta o estudo de problemas e técnicas orientadas no sentido de basear cientificamente a tomada de decisões.

BARROCAS (1968), define programação linear como um método matemático que melhor permite selecionar entre um conjunto de atividades viáveis, as que entre si combinadas em certas proporções asseguram o máximo resultado líquido compatível com dadas disponibilidade de recursos fixos. De acordo com MAINIÉ (1969), a aceleração do progresso das técnicas agropecuárias fazem cada vez mais complexas as decisões dos agricultores, já que unicamente o bom senso não é suficiente hoje em dia, para aclarar todos os aspectos de gestão agrícola. Neste domínio as técnicas de programação linear proporcionam bons serviços. Conforme salientam HEADY & CANDLER (1969), a programação linear tem sido usada como ferramenta para especificar a organização ótima dos recursos e das atividades nas fazendas e para sugerir ajustamentos

necessários de forma a maximizar os lucros, no que concerne à tomada de decisão.

A programação linear é utilizada em numerosos campos e todos relacionados com problemas de eleição. Ela define o emprego ótimo de recursos escassos ou a combinação ótima de atividades quando os recursos existem em quantidades limitadas (MAINIÉ, 1969). Para HARDAKER (1975), a programação linear constitui um método eficiente no planejamento de explorações e produz resultados práticos. Ela é muito utilizada para planejamento em diversos países tais como: Inglaterra, Espanha, México, Alemanha etc, através de agências de assessoria agropecuária.

De acordo com PIZYSIENIG (1987), os modelos de programação linear permitem cumprir algumas das exigências da abordagem de sistemas, como a consideração de um grande número de fatores e, ao mesmo tempo, um grande número de atividades produtivas disputando esses fatores. De maneira geral a programação linear é um ramo de uma ampla área da programação matemática que lida com o desenvolvimento de regras e relações que visam a distribuição de recursos escassos sob restrições impostas por aspectos tecnológicos ou práticos quando deve ser tomada uma decisão de atribuição (KOKIE, 1970). Mais especificamente, trata de situações onde os fatores de produção disponíveis devem ser combinados na produção, de tal forma a maximizar o lucro ou minimizar o custo (HILLIER & LIEBERMAN, 1988).

2.1.3. Aplicação da programação linear a gestão da empresa agrícola

O ambiente em que se enquadram os problemas de gestão da empresa agrícola está sujeito a condicionalismos particulares, resultantes das características específicas da atividade agrícola e das que são próprias do setor no âmbito do qual se inserem as unidades de produção agropecuária. De acordo com HEADY (1971), esse ambiente, pelo menos no que se refere à aplicação dos métodos de gestão mais elaborados, apresenta muitas características de homogeneidade, isto é, que se mantêm independentemente do sistema segundo o qual, nos diferentes países se encontra organizado o setor agrícola, e que se acentuam na medida em que tais métodos se vão tornando mais sistemáticos e mais lógicos, de acordo com os objetivos a atingir pelas diversas agriculturas.

A homogeneidade a que se refere HEADY (1971) resulta fundamentalmente dos seguintes aspectos:

- a) Toda empresa agrícola dispõe de certos fatores de produção em quantidades limitadas, além disso, sujeita a restrições de ordem institucional ou de natureza subjetiva, o que condiciona a escolha do plano ótimo tecnicamente possível que nela poderia ser seguido.
- b) Relativamente a qualquer empresa agrícola, pode definir-se um objetivo a atingir, traduzível em termos de uma função económica a maximizar, o que deve ser con-

seguido respeitando os condicionalismos anteriormente referidos.

- c) Em qualquer empresa agrícola podem ser praticadas diferentes atividades, para efeitos práticos de gestão suposto em número finito, e até a maioria das vezes restrito, as quais são concorrentes entre si no que respeita à utilização dos fatores de produção.
- d) É sempre possível definir critérios capazes de permitir avaliar e exprimir a contribuição dada por cada uma das atividades anteriormente referidas para o objetivo que a empresa agrícola pretende atingir.

Devido a essa homogeneidade das empresas agrícolas ESTACIO (1975), afirma que não pode deixar de aceitar a utilidade de modelos de programação linear na gestão das empresas agrícolas, já que estes permitem selecionar o ponto do espaço de soluções viáveis no qual uma função econômica previamente definida, atinge seu valor ótimo.

2.1.4. Utilização da programação linear em projetos de irrigação

Para BALTRA (1982), os modelos de programação linear nos projetos de irrigação podem ser utilizados nos seguintes tipos de planeamento agronómico:

A) Otimização de planos de culturas, para otimização dos recursos, podendo-se utilizar como função econômica:

- a) Maximização do lucro;
- b) Otimização do uso da mão-de-obra;
- c) Otimização do uso da água; e
- d) Otimização do uso das máquinas agrícolas.

O modelo usa as restrições:

- a) Volume de água disponível;
- b) Demanda de água pelas culturas;
- c) Custos de produção;
- d) Terra disponível;
- e) Receita líquida; e
- f) Custos de mercado.

B) Lâminas e intervalos de irrigação.

C) Previsão de colheitas.

D) Transporte de grãos.

E) Potencial de recursos pedológicos.

F) Potencial de bacias de captação e balanços hidrológicos.

G) Previsões meteorológicas.

2.1.5. Programação linear e alocação de recursos

Para PALACIOS (1977), a distribuição irregular dos recursos hídricos e a escassez de capital, fazem necessário para planejamento, a utilização de técnicas de programação matemática as quais permitem aumentar a lucratividade nas áreas irrigadas.

Em Lalamilo, Havai, HUANG *et alli* (1975), desenvolveram um modelo de programação linear para o uso ótimo da água num sistema de barragem armazenadoras. O modelo mostrou que o uso eficiente da água e o incremento da produção podem ser obtidos através de mudanças nas datas de semeadura das diferentes culturas envolvidas no projeto, com o objetivo de evitar que as demandas máximas de água das culturas coincidam num mesmo período.

VAN DEMAN *et alli* (1976), determinaram na cidade de Beaufort, Carolina do Norte, através da programação linear, a combinação de culturas, solos e políticas de irrigação que maximizava a receita líquida, tendo como restrições a água, terra e níveis de culturas. VALENCIA (1975), propôs um modelo de programação linear para planejamento da operação do distrito de irrigação de São Domingo, Baixa California. Este distrito de irrigação de 17000 ha. apresentava uma exploração maior que a recarga natural do aquífero. A principal restrição do modelo foi quanto ao volume de água disponível. O modelo mostrou um plano ótimo de culturas, o qual não afetava a receita líquida e reduzia o volume de extração do aquífero. O mesmo autor afirma que modelos similares existem para mais de 80% dos distritos de irrigação do Mexico, abrangendo uma área de 3.600.000 ha.

ACOSTA (1977), propôs um modelo de programação linear para simular as regras de operação de uma barragem armazenadora, o método, consistiu no seguinte:

- a) Determinar a localização da barragem armazenadora;
- b) Compilar as informações físicas da bacia (curva, elevação, áreas, capacidade);
- c) Compilar dados de volumes de escoamento, chuva e evaporação;
- d) Estabelecer o plano de culturas da região;
- e) Calcular o volume de demanda;
- f) Calcular o volume morto da barragem;
- g) Calcular o volume total de armazenamento (volume útil mais volume morto);
- h) Resolver a equação de conservação de massa seguinte:

$$\text{Entradas} - \text{Saídas} = \frac{ds}{dt} \quad [11]$$

que resulta por incrementos finitos em:

$$S_{i+1} = S_i + EN_{i+1} - EV_{i+1} - DM_{i+1} \quad [12]$$

tendo como restrições:

$$SM \leq S_{i+1} \leq SC \quad [13]$$

onde:

- S_{i+1} = Armazenamento ao final do mês;
- S_i = Armazenamento ao início do mês;
- EN_{i+1} = Entradas totais à bacia no mês (i+1);
- EV_{i+1} = Volume de perdas por evaporação no mês (i+1);
- DM_{i+1} = Volume de demanda no mês (i+1);
- SM = Volume morto da barragem; e
- SC = Volume total de armazenamento.

PALACIOS (1977), utilizou a programação linear para obter dentre dez culturas o padrão ótimo de exploração, com o objetivo de determinar a demanda de água do Distrito de Irrigação do rio Mayo (Sonora, México). O modelo foi o seguinte:

$$(MAX) RL = \sum_{i=1}^{10} (RB_i - CP_i) X_i \quad [14]$$

Sujeito A:

$$\sum_{i=1}^m X_i \leq A_T \quad [15]$$

$$\sum_{i=1}^n X_i \leq A_T \quad [16]$$

$$\sum_{i=1}^{10} a_{ij} X_i \leq CMC \quad (j = 1, 2, 3, \dots, 12) \quad [17]$$

$$\sum_{j=1}^{12} \sum_{i=1}^{10} a_{ij} X_i \leq Va \quad [18]$$

$$\sum_{i=1}^{10} L_{ki} X_i = J_k, \quad (k = 1, 2, \dots, 4) \quad [19]$$

$$\sum_{i=1}^4 J_k = Ra \quad [110]$$

$$J_1 + J_2 \geq 0.8 Ra/2$$

$$J_3 + J_4 \geq 0.8 Ra/2$$

$$J_1 + J_2 \leq 1.2 Ra/2$$

$$J_3 + J_4 \leq 1.2 Ra/2 \quad [111]$$

$$X_i \leq R_i, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 10) \quad [112]$$

onde:

RL = Receita líquida;

i = Tipo de cultura considerada, para o caso

$i = 1, 2, \dots, 10;$

RB_i = Receita bruta por unidade de área da cultura i ;

CP_i = Custo de produção da cultura i ;

X_i = Área da cultura i , em ha;

A_T = Área total disponível para irrigação da cultura i
em ha;

a_{ij} = Coeficientes brutos de necessidades de irrigação no
mês j , $j = 1, 2, \dots, 12$ em cm;

CMC = Volume máximo de condução dos canais principais de
irrigação, em m^3 ;

Va = volume anual de água disponível, em m^3 ;

n = quantidade de culturas de inverno e perenes;

m = quantidade de culturas de primavera-verão e perenes;

L_{ki} = requerimento estacional de mão-de-obra por ha, para
a cultura i na estação k , $k = 1, 2, \dots, 4$, em jor-
nadas/ha;

J_k = quantidade de jornadas na estação k ;

Ra = requerimento anual de mão-de-obra, em jornadas/ha; e

R_i = restrição na produção da cultura i , expressa em
unidades de área.

GALINDO (1976), utilizou a programação linear para obter um plano ótimo de culturas no distrito de irrigação N° 35, rio La Antigua, (Veracruz, Mexico), no qual

por causa da oferta de emprego a maioria das terras eram dedicadas ao cultivo da cana de açúcar.

KHUMAR & KHEPAR (1980), utilizaram a programação linear, para simular diferentes níveis de utilização da água, em combinação com 7 culturas, com o objetivo de racionalizar o uso do recurso hídrico. Para tal o seguinte modelo de programação linear foi proposto.

$$\text{MAX } Z = \sum P_i X_i Y_i - \sum X_i C_i \quad [13]$$

tendo como restrições:

$$\sum W_i X_i \leq w \quad [14]$$

$$\sum X_i \leq S \quad [15]$$

onde:

- i = Tipo de cultura em estudo;
- P = Preço por unidade de produção;
- X_i = Área cultivada;
- Y = Produtividade da cultura;
- C = Custo de produção;
- W = Requerimento de irrigação;
- w = Água disponível;
- S = Restrição de área da cultura i.
- Z = Receita líquida

BENAMI & OFEN (1984) apresetam um modelo de programação linear, para dimensionar economicamente tubulações em sistemas de irrigação pressurizados. Este modelo de mínimo custo é expresso matematicamente e definido como:

$$\text{MINIMIZAR } C = \sum_{j=1}^n C_{ij} \cdot X_{ij} \quad [16]$$

onde:

C_{ij} = É o custo por unidade de comprimento de tubulação com diâmetro D_{ij} ; e

X_{ij} = Comprimento da tubulação de diferentes diâmetros.

Sujeitos às restrições:

$$Hu_i = hu_i + Z_i + h_k \quad [17]$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = L_i \quad [18]$$

$$X_{ij} \geq 0 \quad \text{restrição de não negatividade} \quad [19]$$

onde:

Hu_i = Pressão total na entrada da linha lateral;

hu_i = Pressão de serviço requerida na linha lateral;

Z_i = Desnível topográfico; e

h_k = Perda de carga na linha lateral;

L_i = Comprimento total da tubulação.

