

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CÂMPUS DE BOTUCATU

**MODELO DE PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR PARA  
OTIMIZAÇÃO DO PADRÃO DE CULTIVO E RETORNO  
FINANCEIRO EM ÁREAS IRRIGADAS**

**RAIMUNDO NONATO FARIAS MONTEIRO**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências  
Agronômicas da UNESP – Câmpus de  
Botucatu, para obtenção do Título de Doutor  
em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

**BOTUCATU – SP**

Dezembro – 2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CÂMPUS DE BOTUCATU

**MODELO DE PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR PARA  
OTIMIZAÇÃO DO PADRÃO DE CULTIVO E RETORNO  
FINANCEIRO EM ÁREAS IRRIGADAS**

**RAIMUNDO NONATO FARIAS MONTEIRO**

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Cury Saad

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

**BOTUCATU – SP**

Dezembro – 2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

M775m Monteiro, Raimundo Nonato Farias, 1986-  
Modelo de programação não-linear para otimização do padrão de cultivo e retorno financeiro em áreas irrigadas / Raimundo Nonato Farias Monteiro. - Botucatu : [s.n.], 2014 xiv, 74 f. : ils. color., grafs. color., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2014  
Orientador: João Carlos Cury Saad  
Inclui bibliografia

1. Pesquisa operacional. 2. Irrigação. 3. Modelagem de processos. 4. Produtividade. 5. Finanças. I. Saad, João Carlos Cury. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS**  
**CAMPUS DE BOTUCATU**

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO: MODELO DE PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR PARA OTIMIZAÇÃO DO PADRÃO DE CULTIVO E RETORNO FINANCEIRO EM ÁREAS IRRIGADAS**

ALUNO: RAIMUNDO NONATO FARIAS MONTEIRO

ORIENTADOR: PROF. DR. JOÃO CARLOS CURY SAAD

Aprovado pela Comissão Examinadora

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. JOÃO CARLOS CURY SAAD

  
\_\_\_\_\_  
PROFA. DRA. ALBA MARIA GUADALUPE O. GONZÁLEZ

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. JOÃO LUÍS ZOCOLER

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. ALEXANDRE BARCELLOS DALRI

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. JÚLIO CÉSAR THOALDO ROMEIRO

Data da Realização: 17 de dezembro de 2014.

Saiba esperar o momento certo. O bom peregrino respeita o tempo, as suas condições físicas, a capacidade interior de resistir a esta ou àquela prova.

Se acha que ainda não está preparado, treine mais um pouco. Se acha que é preciso finalizar algo antes de dar o próximo passo, faça isto.

Mas nunca confunda paciência com covardia. Uma coisa é melhorar a sua capacidade; outra é procurar as condições ideais para agir, embora nem sempre elas apareçam.

A vida é e sempre será um mistério. Por mais que tentemos planejar tudo, Deus escreve nosso destino à sua maneira. Seu plano, com toda certeza é sempre melhor que o nosso.

Tenha paciência. Mas não fique imóvel.

(PAULO COELHO)

## DEDICATÓRIA

Pareço-me tanto com vocês, olhando dá pra ver, os seus rostos lembram o meu. Desde o primeiro passo, o primeiro aniversário, sempre estiveram ali dispostos a me amar incondicionalmente, a me ensinar os melhores princípios, o valor que eu deveria dar a cada coisa na vida.

Com vocês eu aprendi muitas lições. Com o apoio de vocês, enfrentei todos os desafios que a vida me impôs; e quando viram que estava pronto para o mundo, me deixaram voar.

Foi vendo vocês que eu aprendi a lutar.

Se Deus me desse à chance de viver outra vez, só queria se os tivesse comigo.

Aos meus pais Maria da Paz Farias Monteiro e Francisco Liduino Monteiro, aos meus irmãos Cristiane Monteiro Cavalcante, Catiane Farias Monteiro, Ana Cristina Farias Monteiro e Robinson Farias Monteiro, e aos meus sobrinhos Ana Luísa, Ibson e Arthur,

**dedico e ofereço** este trabalho com todo o meu amor.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as bênçãos a mim concedidas ao longo de minha vida, pela força, coragem e disposição para enfrentar todos os desafios e por sempre encontrar portas abertas em meu caminho.

À minha família, simplesmente por serem maravilhosos, por estarem sempre ao meu lado. Meus pais, irmãos, sobrinhos, avós, tias(os). Sem vocês eu não teria conseguido.

Ao Prof. Dr. João Carlos Cury Saad, pela disponibilidade na orientação, paciência, confiança, amizade e por ser um exemplo de profissional.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP/FCA, câmpus de Botucatu, em especial ao Departamento de Engenharia Rural, pela oportunidade de cursar meu Doutorado.