2.1.6. Programação linear e alocação de recursos no BRASIL

CRISTANCHO (1965), procurou obter o máximo lucro para uma empresa agrícola, estudando o comportamento da programação linear quando aplicada a empresas agrícolas nacionais.

RASK (1965), investigou o efeito do tamanho da propriedade sobre a renda, com a finalidade de esboçar linhas mestres para estabelecer o tamanho de propriedade nos programas de reforma agrária e mostrar os passos de um ajustamento para propriedades pequenas ou minifúndios de Santa Cruz do Sul, no Rio Grande do Sul. PELLEGRINI (1968), determinou a organização ideal para 12 estabelecimentos rurais de diferentes tipos e tamanhos considerados representativos de outros para 3 regiões do estado de São Paulo: Orlândia, São Joaquim da Barra e Sales de Oliveira no ano agrícola 1966/67. SUGAI (1967), utilizou a programação linear, com o objetivo de selecionar os empreendimentos mais lucrativos, estimar os níveis de uso econômico de recursos mais recomendados e o nível de lucro máximo da empresa, em cada empreendimento agropecuário do sítio do Depto. de Economia Rural da Universidade Federal de Viçosa.

CHAVES (1970), elaborou um modelo de programação linear aplicável a um projeto de secagem de grãos. A tomada de decisão relacionava-se com os tamanhos ótimos de lotes de grãos úmidos com os níveis de estoque na fase de pré-secamento e com a capacidade do secador. CHAVES *et alli* (1970), determinaram uma razão de custo mínimo para frangos, baseando-se na relação dos alimentos disponíveis e respectivos custos, composição dos alimentos e limitações de natureza nutricional, em Viçosa, Minas Gerais.

MARTINS (1971), usando a programação linear, estudou a viabilidade econômica da produção de bovinos de

corte em empresas rurais da zona da mata de Minas Gerais, relacionando-a com outras atividades como a fruticultura, pecuária leiteira, reflorestamento, arroz, milho e feijão.

MUNOZ (1971), usou a programação linear para analisar as empresas rurais no noroeste de Minas Gerais, com vista à indicação de processos tecnológicos e a combinação de exploração que promovessem o mais alto retorno aos recursos existentes. O trabalho consistiu basicamente, em formular um modelo que maximizasse a renda líquida dos médios produtores com a tecnologia existente na região e com a tecnologia recomendada. No Estado de São Paulo, NEVES (1972) estudou através da programação linear a alocação de recursos e combinação de atividades em empresas leiteiras na região de Lins.

BARBOZA (1972), procurando identificar combinações de explorações que aumentariam a rentabilidade das pequenas empresas agropecuárias de Viçosa, M.G. usou a programação linear. As atividades produtivas consideradas foram: arroz, milho, feijão, alho, banana, laranja, café, reflorestamento, bovinos, suínos e aves. A análise foi baseada em critérios de utilização da tecnologia atual e da recomendada.

FERREIRA (1971), utilizou a programação linear para determinar a viabilidade da introdução da fruticultura na zona de mata de Minas Gerais. O modelo mostrou que a fruticultura é uma atividade capaz de promover a renda regional e de proporcionar maiores possibilidades de

absorção de mão-de-obra. Ainda, em Minas Gerais, MAGALHÃES (1971), estudou o grau de competição e as possibilidades econômicas da atividade leiteira em relação ao arroz, milho, feijão, laranja, café e floresta, levando em consideração o tamanho da empresa e níveis de tecnologia em diferentes sub-regiões da zona da mata.

PRAZERES (1976), identificou por meio da programação linear a combinação de explorações que maximizava a renda das empresas na região de Imperatriz no Maranhão. REIS (1980), desenvolveu um trabalho utilizando programação linear, na área de Bebedouro (Petrolina), tendo como objetivo obter planos ótimos de cultivos, a nível parcelar, capaz de permitir a melhor combinação de exploração com maior eficiência operacional e máxima rentabilidade econômica para os parceleiros vinculados no projeto. AUTRAN (1980), fez o planejamento agropecuário do perímetro irrigado de Morada Nova, Ceará, através da programação linear. Dentre os resultados alcançados evidencia-se o uso mais racional dos fatores de produção terra, água e mão-de-obra, quando se compara a organização atual com a organização ótima obtida com o modelo.

EIGER & SAKS (1980), fizeram com ajuda da programação linear um modelo para dimensionamento de canais não revestidos com um mínimo volume de escavação. O modelo provou ser possível a existência de um volume mínimo de escavação constante, dentro de uma faixa de profundidades variáveis. Consequentemente a profundidade do canal pode ser

adotada, em função de condições de custo mínimo, sendo consideradas como restrições geométricas, o comprimento mínimo e profundidade máxima.

Os modelos até aqui apresentados, demonstram a ampla utilização da programação linear. Entretanto, a formulação destes modelos de programação linear determinísticos implica, para os coeficientes aleatórios, em uma estimativa de seus valores. Considerando que as empresas agrícolas atuam sob condições de risco, a utilização destes modelos determinísticos, para fins de planejamento, torna-se relativamente limitada. Isto implica na necessidade de não se desprezar, na maioria das vezes, a aleatoriedade de determinados coeficientes.

DILLON (1976) destaca a importância de se utilizarem modelos probabilísticos e recomenda que os modeladores evitem as abordagens determinísticas usuais de incluir todas as variáveis estocásticas em seu nível mediano, ou modal. Pelo menos as mais influentes entre essas variáveis devem ser representadas por suas distribuições de probabilidade e por valores obtidos por amostragens.

Atualmente, para contornar o problema de incorporação do risco na atividade agrícola, faz-se utilização de modelos que se prestam a comparações isoladas (individuais) de ações alternativas e de modelos que abrangem a propriedade rural como um todo. Dentre estes modelos de programação matemática destacam-se (CRUZ, 1984):

- a) o princípio de Bernoulli, o qual incorpora o risco em sua teoria de decisão a respeito de eventos incertos;
- b) o modelo Média-Variância, desenvolvido por Markowitz, Fobin e Feldstein, que presume a escolha da alternativa que apresente menor variância para uma mesma média, ou a alternativa com maior média para um igual nível de variância;
- c) o modelo de dominância estocástica, que utiliza regras de dominância estocástica para levar em conta toda a distribuição cumulativa de probabilidades dos retornos, ao invés de simplesmente a média e a variância;
- d) o método de HANOCH & LEVY (1970), que baseado nos axiomas de Bernoulli e no teorema da utilidade esperada, adicionaram a hipótese de que a função de distribuição de probabilidade dos recursos é simétrica; sob estas condições, este critério é um caso especial das regras de dominância estocástica que não pressupõem simetria e nem qualquer forma específica da função de utilidade;
- e) minimização dos desvios absolutos da margem bruta, proposto por HAZELL (1971), que permite o tomador de decisões restringir sua escolha a um conjunto de planos cuja característica é apresentar níveis diferentes de receita bruta esperada com o mínimo de desvio absoluto com relação à média.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização e Descrição da Propriedade Agrícola

A Fazenda Lagoa do Fogão se encontra localizada no município de Guaíra, a 460 km de São Paulo, com as seguintes coordenadas geográficas 20°22'S, 20°14'S e 48°18'W, 48°16'W, com uma altitude de 530 m. A propriedade dista 4,8 km do centro urbano do município, na direção noroeste, na estrada vicinal que liga Guaíra do Guaritá (Figura 1).

A Fazenda Lagoa do Fogão encontra-se totalmente em produção, e está assim sub-dividida:

Área de agricultura de sequeiro	= 331,5 ha.
Área de agricultura irrigada	= 207,0 ha.
Área de pastagem	= 35,0 ha.
Área de mata (preservação)	= 30,3 ha.
Área de várzea	= 55,6 ha.
Área de reservatórios	= 32,0 ha.
Área inaproveitável	= 3,3 ha.
Área total	= 694,7 ha.

No tocante a estratificação das propriedades agrícolas do município, a Fazenda Lagoa do Fogão, representa o estrato de área entre 500 e 1000 ha, correspondendo a 5,6% do total de estabelecimentos agrícolas.

Figura 1- Localização da Fazenda Lagoa do Fogão, Guaira São Paulo.

3.2. Solos

De acordo com o trabalho realizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT, 1987), os solos da propriedade apresentam as seguintes características: a área é relativamente plana, com uma declividade média inferior a 2%, com uma cobertura pedológica constituída de Latossolo Roxo muito argiloso e uniforme; o solo é bastante homogêneo, de cor predominante vermelha, 2,5 yr 3/4 na tabela de Munsell.

Os resultados da análise granulométrica, densidade das partículas e densidade global dos solos em referência, estão apresentados no Quadro 1.

Os valores da capacidade de campo, ponto de murcha permanente e capacidade de água disponível, do solo da propriedade são apresentados no Quadro 2.

Quadro 1 - Características físicas do solo.

AREIA GROSSA (2,0 a 0,5 mm)			AREIA MÉDIA E FINA (0,5 a 0,05 mm)		
0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm
10,2%	9,4%	6,3%	20,6%	9,4%	13,7%

AREIA TOTAL (2,0 a 0,05 mm)			SILTE (0,05 a 0,002 mm)		
0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm
30,8%	18,8%	20,0%	31,5%	27,3%	24,9%

ARGILA (0,002 mm)		
0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm
37,9%	53,9%	54,1%

DENSIDADE DAS PARTÍCULAS (g/cm ³)			DENSIDADE DO SOLO (g/cm ³)		
0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm
2,96%	2,94%	3,0%	1,22%	1,13%	1,03%

Fonte: SAAD *et alii* (1988).

Quadro 2 - Capacidade de campo, ponto de murcha permanente e capacidade de água disponível do solo da fazenda Lagoa do fogão

PROFUNDIDADE (cm)	θ_{cc} (%)	θ_{pmp} (%)	CAD (mm/cm)
0 - 20	39,4	26,8	1,26
20 - 40	37,1	27,5	0,96
40 - 60	35,4	25,3	1,01

Fonte: SAAD *et alii* (1988).

A velocidade de infiltração básica do solo da propriedade é da ordem de 69,6 mm/h, classificada como muito alta, pelo U.S.D.A. (1964).

3.3. Climatologia

3.3.1. Classificação climática

De acordo com a classificação climática baseada no método de Thornthwaite, a região de Guaíra possui o seguinte tipo climático: clima do tipo C, (mesotérmico), representado pelos tipos Cwa e Cwb (tropicais de altitude, com chuvas de verão e inverno seco).

3.3.2. Precipitação Pluviométrica

Considerando a quantidade de informações (Número de anos de registros) e a representatividade dos postos pluviométricos da região, foram selecionados os seguintes postos para obtenção da precipitação média da região.

POSTO PLUVIOMÉTRICO PREFIXO	ENTIDADE	MUNICÍPIO	PERÍODO DE OBSERVAÇÃO
B5-002	DAEE	Barretos	1956/1985
B5-006R	DAEE	Guaíra	1956/1985
C5-104M	DAEE	Pradópolis	1969/1985

A análise dos dados indica que a região possui dois períodos bem caracterizados, um chuvoso, com as precipitações bem distribuídas, e outro seco, (junho, julho e agosto) onde, não raro ocorrem chuvas. As médias das precipitações são apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Precipitação média da região de Guaira

MÊS	MÉDIA (mm/mes)
Janeiro	234,0
Fevereiro	180,0
Março	132,0
Abril	76,0
Maio	45,0
Junho	24,0
Julho	20,0
Agosto	15,0
Setembro	53,0
Outubro	138,0
Novembro	180,0
Dezembro	262,0
Anual	1330,0

Fonte: Instituto de Pesquisa Tecnológicas do Estado de São Paulo (I.P.T., 1987).

3.3.3. Temperatura do ar

A temperatura do ar varia de uma máxima anual de 31,5 °C e uma mínima de 12,4 °C. Os dados de temperatura média mensal, são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 - Temperatura média mensal, em °C, da região de Guaira.

MÊS	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA
Janeiro	30,9	19,6	25,5
Fevereiro	30,8	19,5	25,3
Março	31,0	19,0	25,4
Abril	30,5	17,3	24,5
Maio	28,0	14,1	21,8
Junho	27,6	12,8	20,8
Julho	27,6	12,4	21,0
Agosto	30,3	14,2	23,3
Setembro	31,5	16,6	25,2
Outubro	30,9	17,5	25,4
Novembro	31,0	18,6	25,5
Dezembro	30,1	19,0	25,1
Anual	30,0	16,7	24,0

Fonte: Instituto de Pesquisa Tecnológicas do Estado de São Paulo (I.P.T., 1987).

3.3.4. Umidade relativa

Nos meses de outubro a abril ocorrem as maiores saturações do ar, com médias entre 62,5 a 77%, e nos meses de junho a setembro as menores saturações, com médias entre 48,7 a 62% (Quadro 5).

3.3.5. Evaporação

Os valores destes parâmetro foram obtido por meio do Tanque Classe "A". A evaporação apresenta um total anual de 1652,0 mm, sendo o período de maior evaporação de outubro a março (Quadro 6).

Quadro 5 - Umidade relativa em %, da região de Guaira

MÊS	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA
Janeiro	97,6	37,2	74,7
Fevereiro	97,8	37,7	77,0
Março	96,2	34,0	71,8
Abril	93,9	27,7	66,0
Maio	94,5	26,8	64,0
Junho	90,8	26,4	62,1
Julho	88,3	22,0	56,0
Agosto	89,2	16,7	48,7
Setembro	92,2	16,0	49,8
Outubro	96,7	21,4	62,5
Novembro	97,1	28,9	69,1
Dezembro	97,3	35,4	74,6
Anual	94,3	27,5	64,6

Fonte: Instituto de Pesquisa Tecnológicas do Estado de São Paulo (I.P.T., 1987).

Quadro 6 - Evaporação do tanque classe "A" em mm, da região de Guaira.

MÊS	EVAPORAÇÃO CLASSE A
Janeiro	160,0
Fevereiro	154,0
Março	149,0
Abril	124,0
Maio	96,0
Junho	83,0
Julho	87,0
Agosto	134,0
Setembro	149,0
Outubro	187,0
Novembro	175,0
Dezembro	154,0
Anual	1652,0

Fonte: Instituto de Pesquisa Tecnológicas do Estado de São Paulo (I.P.T., 1987).

3.3.6. Ventos

A região apresenta predominância de ventos nas direções NE, E e SE. O valor médio da velocidade do vento é 2,60 m/s (Quadro 7).

Quadro 7 - Velocidade média dos ventos em m/s na região de Guaíra.

MÊS	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Janeiro	2,3	2,6	2,5	2,8	-	3,7	-	3,1
Fevereiro	2,2	2,5	2,4	-	-	2,9	-	3,0
Março	-	2,2	2,4	2,9	-	-	-	2,4
Abril	-	2,2	2,7	2,7	-	2,1	-	2,6
Maio	-	2,1	2,2	2,1	-	2,2	-	-
Junho	-	2,0	2,4	2,8	-	-	-	2,4
Julho	-	2,3	2,7	3,0	-	-	-	-
Agosto	-	2,6	3,0	3,5	-	3,1	-	-
Setembro	-	2,8	4,2	3,7	-	1,6	-	-
Outubro	-	2,7	2,4	3,4	-	3,2	-	3,1
Novembro	2,2	2,5	3,2	3,1	-	3,2	-	2,9
Dezembro	1,5	2,5	2,7	3,1	-	-	-	2,6
Média	2,1	2,4	2,7	3,0	-	2,8	-	2,8

Fonte: Instituto de Pesquisa Tecnológicas do Estado de São Paulo (I.P.T., 1987).

3.4. Recursos Hídricos

3.4.1. Recursos hídricos subterrâneos

Guaíra está situada em área de ocorrência do aquífero Botucatu, que possui elevado potencial de água subterrânea, fornecendo vazões que variam de 50 a 800 m³/h. Mas este aquífero é ainda pouco explorado em relação a seu potencial, devido às altas profundidades que requerem os poços nesta região.

Apesar da sua baixa potencialidade, o aquífero Serra Geral (basaltos) situado sobre o aquífero Botucatu, é o mais explorado devido a sua pouca profundidade (150 m), com vazões da ordem de 5 a 100 m³/h (DAEE- 1984).

Na Fazenda Lagoa do Fogão existe um poço tubular profundo, explorando o aquífero Serra Geral, apresentando as seguintes características: vazão de 60 m³/h e operação de 30 dias por ano.

3.4.2. Recursos hídrico superficiais

A Fazenda está localizada na cabeceira de drenagem do ribeirão Santa Quitéria, afluente do ribeirão do Jardim no seu meio curso.

Com o objetivo de determinar a vazão fornecida pelo ribeirão Santa Quitéria para irrigação, foi utilizada a técnica desenvolvida por LIAZI *et alli* (1988), já que quando é necessário avaliar a disponibilidade hídrica superficial onde não existe uma série de observações, ou a extensão da série observada é pequena, esta técnica se torna muito útil para efeitos de planejamento. A técnica desenvolvida pelos autores permite a transferência de informações de outros locais para a bacia hidrográfica em questão. Esta técnica é conhecida como Regionalização hidrológica.

Portanto, por esta metodologia foi possível obter para este trabalho a vazão mínima anual de sete dias consecutivos e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$), a qual

foi considerada como vazão garantida para a irrigação, pelo ribeirão. O cálculo da vazão $Q_{7,10}$ foi feita da seguinte forma (DAEE, 1988):

- Caracterização hidrológica da região de Guaíra:

região hidrológica de Guaíra, Figura 2. = P

Fator de regionalização hidrológica (C), Figura 3. = 0,80

Período de retorno = 10 anos

- Cálculo da vazão plurianual da região de Guaíra

$$\bar{Q} = a + b \cdot \bar{p} \quad [20]$$

onde:

$\bar{Q}$ = vazão plurianual

a = -26,23 [valor obtido da tabela de parâmetros regionais hidrológicos do Estado de São Paulo (DAEE-1988)].

b = 0,0278 [valor obtido da tabela de parâmetros regionais hidrológicos do Estado de São Paulo (DAEE-1988)].

$\bar{p}$ = precipitação anual média de Guaíra (1359 mm/ano)

Substituindo na equação [20] obtém-se,

$$\bar{Q} = 11,6 \text{ l/s} \times \text{km}^2,$$

que multiplicada pela área de drenagem da bacia (4,5 km²) tem-se

$$\bar{Q} = 187,9 \text{ m}^3/\text{h}.$$

- Vazão mínima anual de sete dias consecutivos e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$)

$$Q_{7,10} = C \cdot X_{10} (A + B) \cdot \bar{Q} \quad [21]$$

Sustituindo os valores correspondentes, resulta

$$Q_{7,10} = 36,3 \text{ m}^3/\text{h}$$

Figura 2– Regiões hidrologógicas semelhantes.

Figura 3– Regiões hidrologógicas quanto ao parâmetro C.

3.4.3. Barragens armazenadoras

Como forma de viabilizar a irrigação na propriedade, foi construído um sistema de barragens de terra (Figura 4), com as seguintes características:

BARRAGENS	ÁREA (ha)	VOLUME ARMAZENADO (dm. ha)
1	16	83,0
2	8	41,0
3	8	41,0

O volume armazenado por cada barragem foi determinado utilizando a seguinte expressão:

$$\text{Volume} = P_{50\%} \times A - Ev \quad (22)$$

onde:

$P_{50\%}$ = Precipitação pluviométrica a um nível de probabilidade de 50%, em mm;

A = Área de cada barragem; e

Ev = Perdas por evaporação (considerou-se 30% do volume total armazenado perdido por evaporação).

Figura 4 – Barragens armazenadoras

3.5. O Sistema de Irrigação

3.5.1. Características dos sistemas de irrigação

A Fazenda Lagoa do Fogão possui na atualidade 207 ha irrigados, por três sistemas de irrigação tipo pivô central (Figura 4). Os equipamentos de irrigação apresentam as seguintes características de projeto:

PIVÔ	VAZÃO (m ³ /h)	NÚMERO DE TORRES	ÁREA IRRIGADA (ha)
1	267	13	94
2	186	11	66
3	155	9	47

3.5.2. Operação atual do sistema de irrigação

O pivô 1 (Figura 4) é alimentado pelo ribeirão Santa Quitéria, em cuja margem se encontra a estação de bombeamento que o alimenta. Além do ribeirão, existe o sistema de barragens, o qual armazenam água fornecida exclusivamente pelas chuvas, devido a que este sistema se encontra na cabeceira de drenagem, contando com uma mínima área que contribui com escoamento superficial aproveitável. O manejo das barragens é o seguinte: A barragem 1, com uma área de 16 ha, armazena água para ser jogada no leito do córrego Santa Quitéria, quando o ribeirão não satisfaz a demanda de água requerida pelo pivô 1. As barragens 2 e 3, com 8 ha cada

uma, são aquelas que fornecem a demanda de água dos pivôs 2 e 3. Na margem da barragem 2 é onde se encontra o poço que possui uma vazão de $60 \text{ m}^3/\text{h}$. Além do poço, nesta barragem se encontra localizada uma estação de bombeamento com capacidade de vazão de $100 \text{ m}^3/\text{h}$. A água extraída do poço e a bombeada pela estação de bombeamento na barragem 2 é enviada por um sistema de tubulações para a barragem 1, que é onde se encontra localizada a estação de bombeamento que fornece água aos pivôs 2 e 3.

3.6. Padrão de Culturas

Neste trabalho será considerada a safra de inverno já que é nela que se usa intensamente a irrigação. O padrão de culturas utilizado na Fazenda Lagoa do Fogão é apresentado no Quadro 8.

Quadro 8 - Padrão de culturas da fazenda Lagoa do Fogão

CULTURA	DATA SEMEADURA	PENTADA SEMEADURA	DATA COLHEITA	PENTADA COLHEITA	CICLO VEGETATIVO (DIAS)
tomate	20/03	16	20/08	46	153
trigo	20/04	22	20/08	46	122
batata	05/05	25	25/08	47	110
ervilha	15/05	27	05/08	43	82
feijão	15/06	33	05/10	55	113

3.7. Requerimentos de Irrigação

Os dados para o cálculo dos requerimentos de irrigação são apresentados no Quadro 10. A determinação de cada parâmetro foi feita conforme descrito a seguir.

Quadro 9 - Dados climatológicos para realizar o balanço hídrico (ciclo de inverno-200 dias).

DIAS/ANO	PENTADA	P50%	ETP	EFIC. IRRIG.
76-80	16	21,6	18,8	0,8
81-85	17	12,1	18,2	0,8
86-90	18	10,7	17,5	0,8
91-95	19	8,2	17,1	0,8
96-100	20	8,7	16,4	0,8
101-105	21	0,0	15,7	0,8
106-110	22	0,0	15,0	0,8
111-115	23	0,0	14,2	0,8
116-120	24	0,0	13,5	0,8
121-125	25	0,0	12,0	0,8
126-130	26	0,0	11,3	0,8
131-135	27	0,0	10,6	0,8
136-140	28	0,0	10,0	0,8
141-145	29	0,0	9,5	0,8
146-150	30	0,0	9,0	0,8
151-155	31	0,0	8,4	0,8
156-160	32	0,0	8,1	0,8
161-165	33	0,0	7,8	0,8
166-170	34	0,0	7,7	0,8
171-175	35	0,0	7,7	0,8
176-180	36	0,0	7,8	0,8
181-185	37	0,0	8,2	0,8
186-190	38	0,0	8,5	0,8
191-195	39	0,0	8,8	0,8
196-200	40	0,0	9,1	0,8
201-205	41	0,0	9,6	0,8
206-210	42	0,0	10,1	0,8
211-215	43	0,0	10,9	0,8
216-220	44	0,0	11,5	0,8
221-225	45	0,0	12,1	0,8
226-230	46	0,0	12,7	0,8
231-235	47	0,0	13,3	0,8
236-240	48	0,0	13,9	0,8
241-245	49	0,0	14,6	0,8
246-250	50	0,0	15,3	0,8
251-255	51	0,0	15,9	0,8
256-260	52	0,0	16,6	0,8
261-265	53	0,0	17,3	0,8
266-270	54	0,0	18,0	0,8
271-275	55	0,0	19,5	0,8

Para fins de planejamento os dados de probabilidade de chuva a 50% de probabilidade e a evapotranspiração potencial utilizados neste trabalho foram obtidos das estações meteorológicas de Barretos (DAEE - B5-002) e Pradópolis (DAEE - C5-104M), respectivamente.