À Universidad Politécnica de Madrid, em especial a Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos (ETSIA), em nome da Profa. Dra. Leonor Rodriguez Sinobas, pelo estágio sanduíche na Espanha.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de estudo no país e pela concessão da bolsa de estudos no exterior (CAPES/PVE/CsF: proj. 063/2012).

Aos professores Drs. João Luis Zocoler, Alba Maria Guadalupe Orellana Gonzalez, Alexandre Barcellos Dalri e Júlio César Thoaldo Romeiro pela disponibilidade em participar da banca, e por todas as contribuições ao trabalho.

À fazenda Olhos D'Água, em Paranapanema – SP, em especial ao Eng. Agrônomo Abel Simões, pela receptividade, amizade e disponibilidade no repasse dos dados para que esta pesquisa fosse concretizada.

Aos docentes do curso de Pós-Graduação em Agronomia (Irrigação e Drenagem), que com os ensinamentos e motivações contribuíram para a minha formação acadêmica, em especial aos professores Drs. Antonio de Pádua Sousa, Antonio Evaldo Klar,

João Luís Zocoler, Raimundo Leite Cruz, Dinival Martins, Odivaldo José Seraphim, Luís Roberto Almeida Gabriel Filho e Camila Pires Cremasco Gabriel.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural e da Biblioteca Paulo de Carvalho Matos pela amizade e apoio depositados durante a minha passagem por esta Universidade.

Aos amigos que dividiram não só o mesmo teto, mas também muitas experiências e alegrias durante esse período, Francisco Borges, Joselina Correia, Clescy Oliveira, André Ballerini, Laís Peixoto e Felipe Vítório, espero contar sempre com o carinho, amparo e amizade de vocês.

Aos amigos Mariana Sales, Rafael Ludwig e João Victor, pela amizade e contribuição direta no desenvolvimento deste trabalho.

Aos muitos amigos que fiz em Botucatu, amigos de verdade que levarei por toda minha vida, Géssica Lima, Franciana Pereira, Alexsandro Oliveira, Lais Lorena, Ana Carolina Kummer, Adriana Tanaka, Lívia Sancinetti, Amansleone Timoteo, Edilson Ramos, Ramilos Rodrigues, Ana Schimidt, Itaynara Batista, Érika Correia, Claudiane Paes, Eugênio Paceli, Deise Paula, Angélica Cristina, Camila Abrahao, Bruna Soldera e ao nosso amado Chico, Renata Coscolin, Dayanne Bressan, José Joaquim, Ana Guirra, Rigléia Brauer, Euménes Farias, Edypo Jacob, Natália Soares, Tiara Guimarães, Gabriel Gomes, agradeço cada minuto de convivência, e por cada troca de experiência.

Agradeço à cidade de Botucatu, que tão bem me recebeu e que me permitiu ser tão feliz nos últimos quatro anos; que me proporcionou grandes aprendizados de vida e a chance de conhecer tantas pessoas boas, tanto dentro, quanto fora da universidade. Com isso, digo sem medo, que sou hoje muito melhor do que era há quatro anos.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional, MUITO OBRIGADO.

*“A gratidão é o único tesouro dos humildes.”*

William Shakespeare



## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XI
LISTA DE SIGLAS.....	XIV
1. RESUMO.....	1
2. SUMMARY.....	3
3. INTRODUÇÃO.....	5
4. REVISÃO DE LITERATURA.....	7
4.1. Agricultura Irrigada.....	7
4.1.1. Aspectos gerais.....	7
4.1.2. Uso eficiente da água na agricultura.....	8
4.2. Função de resposta água - cultura.....	10
4.3. Planejamento e otimização dos recursos hídricos.....	13
4.3.1. Programação linear.....	15
4.3.2. Programação não-linear.....	18
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	21
5.1. Caracterização da área.....	21
5.2. Modelo de otimização.....	24
5.3. Determinação dos parâmetros do modelo.....	25
5.3.1. Padrão de cultivo.....	25
5.3.2. Preço de mercado e custo de produção para as culturas estudadas.....	26
5.3.3. Função de resposta das culturas a água.....	27
5.3.4. Requerimento mensal de água.....	28
5.4. Restrições de terra, água e produção das culturas.....	32