3.7.1. Precipitação

Os valores de precipitação mínima por pentadas, estimados a um nível de probabilidade de 50% (P50%), foram obtidos do Relatório Técnico do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT, 1987). Nesse trabalho as precipitações acumuladas por pentadas foram analisadas probabilisticamente por meio da distribuição gama.

Escolheu-se a distribuição de probabilidades por pentadas, dadas as características de frequência de irrigação dos sistemas de irrigação do tipo pivô-central. Para THOM (1958), a distribuição gama é adequado, para o estudo de precipitação em pequenos períodos.

Utilizou-se a precipitação mínima com probabilidade de ocorrência de 50%, considerando que neste tipo de distribuição, em períodos curtos, como pentadas, tal nível de probabilidade é aceitável para planejamento, uma vez que pela distribuição gama, a precipitação média em períodos de cinco dias, na região estudada ocorre com probabilidade inferior a 30%. Isto garante valores aceitáveis para o planejamento.

3.7.2. Evapotranspiração de referência - Eto

Os dados de evapotranspiração de referência foram obtidos do Relatório Técnico do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (I.P.T., 1987), onde as

estimativas da evapotranspiração foram feitas pela equação de Penman para calcular taxas de evapotranspiração média mensal e para obter a taxa média de evapotranspiração por pentada, relacionou-se a evapotranspiração mensal com o número de dias através de uma equação cúbica.

3.7.3. Coeficientes das culturas

Os coeficientes das culturas para cada estágio de desenvolvimento foram obtidos da publicação de DOOREMBOS & KASSAM (1979). Os dados são apresentados no Quadro 10.

Quadro 10 - Coeficientes (Kc) das culturas.

CULTURA	ESTÁGIO DE DESENVOLVIMENTO (dias)					RESPECTIVOS VALORES de Kc				
	0-15	15-45	45-85	85-125	125-colh	0,4	0,7	1,05	0,8	0,6
tomate	0-15	15-45	45-85	85-125	125-colh	0,4	0,7	1,05	0,8	0,6
trigo	0-11	11-61	61-95	95-111	111-colh	0,3	0,7	1,05	0,7	0,2
batata	0-15	15-40	40-70	70-100	100-colh	0,4	0,7	1,05	0,9	0,7
ervilha	0-10	10-25	25-40	40-70	70-colh	0,4	0,7	1,05	1,0	0,9
feijão	0-10	10-30	30-60	60-90	90-colh	0,3	0,7	1,05	0,7	0,3

3.7.4. Lâmina bruta de irrigação

Os valores relativos à eficiência dos sistemas de irrigação foram obtidos dos ensaios realizados na propriedade agrícola pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (I.P.T., 1986).

Os dados de lâmina bruta de irrigação foram obtidos utilizando as seguintes expressões:

$$ET_m = K_c \cdot ET_o \quad [23]$$

$$\text{Lâmina bruta} = \frac{ET_m}{\text{Eficiência}} \quad [24]$$

onde:

ET_m = Evapotranspiração máxima;

ET_o = Evapotranspiração de referência (Quadro 9).

K_c = Coeficiente de cultura (Quadro 10);

Estes valores de lâminas de irrigação são apresentados no Quadro 11.

3.8 Coeficientes técnicos das culturas

Os dados para determinar os coeficientes técnicos das culturas foram obtidos do relatório nº 27.577 realizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (I.P.T., 1989), e são apresentados nos Quadros 12, 13, 14, 15, 16 e 17 para cada cultura. Os valores aparecem em BTN fiscal de 3 de junho de 1990.

Quadro 11 - Lâminas brutas de irrigação, requeridas pelas culturas em estudo, em mm.

DIAS/ANO	PENTADA	TOMATE	TRIGO	BATATA	ERVILHA	FEIJÃO	TOTAL
76-80	16	0,0	-	-	-	-	0,0
81-85	17	0,0	-	-	-	-	0,0
86-90	18	0,0	-	-	-	-	0,0
91-95	19	5,0	-	-	-	-	5,0
96-100	20	4,0	-	-	-	-	4,0
101-105	21	14,0	-	-	-	-	14,0
106-110	22	13,0	6,0	-	-	-	19,0
111-115	23	12,0	5,0	-	-	-	17,0
116-120	24	12,0	12,0	-	-	-	24,0
121-125	25	16,0	11,0	6,0	-	-	33,0
126-130	26	15,0	10,0	6,0	-	-	31,0
131-135	27	14,0	9,0	5,0	5,0	-	33,0
136-140	28	13,0	9,0	9,0	5,0	-	36,0
141-145	29	13,0	8,0	8,0	8,0	-	37,0
146-150	30	12,0	8,0	8,0	8,0	-	36,0
151-155	31	11,0	7,0	7,0	7,0	-	32,0
156-160	32	11,0	7,0	7,0	11,0	-	36,0
161-165	33	8,0	7,0	10,0	10,0	3,0	38,8
166-170	34	8,0	10,0	10,0	10,0	3,0	41,0
171-175	35	8,0	10,0	10,0	10,0	7,0	45,0
176-180	36	8,0	10,0	10,0	10,0	7,0	45,0
181-185	37	8,0	11,0	11,0	10,0	7,0	47,0
186-190	38	9,0	11,0	11,0	11,0	7,0	49,0
191-195	39	9,0	12,0	9,0	11,0	12,0	53,0
196-200	40	9,0	12,0	10,0	11,0	12,0	54,0
201-205	41	7,0	8,0	10,0	11,0	13,0	49,0
206-210	42	8,0	8,0	11,0	12,0	13,0	52,0
211-215	43	8,0	9,0	12,0	13,0	14,0	56,0
216-220	44	9,0	3,0	12,0	-	15,0	39,0
221-225	45	9,0	3,0	11,0	-	10,0	33,0
226-230	46	10,0	3,0	11,0	-	10,0	34,0
231-235	47	-	-	12,0	-	11,0	23,0
236-240	48	-	-	-	-	11,0	11,0
241-245	49	-	-	-	-	12,0	12,0
246-250	50	-	-	-	-	12,0	12,0
251-255	51	-	-	-	-	5,0	5,0
256-260	52	-	-	-	-	5,0	5,0
261-265	53	-	-	-	-	5,0	5,0
266-270	54	-	-	-	-	3,0	3,0
271-275	55	-	-	-	-	0,0	0,0

Quadro 12 - Custos de produção do tomate

Produtor: Mauricio Sakai produtividade : 5862,0 kg/ha
 Cultura : tomate receita bruta : 7587,0 BTNf
 área : 1 ha custo de produção: 3027,0 BTNf
 período : março-agosto receita líquida : 4560,0 BTNf

ITEM	TOTAL HORAS	CUSTO FIXO	CUSTO VARIÁVEL	CUSTO TOTAL
homem/hora comum	853,8	---	677,0	677,0
homem/hora especiliz.	19,6	---	16,6	16,6
hora trator MF-265	9,2	31,2	38,6	69,8
pulverizador	7,4	8,6	0,4	9,0
hora trator ford 4610	4,2	14,1	17,5	31,6
arado	2,8	2,2	0,1	2,3
pulverizador columbia	2,3	2,7	0,1	2,8
hora trator MF-296	2,2	9,9	11,7	21,6
adubadora	2,2	4,4	12,5	16,9
hora trator MF-275	2,0	8,1	9,2	17,3
grade niveladora	1,5	3,3	0,2	3,5
aplicador de calcáreo	1,3	2,5	0,0	2,5
cultivador	1,3	0,4	0,0	0,4
hora trator valmet 118	1,0	7,1	5,4	12,5
h/trator valmet 128,4	1,0	6,6	5,0	11,6
semeadeira adubadora	0,8	1,2	0,1	1,3
insumos	---	---	1649,5	1649,5
calagem	---	9,2	---	9,2
sub-total 1	912,6	111,5	2443,9	2555,4
irrigação	26,6	258,3	209,7	468,0
mão-obra/irrigação	2,6	---	3,7	3,7
sub-total 2	29,2	258,3	213,4	471,7
total custo produção	941,8	369,8	2657,3	3027,0

Quadro 13 - Custos de produção do trigo

produtor: Mauricio Sakai produtividade: : 3597,0 kg/ha
 cultura : trigo receita bruta: : 1798,2 BTNf
 área : 1 ha custo de produção: 601,2 BTNf
 período : abril-agosto receita líquida : 1196,7 BTNf

ITEM	TOTAL HORAS	CUSTO FIXO	CUSTO VARIÁVEL	CUSTO TOTAL
homem hora comum	4,4	---	3,5	3,5
homem hora especiliz.	4,8	---	4,0	4,0
hora trator ford 4600	1,9	6,4	7,9	14,3
pulverizador columbia	0,9	1,1	0,1	1,2
grade rome	0,9	2,7	0,2	2,9
pulverizador	0,9	1,1	0,1	1,2
hora trator valmet 146	0,8	7,8	5,4	13,2
colheit. MF 3640	0,1	10,4	11,4	21,8
trator ford 4610	0,7	2,2	2,7	4,9
semeadeira adubadora	0,7	1,0	0,1	1,1
hora trator valmet 118	0,5	3,3	2,5	5,8
grade niveladora	0,4	0,8	0,0	0,8
distribuidor pendular	0,2	0,5	0,0	0,5
trator MF 275	0,2	1,0	1,1	2,1
insumos	---	---	244,0	244,0
calagem	---	9,2	---	9,2
sub-total 1	17,4	47,5	283,0	330,5
irrigação	17,9	37,0	154,8	191,8
mão-obra irrigação	94,1	---	79,9	79,6
sub-total 2	112,0	37,0	234,7	271,7
total custo produção	129,4	84,5	517,7	602,2

Quadro 14 - Custo de produção da batata,

produtor:	Mauricio Sakai	produtividade :	36,000 kg/ha
cultura :	batata	receita bruta :	1714,5 BTNf
área :	1 ha	custo produção :	1014,5 BTNf
período :	maio-agosto	receita líquida:	700,0 BTNf

ITEM	TOTAL HORAS	CUSTO FIXO	CUSTO VARIÁVEL	CUSTO TOTAL
homem/hora comum	15,4	---	18,0	18,0
homem/hora especializ.	18,4	---	26,0	26,0
hora trator MF 65X	2,4	21,0	17,0	38,0
grade	2,5	11,0	0,4	11,4
trator ford 4600	4,2	12,0	16,0	28,0
arado	2,0	8,5	0,1	8,6
cultivador	3,5	11,3	0,0	11,3
pulverizador columbia	1,4	14,0	0,1	14,1
adubadora	2,0	4,0	0,4	4,4
hora trator MF 55X	3,4	5,0	5,0	10,0
hora trator valmet 128,4	0,8	8,0	6,0	14,0
aplicador de calcareo	1,2	10,0	---	10,0
insumos	---	---	598,0	598,0
calagem	---	8,2	---	8,2
sub-total 1	57,2	113,0	687,0	800,0
irrigação	4,0	30,0	182,9	212,9
mão-obra irrigação	1,7	---	1,6	1,6
sub-total 2	5,7	30,0	184,5	214,5
total custo produção	62,9	143,0	871,5	1014,5

Quadro 15 - Custo de produção da ervilha

produtor:	Mauricio Sakai	produtividade	: 2034,9 kg/ha
cultura :	ervilha	receita bruta	: 1627,1 BTNf
área :	1 ha	custo de produção:	1015,1 BTNf
período :	maio-agosto	receita líquida	: 612,0 BTNf

ITEM	TOTAL HORAS	CUSTO FIXO	CUSTO VARIÁVEL	CUSTO TOTAL
homem/hora comum	6,0	---	4,8	4,8
homem/hora especializ.	18,0	---	15,3	15,3
hora trator MF 290	6,3	28,0	33,1	61,1
hora trator MF 65X	4,3	14,6	18,0	32,6
grade	3,7	10,6	0,6	11,2
trator ford 4600	3,6	12,2	15,1	27,3
arado	2,2	1,7	0,1	1,8
pulverizador jacto 2000 l	2,0	3,9	0,2	4,1
colheita. Clayson	1,9	28,5	31,1	59,6
semeadeira adubadora	1,9	3,1	0,2	3,3
subsolador	1,5	1,3	---	1,3
rocadeira	0,9	0,6	---	0,6
carreta Lancer	0,6	0,7	---	0,7
hora trator MF 55X	0,5	1,5	2,0	3,5
insumos	---	---	658,5	658,5
calagem	---	---	9,2	9,2
subtotal 1	53,4	106,7	788,2	894,9
irrigação	3,5	19,8	98,7	118,5
mão-obra irrigação	1,3	---	1,7	1,7
sub-total 2	4,8	19,8	100,4	120,2
total custo produção	58,2	126,5	888,6	1015,1

Quadro 16 - Custo de produção do feijão.

produtor: Mauricio Sakai produtividade : 2157,0 kg/ha
 cultura : feijão receita bruta : 3020,0 BTNf
 área : 1 ha custo de produção: 751,3 BTNf
 período : junho-setembro receita líquida : 2269,0 BTNf

ITEM	TOTAL HORAS	CUSTO FIXO	CUSTO VARIÁVEL	CUSTO TOTAL
homem/hora comum	99,4	---	78,9	78,9
homem/hora especializ.	7,3	---	6,2	6,2
hora trator ford 4600	3,9	13,2	16,3	29,5
hora trator valmet 118	3,0	20,6	15,7	36,3
arado	1,7	1,3	0,1	1,4
grade niveladora	1,3	2,9	0,2	3,1
colheita. Miac	1,1	16,6	18,2	34,8
cultivador	8,8	0,3	0,1	0,4
adubadora	0,7	1,3	---	1,3
semeadeira-adubadora	0,6	1,0	0,1	1,1
pulverizador Columbia	0,6	0,6	---	0,6
pulverizador	0,5	0,6	---	0,6
hora trator ford 6600	0,4	2,6	0,1	2,7
insumos	---	---	307,5	307,5
calagem	---	9,2	---	9,2
sub-total 1	129,3	70,2	443,4	513,6
irrigação	10,1	83,8	153,1	236,9
mão-obra irrigação	1,0	---	0,8	0,8
sub-total 2	11,1	83,8	153,9	237,7
total custo produção	140,4	154,0	597,3	751,3

Quadro 17 - Receita líquida das culturas em BTNf.

CULTURA	RECEITA BRUTA	CUSTO DE PRODUÇÃO	RECEITA LÍQUIDA
tomate	7587,0	3027,0	4560,0
trigo	1798,2	601,5	1196,0
batata	1714,5	1014,5	700,0
ervilha	1627,1	1015,1	612,0
feijão	3020,0	751,3	2269,0

3.9. Instrumental Analítico

3.9.1. Modelo matemático da programação linear

Em termos gerais, a formulação do modelo básico de programação linear, quando se deseja otimizar uma função objetivo, consiste em determinar os valores que devem adquirir as variáveis $X_1, X_2, \dots, X_n$, não negativas, e que satisfaçam as condições de linearidade, que podem tomar a forma de desigualdade (HILLIER & LIEBERMAN, 1988), ou seja:

Função Objetivo:

$$\begin{array}{l} \text{MAX} \\ \text{ou} \\ \text{MIN} \end{array} \quad Z = \sum_{j=1}^n C_j X_j \quad [25]$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \leq b_i, \quad [26]$$

para $i = 1, 2, \dots, m$

$$X_j \geq 0, \quad [27]$$

para $j = 1, 2, \dots, n$

onde:

- Z = Função objetivo da empresa (maximizar algum índice de performance ou minimizar alguma medida de custo);
- X_j = Nível ótimo da atividade j ;
- C_j = Parâmetro do modelo que representa a função objetivo por unidade de atividade j ;
- a_{ij} = Parâmetro do modelo que representa a quantidade do recurso i utilizado por unidade de atividade j ; e
- b_i = Parâmetro do modelo que representa a quantidade máxima do recurso i , disponível para as n atividades ($b_i \geq 0$).

3.9.2. Componentes do modelo de programação linear

Um problema de programação linear é caracterizado por três componentes: objetivo, processos ou métodos alternativos de produção e restrição de recursos ou outras restrições.

- . Objetivo: entende-se por objetivo o que a empresa deseja alcançar, e que deve ser claramente definido. Uma particularidade do objetivo é que pode ser expresso em unidades físicas ou monetárias.
- . Processos ou métodos alternativos: representam as várias maneiras pelas quais o objetivo pode ser alcançado. A técnica de programação linear não se aplica, se houver um único caminho para chegar ao objetivo. Sua aplicação permite que os mais eficientes processos de uso dos recursos, sejam utilizado de modo a alcançar o

objetivo proposto.

- . Restrições de recursos: representam as disponibilidades de recursos. É condição fundamental de todo problema de programação linear, pois não havendo limitação de recursos, não haverá o problema.

3.9.3. Pressuposições da programação linear

Há determinadas pressuposições matemáticas próprias de um modelo de programação linear que são impostas ao problema a ser analisado. Para ESTACIO (1975), a aceitação dessas pressuposições é que torna possível a aplicação da programação linear aos problemas econômicos da produção. As pressuposições são as seguintes:

- . Estabelecimento de relações lineares: em todo problema de programação linear as equações envolvidas no modelo apresentam necessariamente variáveis expressas no primeiro grau. Estas relações lineares significam que os coeficientes usados expressam um comportamento constante, ou representam uma relação linear entre, por exemplo, o fator de produção e o produto final. Os preços pagos pelos recursos ou recebidos pelos produtos são constantes. Assim, admitem-se produtos marginais físicos constantes em desobediência ao pressuposto básico da lei dos rendimentos físicos marginais decrescentes.
- . Aditividade: Refere-se ao fato de que os processos podem ser somados. Portanto, o total de recursos ou produção será a soma dos recursos utilizados e a soma

das produções de cada atividade. Essa suposição não viola a pressuposição das proporções fixas, já que todas as atividades são independentes não sendo afetadas pelo nível de outras atividades.

- . Divisibilidade: todo recurso ou atividade tem que ser susceptível de ser fracionada até onde o exigir a maximização do resultado, ou seja que se pode admitir que sejam utilizadas frações das unidades padrão dos recursos e atividades.
- . Soluções positivas: as atividades, de um modo geral, devem estar na solução final num nível não negativo. Isto significa que na solução ótima não podem existir quantidades negativas.
- . Possibilidades finitas: número de atividades e restrições é finito e portanto a eleição e combinação só podem referir-se a esse número limitado de atividades e restrições.
- . Certeza: supõe-se conhecer, com certeza, os coeficientes técnicos, valores das restrições e preços.

Embora os algoritmos disponíveis para a solução dos problemas de programação linear trabalhem com as restrições matemáticas mencionadas, na prática a maioria delas pode ser relaxada através de artifícios de aproximação. Através destes artifícios, um conjunto muito maior de fenômenos não lineares pode ser linearizado e, conseqüentemente, utilizados os algoritmos disponíveis.

3.9.4. Formulação do modelo básico

O modelo básico utilizado neste trabalho, consiste de uma função objetivo, sujeita a restrições no uso de recursos (terra e água), assim como uma restrição de produção da cultura de tomate industrial devido a condições de mercado. O objetivo do modelo será maximizar a margem bruta, satisfazendo as restrições anteriormente referidas.

O modelo é representado pelas seguintes equações:

$$\begin{aligned} \text{MAX } Z = & 4560\text{To1} + 1196\text{Tr1} + 700\text{Ba1} + 612\text{Er1} + \\ & 2269\text{Fe1} + 4560\text{To2} + 1196\text{Tr2} + 700\text{Ba2} + \\ & 612\text{Er2} + 2269\text{Fe2} + 4560\text{To3} + 1196\text{Tr3} + \\ & 700\text{Ba3} + 612\text{Er3} + 2269\text{Fe3} \end{aligned} \quad [28]$$

onde:

MAX Z = maximização de Z (Lucro)

To1, Tr1, Ba1, Er1, Fe1 = área de tomate, trigo, batata, ervilha, feijão cultivados sob o pivô 1.

To2, Tr2, Ba2, Er2, Fe2 = área de tomate, trigo, batata, ervilha, feijão cultivados sob o pivô 2.

To3, Tr3, Ba3, Er3, Fe3 = área de tomate, trigo, batata, ervilha, feijão cultivados sob o pivô 3.

Sujeito a:

Restrição de terra

$$\text{To1} + \text{Tr1} + \text{Ba1} + \text{Er1} + \text{Fe1} \leq 94 \quad [29]$$

$$\text{To2} + \text{Tr2} + \text{Ba2} + \text{Er2} + \text{Fe2} \leq 66 \quad [30]$$

$$\text{To3} + \text{Tr3} + \text{Ba3} + \text{Er3} + \text{Fe3} \leq 47 \quad [31]$$

As restrições terra (29, 30, e 31), significam que a combinação de culturas nos diferente pivôs, tem que ser menor ou igual que a área disponível sob cada pivô.

Restrições de água para o pivô 1, em cada pentada

pentada 16:	$0To1 \leq 255$	[32]
pentada 17:	$0To1 \leq 255$	[33]
pentada 18:	$0To1 \leq 255$	[34]
pentada 19:	$0.05To1 \leq 255$	[35]
pentada 20:	$0.04To1 \leq 255$	[36]
pentada 21:	$0.14To1 \leq 255$	[37]
pentada 22:	$0.13To1 + 0.06Tr1 \leq 255$	[38]
pentada 23:	$0.12To1 + 0.05Tr1 \leq 255$	[39]
pentada 24:	$0.12To1 + 0.12Tr1 \leq 255$	[40]
pentada 25:	$0.16To1 + 0.11Tr1 + 0.06Ba1 \leq 255$	[41]
pentada 26:	$0.15To1 + 0.10Tr1 + 0.06Ba1 \leq 255$	[42]
pentada 27:	$0.14To1 + 0.09Tr1 + 0.05(Ba1 + Er1) \leq 255$	[43]
pentada 28:	$0.13To1 + 0.09(Tr1 + Ba1) + 0.05 Er1 \leq 255$	[44]
pentada 29:	$0.13To1 + 0.08(Tr1 + Ba1 + Er1) \leq 255$	[45]
pentada 30:	$0.12To1 + 0.08(Tr1 + Ba1 + Er1) \leq 255$	[46]
pentada 31:	$0.11To1 + 0.07(Tr1 + Ba1 + Er1) \leq 255$	[47]
pentada 32:	$0.11To1 + 0.07(Tr1 + Ba1) + 0.11Er1 \leq 255$	[48]
pentada 33:	$0.08To1 + 0.07Tr1 + 0.10(Ba + Er1) +$ $0.03Fe1 \leq 255$	[49]
pentada 34:	$0.08To1 + 0.10(Tr1 + Ba1 + Er1) +$ $0.03Fe1 \leq 255$	[50]
pentada 35:	$0.08To1 + 0.10(Tr1 + Ba1 + Er1) +$ $0.07Fe1 \leq 255$	[51]
pentada 36:	$0.08To1 + 0.10(Tr1 + Ba1 + Er1) +$ $0.07Fe1 \leq 255$	[52]
pentada 37:	$0.08To1 + 0.11(Tr1 + Ba1) + 0.10Er1 +$ $0.07Fe1 \leq 255$	[53]
pentada 38:	$0.09To1 + 0.11(Tr1 + Ba1 + Er1) +$ $0.07Fe1 \leq 255$	[54]
pentada 39:	$0.09To1 + 0.12Tr1 + 0.09Ba1 + 0.11Er1 +$ $0.12Fe1 \leq 255$	[55]
pentada 40:	$0.09To1 + 0.12Tr1 + 0.10Ba1 + 0.11Er1 +$ $0.12Fe1 \leq 255$	[56]
pentada 41:	$0.07To1 + 0.08Tr1 + 0.10Ba1 + 0.11Er1 +$ $0.13Fe1 \leq 255$	[57]
pentada 42:	$0.08(To1 + Tr1) + 0.11Ba1 + 0.12Er1 +$ $0.13Fe1 \leq 255$	[58]
pentada 43:	$0.08To1 + 0.09Tr1 + 0.12Ba1 + 0.13Er1 +$ $0.14Fe1 \leq 255$	[59]
pentada 44:	$0.09To1 + 0.03Tr1 + 0.12Ba1 + 0.15Fe1 \leq 255$	[60]
pentada 45:	$0.09To1 + 0.03Tr1 + 0.11Ba1 + 0.10Fe1 \leq 255$	[61]
pentada 46:	$0.10To1 + 0.03Tr1 + 0.11Ba1 + 0.10Fe1 \leq 255$	[62]
pentada 47:	$0.12Ba1 + 0.11Fe1 \leq 255$	[63]
pentada 48:	$0.11Fe1 \leq 255$	[64]
pentada 49:	$0.12Fe1 \leq 255$	[65]
pentada 50:	$0.12Fe1 \leq 255$	[66]
pentada 51:	$0.05Fe1 \leq 255$	[67]
pentada 52:	$0.05Fe1 \leq 255$	[68]
pentada 53:	$0.05Fe1 \leq 255$	[69]
pentada 54:	$0.03Fe1 \leq 255$	[70]
pentada 55:	$0Fe1 \leq 255$	[71]

As restrições 32 a 71, significam que os requerimentos de irrigação das culturas no pivô 1 têm que ser menores ou iguais à disponibilidade de água do córrego Santa Quitéria mais o volume armazenado na barragem 1.

Restrições de água para os pivôs 2 e 3

pentada 16:	$0To2+0To3 \leq 125$	[72]
pentada 17:	$0To2+0To3 \leq 125$	[73]
pentada 18:	$0To2+0to3 \leq 125$	[74]
pentada 19:	$0.05(To2+To3) \leq 125$	[75]
pentada 20:	$0.04(To2+To3) \leq 125$	[76]
pentada 21:	$0.14(To2+To3) \leq 125$	[77]
pentada 22:	$0.13(To2+To3)+0.06(Tr2+Tr3) \leq 125$	[78]
pentada 23:	$0.12(To2+to3)+0.05(Tr2+Tr3) \leq 125$	[79]
pentada 24:	$0.12(To2+To3)+0.12(Tr2+Tr3) \leq 125$	[80]
pentada 25:	$0.16(To2+To3)+0.11(Tr2+Tr3) + 0.06(Ba2+Ba3) \leq 125$	[81]
pentada 26:	$0.15(To2+To3)+0.10(Tr2+Tr3) + 0.06(Ba2+Ba3) \leq 125$	[82]
pentada 27:	$0.14(To2+To3)+0.09(Tr2+Tr3)+0.05(Ba2+Ba3) + 0.05(Er2+Er3) \leq 125$	[83]
pentada 28:	$0.13(To2+To3)+0.09(Tr2+Tr3+Ba2+Ba3) + 0.05(Er2+Er3) \leq 125$	[84]
pentada 29:	$0.13(To2+to3)+0.08(Tr2+Tr3+Ba2+Ba3) + Er2+Er3 \leq 125$	[85]
pentada 30:	$0.12(To2+To3)+0.08(Tr2+Tr3+Ba2+Ba3) + Er2+Ee3 \leq 125$	[86]
pentada 31:	$0.11(To2+To3)+0.07(Tr2+Tr3+Ba2+Ba3) + Er2+Er3 \leq 125$	[87]
pentada 32:	$0.11(To2+To3)+0.07(Tr2+Tr3+Ba2+Ba3) + .11(Er2+Er3) \leq 125$	[88]
pentada 33:	$0.08(To2+To3)+0.07(Tr2+Tr3)+0.10(B2+B3) + Er2+Er3+0.03(Fe2+Fe3) \leq 125$	[89]
pentada 34:	$0.08(To2+To3)+0.10(Tr2+Tr3+Ba2+Ba3+Er2+Er3) + 0.03(Fe2+Fe3) \leq 125$	[90]
pentada 35:	$0.08(To2+To3)+0.10(Tr2+Tr3+Ba2+Ba3+Er2+Er3) + 0.07(Fe2+Fe3) \leq 125$	[91]
pentada 36:	$0.08(To2+To3)+0.10(Tr2+Tr3+Ba2+Ba3+Er2+Er3) + 0.07(Fe2+Fe3) \leq 125$	[92]
pentada 37:	$0.08(To2+To3)+0.11(Tr2+Tr3+Ba2+Ba3) + 0.10(Er2+Er3)+0.07(Fe2+Fe3) \leq 125$	[93]
pentada 38:	$0.09(To2+to3)+0.11(Tr2+Tr3+Ba2+Ba3+Er2+Er3) + 0.07(Fe2+Fe3) \leq 125$	[94]
pentada 39:	$0.09(To2+To3)+0.12(Tr2+Tr3)+0.09(Ba2+Ba3) + 0.11(Er2+Er3)+0.12(Fe2+Fe3) \leq 125$	[95]
pentada 40:	$0.09(To2+To3)+0.12(Tr2+Tr3)+0.10(Ba2+Ba3) + 0.11(Er2+Er3)+0.12(Fe2+Fe3) \leq 125$	[96]

pentada 41:	$0.07(\text{To}_2+\text{To}_3)+0.08(\text{Tr}_2+\text{Tr}_3)+0.10(\text{Ba}_2+\text{Ba}_3)+0.11(\text{Er}_2+\text{Er}_3)+0.13(\text{Fe}_2+\text{Fe}_3) \leq 125$	[97]
pentada 42:	$0.08(\text{To}_2+\text{To}_3+\text{Tr}_2+\text{Tr}_3)+0.11(\text{Ba}_1+\text{Ba}_2)+0.12(\text{Er}_2+\text{Er}_3)+0.13(\text{Fe}_2+\text{Fe}_3) \leq 125$	[98]
pentada 43:	$0.08(\text{To}_2+\text{To}_3)+0.09(\text{Tr}_2+\text{Tr}_3)+0.12(\text{Ba}_2+\text{Ba}_3)+0.13(\text{Er}_2+\text{Er}_3)+0.14(\text{Fe}_2+\text{Fe}_3) \leq 125$	[99]
pentada 44:	$0.09(\text{To}_2+\text{To}_3)+0.03(\text{Tr}_2+\text{Tr}_3)+0.12(\text{Ba}_2+\text{Ba}_3)+0.15(\text{Fe}_2+\text{Fe}_3) \leq 125$	[100]
pentada 45:	$0.09(\text{To}_2+\text{To}_3)+0.03(\text{Tr}_2+\text{Tr}_3)+0.11(\text{Ba}_2+\text{Ba}_3)+0.10(\text{Fe}_2+\text{Fe}_3) \leq 125$	[101]
pentada 46:	$0.10(\text{To}_2+\text{To}_3)+0.03(\text{Tr}_2+\text{Tr}_3)+0.11(\text{Ba}_2+\text{Ba}_3)+0.10(\text{Fe}_2+\text{Fe}_3) \leq 125$	[102]
pentada 47:	$0.12(\text{Ba}_2+\text{Ba}_3)+0.11(\text{Fe}_2+\text{Fe}_3) \leq 125$	[103]
pentada 48:	$0.11(\text{Fe}_2+\text{Fe}_3) \leq 125$	[104]
pentada 49:	$0.12(\text{Fe}_2+\text{Fe}_3) \leq 125$	[105]
pentada 50:	$0.12(\text{Fe}_2+\text{Fe}_3) \leq 125$	[106]
pentada 51:	$0.05(\text{Fe}_2+\text{Fe}_3) \leq 125$	[107]
pentada 52:	$0.05(\text{Fe}_2+\text{Fe}_3) \leq 125$	[108]
pentada 53:	$0.05(\text{Fe}_2+\text{Fe}_3) \leq 125$	[109]
pentada 54:	$0.03(\text{Fe}_2+\text{Fe}_3) \leq 125$	[110]
pentada 55:	$0\text{Fe}_2+0\text{Fe}_3 \leq 125$	[111]

As restrições 72 a 111 significam que os requerimentos de água das culturas têm que ser menores ou iguais ao volume armazenado nas barragens 2 e 3 mais a vazão fornecida pelo poço.

Restrição de mercado

$$\text{To}_1 + \text{To}_2 + \text{To}_3 = 33 \quad [112]$$

A restrição 112 significa que o total de área cultivada de tomate nos três pivôs deve ser igual a 33 ha.

3.9.5. Solução do problema

Para solucionar o problema de programação linear formulado anteriormente, na forma de matriz de 95 variáveis por 86 restrições utilizou-se o software desenvolvido pela Eastern Software Product, Inc, de nome Linear Pro-

gramming-88 (LP-88), o qual tem como propósito geral resolver sistema de equações lineares, utilizando para isto o algoritmo iterativo "Método Simplex Revisado".

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Padrão de Cultivos

A seguir, são apresentados os resultados obtidos pelo modelo de programação linear proposto, para estimar a combinação de culturas que maximiza o lucro da propriedade agrícola, satisfazendo as restrições de terra, água e mercado.

No Quadro 18, observa-se que no pivô 1 são cultivados 33 ha de tomate e 61 ha de feijão ou seja, cultiva-se 100% da área. No pivô 2, dos 66 ha disponíveis, são cultivados 64 ha de feijão (97% da área). No pivô 3 não se cultiva. Este padrão de culturas corresponde à solução ótima para o modelo de programação linear formulado, e produz um lucro de 434.046 BTNf. Observa-se ainda que o trigo, batata e ervilha no pivô 1, tem uma receita marginal de 1196, 700 e 612 BTNf respectivamente, mas seus custos marginais são 2269,0 BTNf, ou seja cultivar um ha destas culturas acarretará uma perda para o produtor de 1073, 1569 e 1657 BTNf, por unidade produzida de trigo, batata ou ervilha na área do pivô 1. No pivô 2, observa-se que cultivar trigo, batata ou ervilha acarretarão perdas de 566, 1226 e 759

BTnf, respectivamente. Em relação ao tomate, que pertence à solução ótima para a área sob o pivô 2, verifica-se que seu valor na solução é zero; isto porque os 33 ha permitidos para plantio, de acordo com a restrição de mercado para o tomate, foram cultivados no pivô 1. Certamente será cultivada uma determinada área desta cultura sob o pivô 2, se a restrição de mercado for liberada. Sob este pivô, deverão ser cultivados 64 ha de feijão, de acordo com a solução ótima encontrada.

No pivô 3, o modelo não indicou variável na solução, isto é, não se deve cultivar uma vez que a água é o fator limitante, conforme será discutido posteriormente.

Quadro 18 - Distribuição de culturas por pivô.

VARIÁVEL	ESTADO	VALOR DA VARIÁVEL	RECEITA MARGINAL	CUSTO MARGINAL	PREÇO SOMBRA
tomate1	básica	33,0	4560,0/	4560,0	0,0
trigo1	não-básica	0,0/	1196,0/	2269,0	-1073,0
batata1	não-básica	0,0	700,0/	2269,0	-1569,0
ervilha1	não-básica	0,0	612,0/	2269,0	-1657,0
feijão1	básica	61,0/	2269,0/	2269,0	0,0
tomate2	básica	0,0	4560,0	4560,0	0,0
trigo2	não-básica	0,0	1196,0	1762,0	-566,0
batata2	não-básica	0,0	700,0	1926,0	-1226,0
ervilha2	não-básica	0,0	612,0	1371,0	-759,0
feijão2	básica	64,0/	2269,0	2269,0	0,0
tomate3	não-básica	0,0	4560,0	4560,0	0,0
trigo3	não-básica	0,0	1196,0	1762,0	-566,0
batata3	não-básica	0,0	700,0	1926,0	-1226,0
ervilha3	não-básica	0,0	612,0	1371,0	-759,0
feijão3	não-básica	0,0	2269,0	2269,0	0,0

- Variável: É o nome da variável no modelo;
- Estado: Básica ou não básica. As variáveis básicas podem ter valor zero e positivo, e as variáveis não básicas são sempre zero.
- Valor da variável: Indica o nível de produção, ou nível de intensidade da atividade j.

4.2. Consumos de Água Estimados pelo Modelo

No Quadro 19, observa-se que a partir da pentada 33, que corresponde a época de semeadura do feijão, o fornecimento de água da barragem 1 para o córrego é contínuo até a pentada 50. Dos 83 dmxha de água armazenados e disponíveis para irrigação pela barragem 1, que fornece água para o pivô 1, são consumidos 73 dmxha, ou seja, 88% da água armazenada é consumida na irrigação da área sob o pivô 1.

No Quadro 20, observa-se que foram consumidos 125 dmxha de água, para irrigação com o pivô 2, que correspondem à disponibilidade total, isto é, 82 dmxha de água das barragens 2 e 3 e 43 dmxha do poço.

4.3. Análise de Sensibilidade

Uma vez que o modelo foi resolvido, situações que requerem computação adicional podem ocorrer, já que frequentemente se está interessado saber que aconteceria com a solução se alguns parâmetros, tais como os custos e os recursos mudassem.

Para PELLEGRINI (1971), esta análise nada mais é do que a sensibilidade dos efeitos das mudanças dos parâmetros do modelo, sobre o plano ótimo de cultivos. A análise de sensibilidade é muito útil para observar o comportamento das variáveis, assim como as mudanças dentro dos limites especificados por esta análise, que se podem realizar, sem alterar a condição de maximização do lucro encontrada originalmente.

Quadro 19 - Consumo de água sob o pivô 1 (em decímetrosxhectare) estimado pelo modelo.

PENTADA	CONSUMO DO TOMATE	CONSUMO DO FEIJÃO	TOTAL	FORNECIDO P/CÓRREGO	EXTRAÇÃO DA BARRAGEM 1
16	0,0	-	0,0	0,0	0,0
17	0,0	-	0,0	0,0	0,0
18	0,0	-	0,0	0,0	0,0
19	1,65	-	1,65	4,30	0,0
20	1,32	-	1,32	4,30	0,0
21	4,62	-	4,62	4,30	0,32
22	4,29	-	4,29	4,30	0,0
23	3,96	-	3,96	4,30	0,0
24	3,96	-	3,96	4,30	0,0
25	5,28	-	5,28	4,30	0,98
26	4,95	-	4,95	4,30	0,65
27	4,62	-	4,62	4,30	0,32
28	4,29	-	4,29	4,30	0,0
29	4,29	-	4,29	4,30	0,0
30	3,96	-	3,96	4,30	0,0
31	3,63	-	3,63	4,30	0,0
32	3,63	-	3,63	4,30	0,0
33	2,64	1,83	4,47	4,30	0,17
34	2,64	1,83	4,47	4,30	0,17
35	2,64	4,27	6,91	4,30	2,61
36	2,64	4,27	6,91	4,30	2,61
37	2,64	4,27	6,91	4,30	2,61
38	2,97	4,27	7,24	4,30	2,94
39	2,97	7,32	10,29	4,30	5,99
40	2,97	7,32	10,29	4,30	5,99
41	2,31	7,93	10,24	4,30	5,94
42	2,64	7,93	10,57	4,30	6,27
43	2,64	8,54	11,18	4,30	6,88
44	2,97	9,15	12,12	4,30	7,82
45	2,97	6,10	9,07	4,30	4,77
46	3,30	6,10	9,40	4,30	5,10
47	-	6,71	6,71	4,30	2,41
48	-	6,71	6,71	4,30	2,41
49	-	7,32	7,32	4,30	3,02
50	-	7,32	7,32	4,30	3,02
51	-	3,05	3,05	4,30	0,0
52	-	3,05	3,05	4,30	0,0
53	-	3,05	3,05	4,30	0,0
54	-	1,83	1,83	4,30	0,0
55	-	0,0	0,0	4,30	0,0
TOTAL	93,39	120,17	213,56	-	73,0

Quadro 20 - Consumo de água sob o pivô 2 (em decímetrosxhectare) estimado pelo modelo.

PENTADA	CONSUMO DE FEIJÃO	EXTRAÇÃO DAS BARRAGENS 2 E 3 + POÇO
33	1,92	1,92
34	1,92	1,92
35	4,48	4,48
36	4,48	4,48
37	4,48	4,48
38	4,48	4,48
39	7,68	7,68
40	7,68	7,68
41	8,32	8,32
42	8,32	8,32
43	8,96	8,96
44	8,60	8,60
45	6,40	6,40
46	6,40	6,40
47	7,04	7,04
48	7,04	7,04
49	7,68	7,68
50	7,68	7,68
51	3,20	3,20
52	3,20	3,20
53	3,20	3,20
54	1,92	1,92
55	0,0	0,0
TOTAL	125,0	125,0

4.3.1. Análise de sensibilidade da função objetivo

Uma vez que a solução encontrada pelo modelo de programação linear é ótima, a análise de sensibilidade é muito útil para observar o comportamento das variáveis que estão na solução. Para o caso em estudo, observa-se no Quadro 21 que o tomate sob o pivô 1, pode apresentar valor de receita marginal entre 4423 e 4595 BTNf, e a solução ainda será ótima. Isto quer dizer que o tomate, embora seja uma

variável obrigada a estar na base, o valor dessa cultura deverá estar dentre esses limites para manter a solução ótima. Para o feijão, observa-se que se a variação de sua receita marginal está entre 2234 e 2407 BTNf, a solução será ótima.

Na área sob o pivô 2, o tomate está na solução ótima com valor zero, uma vez que toda a área permitida para o seu plantio já foi destinada no pivô 1. Caso essa cultura entre na solução ótima na área sob o pivô 2, poderá ter uma variação de receita marginal entre os limites de 4560 e 4699 BTNf, sem alterar a solução. Observa-se que o feijão apresenta um valor mínimo de receita marginal de 2269 BTNf, ou seja, este é o valor mínimo que deverá ter para não alterar a solução.

No caso das variáveis que não estão na base, observa-se que não tem valor mínimo, somente apresentam valor máximo muito maior que sua receita marginal, com exceção do tomate e do feijão no pivô 3, significando que a alternativa mais viável no caso de ter disponibilidade de água, seria cultivar feijão e tomate nesta área. As outras alternativas de culturas que se tente implementar, mantendo os valores de receita marginal atuais, acarretarão decréscimo na receita para o agricultor.

Quadro 21 - Análise de sensibilidade da função objetivo.

VARIÁVEL	ESTADO	VALOR DA VARIÁVEL	RETORNO UNITÁRIO	MÍNIMO	MÁXIMO
To1	básica	33,0	4560,0	4423,0	4595,0
Tr1	não-básica	0,0	1196,0	nenhum	2269,0
Ba1	não-básica	0,0	700,0	nenhum	2269,0
Er1	não-básica	0,0	612,0	nenhum	2269,0
Fe1	básica	61,0	2269,0	2234,0	2407,0
To2	básica	0,0	4560,0	4560,0	4699,0
Tr2	não-básica	0,0	1196,0	nenhum	1762,0
Ba2	não-básica	0,0	700,0	nenhum	1926,0
Er2	não-básica	0,0	612,0	nenhum	1371,0
Fe2	básica	64,0	2269,0	2269,0	2304,0
To3	não-básica	0,0	4560,0	nenhum	4560,0
Tr3	não-básica	0,0	1169,0	nenhum	1762,0
Ba3	não-básica	0,0	700,0	nenhum	1976,0
Er3	não-básica	0,0	612,0	nenhum	1371,0
Fe3	não-básica	0,0	2269,0	nenhum	2269,0

4.3.2. Análise de sensibilidade do recurso terra

No Quadro 22, observa-se que a área cultivada sob o pivô 1 pode variar de 88 a 100 ha e ainda a solução permanecerá ótima. Isto quer dizer que a área irrigada pode ser aumentada até 100 ha ou reduzida até 88 ha sem alterar o preço sombra. No caso de cultivar mais de 94 ha, cada hectare de terra a mais, aumentará o valor da função objetivo em 2269 BTNf. Por outro lado, cada hectare de terra a menos, reduzirá o valor da função objetivo na mesma quantidade.

Quadro 22 - Análise de sensibilidade do recurso terra.

PIVÔ	PREÇO SOMBRA	ÁREA MÍNIMA (ha)	ÁREA MÁXIMA (ha)
1	2269,0	88,0	100,0
2	0,0	64,0	nenhum
3	0,0	0,0	0,0

4.3.3. Análise de sensibilidade do recurso água

No Quadro 23 para o pivô 1, observa-se que os valores mínimo e máximo do recurso correspondem aos requerimentos de irrigação para o padrão de culturas estabelecidos pelo modelo. O fato de não apresentar preço sombra, quer dizer que o recurso água por pentada neste pivô não é gasto totalmente, ou seja existe folga de água para este equipamento. Em relação a água total observa-se que o mínimo a utilizar é igual a 73 dmxha, sem apresentar valor máximo nem preço sombra. Isto é devido a que, dos 83 dmxha disponíveis, somente são utilizadas 73 dmxha tendo uma folga de 10 dmxha.

No Quadro 24, observa-se que o pivô 2 apresenta somente valores mínimos iguais aos requerimentos de irrigação, necessários para irrigar os 64 ha de feijão. Este são os valores mínimos de água que se podem aplicar, já que para valores maiores de utilização de água por pentada, terá que pagar até 1151,78 BTNf. Em relação a água total, é apresentado um valor mínimo do uso de água igual à disponibilidade, podendo pagar até 1151,78 BTNf por unidade adicional de água a utilizar, isto é por 1 dmxha (1000 m³).

Quadro 23 - Análise de sensibilidade do recurso água no pivô 1.

PENTADA	PREÇO SOMBRA	MÍNIMO	MÁXIMO
16	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0
19	0,0	1,65	nenhum
20	0,0	1,32	nenhum
21	0,0	0,0	4,62
22	0,0	4,29	nenhum
23	0,0	3,96	nenhum
24	0,0	3,96	nenhum
25	0,0	0,0	5,28
26	0,0	0,0	4,95
27	0,0	0,0	4,62
28	0,0	4,29	nenhum
29	0,0	4,29	nenhum
30	0,0	3,96	nenhum
31	0,0	3,63	nenhum
32	0,0	3,63	nenhum
33	0,0	0,0	4,47
34	0,0	0,0	4,47
35	0,0	0,0	6,91
36	0,0	0,0	6,91
37	0,0	0,0	6,91
38	0,0	0,0	7,24
39	0,0	0,0	10,29
40	0,0	0,0	10,29
41	0,0	0,0	10,24
42	0,0	0,0	10,57
43	0,0	0,0	11,18
44	0,0	0,0	12,12
45	0,0	0,0	9,07
46	0,0	0,0	9,40
47	0,0	0,0	6,71
48	0,0	0,0	6,71
49	0,0	0,0	7,32
50	0,0	0,0	7,32
51	0,0	3,05	nenhum
52	0,0	3,05	nenhum
53	0,0	3,05	nenhum
54	0,0	1,83	nenhum
55	0,0	0,0	0,0
ÁGUA TOTAL	0,0	73,0	nenhum

Quadro 24 - Análise de sensibilidade do recurso água no pivô 2.

PENTADA	PREÇO SOMBRA	MÍNIMO	MÁXIMO
16	0,0	0,0	nenhum
17	0,0	0,0	nenhum
18	0,0	0,0	nenhum
19	0,0	0,0	nenhum
20	0,0	0,0	nenhum
21	0,0	0,0	nenhum
22	0,0	0,0	nenhum
23	0,0	0,0	nenhum
24	0,0	0,0	nenhum
25	0,0	0,0	nenhum
26	0,0	0,0	nenhum
27	0,0	0,0	nenhum
28	0,0	0,0	nenhum
29	0,0	0,0	nenhum
30	0,0	0,0	nenhum
31	0,0	0,0	nenhum
32	0,0	0,0	nenhum
33	1151,78	1,92	nenhum
34	1151,78	1,92	nenhum
35	1151,78	4,48	nenhum
36	1151,78	4,48	nenhum
37	1151,78	4,48	nenhum
38	1151,78	4,48	nenhum
39	1151,78	7,68	nenhum
40	1151,78	7,68	nenhum
41	1151,78	8,32	nenhum
42	1151,78	8,32	nenhum
43	1151,78	8,96	nenhum
44	1151,78	8,60	nenhum
45	1151,78	6,40	nenhum
46	1151,78	6,40	nenhum
47	1151,78	7,04	nenhum
48	1151,78	7,04	nenhum
49	1151,78	7,68	nenhum
50	1151,78	7,68	nenhum
51	1151,78	3,20	nenhum
52	1151,78	3,20	nenhum
53	1151,78	3,20	nenhum
54	1151,78	1,92	nenhum
55	1151,78	0,0	nenhum
ÁGUA TOTAL	1151,78	125,0	nenhum

4.3.4. Sugestões Para Novas Pesquisas

Como instrumento auxiliar no processo de planejamento da empresa rural, a utilização da programação linear implica ~~em~~ adotar de forma determinista coeficientes de comportamento aleatório. Isto é uma desvantagem na agricultura, a qual ~~apresenta-se~~ como uma das atividades econômicas mais complexas dado o caráter aleatório de fatores incontroláveis, como clima, preços e ocorrência de pragas e doenças que são os principais responsáveis pela situação de risco sob a qual atua a empresa agrícola.

Ressalta-se portanto, para novas pesquisas, a utilização de modelos de planejamento da empresa rural que permitam a inclusão de distribuição de frequências e demais informações estatísticas ou probabilísticas. Tais modelos de programação linear, ao incluírem adequadamente estas informações, refletirão a situação de risco enfrentada pelo agricultor.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos, em função da metodologia empregada e da análise e discussão apresentadas, permitem as seguintes conclusões:

- a) Na área sob o pivô 1, devem ser cultivados 33 ha de tomate e 61 ha de feijão. Na área sob o pivô 2, devem ser cultivados 64 ha de feijão, sendo que sob esse pivô, ficarão ociosos 2 ha de terra por falta de água disponível. No pivô 3 não se deverá cultivar com irrigação, pois não há disponibilidade de água.
- b) Para irrigação da área sob o pivô 1, foram consumidos 73 dm³/ha de água (73000 m³), havendo uma sobra de água, em relação à disponibilidade total, igual a 10 dm³/ha (10000 m³). Na área sob o pivô 2, foram consumidos 125 dm³/ha (125000 m³), correspondentes ao volume total disponível.
- c) A combinação ótima de culturas nas áreas irrigadas, para o volume de água disponível, sempre foi feijão e tomate, devido aos seus valores de receita marginal.

Na área sob o pivô 1, no caso do feijão, a receita marginal poderá variar entre os limites de 2234 e 2407 BTNf, sem alterar a solução ótima. Para a cultura do tomate, a receita marginal poderá variar entre os limites de 4423 e 4575 BTNf. Na área sob o pivô 2, o valor mínimo da receita marginal para o feijão foi de 2269 BTNf. Nesta área, só deverá plantar tomate se for liberada a restrição de mercado.

- d) Na área sob o pivô 3 não se praticará agricultura irrigada, uma vez que não há água disponível.
- e) A área cultivada sob regime de irrigação no pivô 1 é de 94 ha, podendo variar de 88 a 100 ha sem alterar a solução ótima. Para aumentar a área irrigada além dos 94 ha até o limite de 100 ha, pode-se pagar um máximo de 2269 BTNf por cada hectare à mais.
- f) Na área sob o pivô 2, permitiu-se cultivar 64 ha de feijão, consumindo-se toda a água disponível, isto é, 125 dmxha. Para valores maiores de utilização de água, pode-se pagar no máximo 1151,78 BTNf por cada 1 dmxha (1000 m^3) utilizado a mais. Para o pivô 1, houve folga de água e a área disponível de 94 ha foi toda ocupada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOSTA, A. Volume útil de un almacenamiento; un nuevo enfoque. Recursos Hidráulicos, México, 6(4): 334-45, 1977.

AUTRAN, H.R.C. Planejamento agropecuário para o perímetro irrigado de Morada Nova, Ceará, através da programação linear; estudo de caso para um lote típico. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 5., São Paulo, 1980. Anais. São Paulo, ABID, 1980. p.295-334.

BALTRA, C.O. A utilização da informática na irrigação. ITEM. Irrigação e Tecnologia Moderna, Brasília, (28): 13-5, 1982.

BARBOSA, S.C. Combinação de explorações e rentabilidade em pequenos estabelecimentos agropecuários do município de Viçosa, Minas Gerais, 1971/72. Viçosa, 1972. 159p. (MS - Universidade Federal de Viçosa).

BARROCAS, J.M. Programação linear. In: CURSO NACIONAL DE ELABORAÇÃO, ANÁLISE E AVALIAÇÃO DE PROJETOS AGRÍCOLAS, 1, Campinas, 1968. s.n.t. p.1-47.

BARROS, H. de. Programação linear. In: _____. A empresa agrícola; observação, planejamento e gestão. Lisboa, Fundação Calouste Gubelkian, 1968. cap. 9, p. 263-4.

BENAMI, A. & OFEN, A. Irrigation engineering: sprinkler, trickle, surface irrigation; principles, design and

agricultural practices. Haifa Irrigation Scientific Publication, 1984. 257p.

CRUZ, E.R. da, Aspectos teóricos sobre incorporação de riscos em modelos de decisão. In: CONTINI, E.; ARAÚJO, J.D. de; OLIVEIRA, A.J. de; GARRIDO, W.E. Planejamento da propriedade agrícola; Modelos de decisão. Brasília, EMBRAPA/DID. 1984. p.237-60.

CHAVES, R.N.M. Programação linear num projeto de armazenagem e secagem de grãos. Viçosa, 1970. 59p. (MS - Universidade Federal de Viçosa).

CHAVES, R.N.M.; BRAGA FILHO, L.J.; MAIA, J.L.V. Uma ração de custo mínimo para frangos. Revista Ceres, Viçosa, 17(94): 290-313, out./dez. 1970.

CRISTANCHO, C.M. Maximização do lucro, na empresa agrícola pela programação linear. Viçosa, 1965. 71p. (MS - Universidade Federal de Viçosa).

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Caracterização dos recursos hidráulicos no Estado de São Paulo, São Paulo, 1984.

DILLON, J.L. Agricultura, pesquisa e probabilidade. Fortaleza, Universidade Federal do Ceará, 1976. 25p. (Série Pesquisa, 13).

DOOREMBOS, J.A. & KASSAM, H. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Roma, FAO, 1979, 212p. (Estudios FAO Riego y drenage, 23).

EIGER, S. & SACKS, O.C.N. Canais trapezoidais não revestidos: Dimensionamento com mínimo volume de escavação. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 5., São Paulo, 1980. Anais. São Paulo, ABID, 1980. p.274-87.

- ESTACIO, F. A programação linear em agricultura; metodologia de planejamento e análise. Lisboa, Fundação Calouste Gubelkian, 1975. 220p.
- ESTADOS UNIDOS. Departament of Agriculture. Soil Conservation Service. Soil-plant-water relationships. Washington, 1964. cap. 1, 72p. (Irrigation, 15).
- FERREIRA, L.R. A introdução de novas atividades produtivas para o desenvolvimento de uma região agrícola: a fruticultura na zona da Mata de Minas Gerais. Viçosa, 1971. 156p. (MS - Universidade Federal de Viçosa).
- GALINDO, B.C. La aplicación de la programación linear para la obtenção de un plan optimo de cultivos en el distrito de riego n^o 35 rio La Antigua. Veracruz, 1976, 102p. (MS - Universidad Veracruzana).
- HADLEY, G. Programação linear. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1982. 460p.
- HARDAKER, J.B. Progamación de granjas con computadores. Zaragoza, Atlas, 1975. 150p.
- HEADY, E.O. & CANDLER, W. Linear programming methods. Ames, Iowa State University Press, 1969. 597p.
- HEADY, E.O. Synthesis of decision and planning tools and environment. In: HEADY, E.O., ed. Economic models and quantitative methods for decisions and planning in agriculture. Ames, Iowa State University Press. 1971. p.8-9.
- HILLIER, F.S. & LIEBERMAM, G.J. Introdução a pesquisa operacional. São Paulo, EDUSP, 1988. 805p.

HUANG, W.Y.; LIANG, T.; WU, I-pai. Optimization water utilization throug multiple crops scheduling. St. Joseph, ASAE, 1974. 26p. (ASAE. Paper, 74-2043).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO.
Apoio tecnológico à agricultura irrigada no município de Guaíra, São Paulo. São Paulo, 1987. 59p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO.
Climatologia das precipitações, taxas de evaporação e balanços hídricos nas áreas de ocorrência de latossolos roxo no Estado de São Paulo. São Paulo, 1987.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO.
Análise de custos de irrigação em terras altas e seus reflexos sociais. São Paulo, 1987. v.1, 164p. (Relatório IPT/DES - AETC n^o 27/577/89).

KOKIE, E.J. Programação linear: In: MAYNARD, H.B. Manual de Engenharia de Produção; métodos matemáticos e estatísticos. São Paulo, Edgar Blucher, 1970, v.9, cap. 4, p.116-8.

KHUMAR, R. & KHEPAR, D.S. Decision model for optimal cropping patterns in irrigation based on crop water production functions. Agricultural Water Management, Amsterdam, 3(1): 65-76, 1980.

LIAZI, A.; CONEJO, L.G.J.; PALOS, F.C.J.; CINTRA, S.P. Regionalização hidrológica do Estado de São Paulo. Água e Energia Elétrica, São Paulo, 5(14): 4-10, 1988.

MAGALHÃES, C.A. de. Análise econômica da pecuária leiteira em competição com outros empreendimentos agropecuários através da programação linear na zona da Mata de Minas Gerais. Viçosa, 1971. 154p. (MS - Universidade Federal de Viçosa).

- MAINIÉ, P. Cálculo económico en agricultura; aplicación de los programas lineales y de juegos. Zaragoza, Acribia, 1969. 192p.
- MARTINS, J. Viabilidade da produção de bovinos de corte em empresas rurais de características selecionadas na zona da Mata de Minas Gerais. Viçosa, 1971. 151p. (MS - Universidade Federal de Viçosa).
- MUNOZ, R.R. Análise de combinação de atividade e da introdução de sistemas de produção na empresa rural, noroeste de Minas Gerais. Viçosa, 1971. 149p. (MS - Universidade Federal de Viçosa).
- NEVES, E.M. Alocação de recursos e combinação de atividades pela programação linear em empresas leiteiras na região de Lins, Estado de São Paulo. Viçosa, 1972. 105p. (MS - Universidade Federal de Viçosa).
- NEVES, E.M.; GRAÇA, R.L.; McCARL, B. Programação matemática aplicada a dados experimentais no Brasil: problemas atuais, limitações e sugestões. In: CONTINI, E.; ARAÚJO, J.D. de; OLIVEIRA, A.J. de; GARRIDO, W.E. Planejamento da propriedade agrícola, modelos de decisão. EMBRAPA, 1984. p.101-9.
- PALACIOS, V.E. Introducción a la teoría de la operación de distritos y sistemas de riego. Chapingo, Escuela Nacional de Agricultura, Colégio de Postgraduandos, 1977. 472p.
- PELLEGRINI, L.M. A linear programming analysis of otimum farm organization in the municipios de São Joaquim da Barra, Orlândia and Sales de Oliveira, State of São Paulo, Brasil. Lafayette, 1968. 169p. (MS - Purdue University).

- PELLEGRINI, L.M. *Administração de empresas agropecuárias*. In: IDORI, Instituto de Racionalização do trabalho. 1971. s.l., IDORTI, 1971.
- PIZYSIENIG FILHO, J. Um modelo de avaliação de novas tecnologias: o caso do aproveitamento dos subprodutos do cacau. Piracicaba, 1987, 145p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz").
- PRASERES, L.A. dos. Combinação de atividades, pela programação linear, na microrregião de Imperatriz, Maranhão. Piracicaba, 1976. 91p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz").
- RASK, N. Tamanho ótimo e combinação de atividades para pequenas propriedades. Porto Alegre, 1965. 88p. (MS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul).
- REIS, M.M. Determinação de planos ótimos de cultivos a nível parcelar no projeto de Bebedouro, município de Petrolina PE. Viçosa, 1980. 86p. (MS - Universidade Federal de Viçosa).
- SAAD, M.A.; TOGNON, A.A.; SANSIGOLO, A.C. Subsídios para projetos e manejo de irrigação. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8., Florianópolis, 1988. *Anais*. Florianópolis, ABID, 1988. p.555-85.
- SIMONARD, M. *Linear programming*. Englewood Cliffs, Prentice - Hall, 1966. 430p.
- SOUZA, J.A. de. Estudo de combinação de exploração agropecuária em Ubi, Minas Gerais, ano agrícola 1960/61. Viçosa, 1965. 52p. (MS - Universidade Federal de Viçosa).
- STOCKTON, R.S. *Introdução a programação linear*. São Paulo, Atlas, 1968. 151p.

SUGAI, Y. Planejamento básico de uma empresa agropecuária, pela programação linear. Viçosa, 1967. 87p. (MS - Universidade Federal de Viçosa).

THOM, H.C.S. A note on the gamma distribution. **Monthly Kleather Review**, Boston, 86(4): 117-22, 1958.

VALENCIA, J.C. Programação linear para la formulação de planos de cultivos en los distritos de riego de México. **Recursos Hidráulicos**, México, 4(4): 562-77, 1975.

VAN DEMAN, J.M.; SOWELL, R.S.; SNEED, R.E. Otimization of water use for irrigation. St. Joseph, ASAE, 1976. 20p. (ASAE. Paper, 76-2526).