5.4.1. Recurso Terra.....	32
5.4.2. Recurso Água.....	33
5.4.3. Produção das culturas.....	37
5.5. Software utilizado.....	37
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
6.1. Análise comparativa entre o modelo de programação não-linear e o padrão de cultivo adotado pelo produtor.....	38
6.1.1. Padrão de cultivo.....	38
6.1.2. Utilização do recurso Terra.....	40
6.1.3. Utilização do recurso Água.....	41
6.1.4. Lâminas de Água utilizadas.....	42
6.2. Análise de sensibilidade.....	43
6.2.1 Análise de sensibilidade da função objetivo.....	44
6.2.2. Análise de sensibilidade do recurso Terra.....	45
6.2.3. Análise de sensibilidade do recurso Água.....	46
6.3. Otimização considerando seis níveis de volumes de água disponível.....	47
6.3.1 Padrão de cultivo.....	48
6.3.2. Utilização da terra.....	49
6.3.3. Utilização da água.....	51
6.3.4. Lâminas de água utilizadas.....	53
6.4. Análise de sensibilidade considerando os cinco níveis de volume de água disponível.....	54
6.4.1. Análise de sensibilidade da função objetivo.....	54
6.4.2. Análise de sensibilidade do recurso Terra.....	55

6.4.3. Análise de sensibilidade do recurso Água.....	57
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
8. CONCLUSÕES.....	60
9. REFERÊNCIAS.....	61
ANEXOS	

**LISTA DE FIGURAS**

FIGURA 1	Croqui da fazenda Olhos D'água em Paranapanema, SP, com a identificação dos pivôs. ....	23
FIGURA 2	Rendimento Líquido considerando seis níveis de disponibilidade de água, utilizando o modelo de programação não-linear.....	49
FIGURA 3	Percentuais de ocupação mensal, considerando seis níveis de disponibilidade de água anual.....	51
FIGURA 4	Diferença entre o volume anual de água disponível e o volume anual de água utilizado pelo modelo de programação não-linear.....	53

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Identificação dos pivôs e sua área irrigada na fazenda Olhos D'Água.....	22
TABELA 2	Calendário de cultivo da fazenda Olhos D'Água .....	26
TABELA 3	Valor médio de venda dos produtos agrícolas (R\$ kg <sup>-1</sup> ) na região de Paranapanema, SP para o ano agrícola de 2013/2014, e custo médio da produção (R\$ ha <sup>-1</sup> ) para as culturas implantadas na fazenda Olhos D'água .....	27
TABELA 4	Funções de resposta das culturas à água utilizadas no modelo de programação não-linear .....	28
TABELA 5	Duração máxima da insolação diária (FOTOPERÍODO – N), em horas, no 15º dia de cada mês, em latitudes compreendidas na área do trabalho .....	29
TABELA 6	Dados de temperatura máxima (T max), mínima (T min) e média (T med), evapotranspiração de referência (ET <sub>o</sub> ), para o período de julho de 2013 a junho de 2014, da fazenda Olhos D'Água, Paranapanema, SP.....	30
TABELA 7	Coefficientes de cultura (K <sub>c</sub> ), segundo o Boletim FAO 24.....	31
TABELA 8	Dados de evapotranspiração mensal da cultura para o período de julho de 2013 a junho de 2014, na fazenda Olhos D'Água, Paranapanema, SP .....	31
TABELA 9	Percentuais do fator F <sub>i</sub> para o cálculo do requerimento mensal de água das culturas estudadas na fazenda Olhos D'Água, Paranapanema, SP.....	32
TABELA 10	Dados precipitação (Precip.) e precipitação efetiva (Pe) para o período de julho de 2013 a junho de 2014, da fazenda Olhos D'Água, Paranapanema, SP .....	34
TABELA 11	Volume mensal de água disponível, (Precipitação efetiva + irrigação) em m <sup>3</sup> , para o ano agrícola de 2013/2014. ....	35

TABELA 12	Volumes mensais de água disponível ( $m^3$ ) para os cinco valores de VAD. ....	36
TABELA 13	Áreas ocupadas pelas culturas em estudo (ha) e rendimento líquido (R\$) para o modelo de programação não-linear e para o padrão adotado pelo produtor, considerando a quantidade de água utilizada no ano agrícola 2013/2014 de $5.258.725 m^3$ .....	39
TABELA 14	Área ocupada por mês em ha, pelas culturas estudadas para o modelo de programação não-linear e para o padrão adotado pelo produtor e percentuais de ocupação, considerando a quantidade de água utilizada no ano agrícola 2013/2014 de $5.258.725 m^3$ .....	41
TABELA 15	Consumo de água mensal ( $m^3$ ) pelas culturas estudadas, para o modelo de programação não-linear e para o padrão adotado pelo produtor, considerando a quantidade de água utilizada no ano agrícola 2013/2014 de $5.258.725 m^3$ .....	42
TABELA 16	Lâminas de água (W) em mm e produtividade (Y) em $kg ha^{-1}$ para os modelos de programação não-linear e para o padrão adotado pelo produtor, considerando a quantidade de água utilizada no ano agrícola 2013/2014 de $5.258.725 m^3$ .....	43
TABELA 17	Análise de sensibilidade da função objetivo, considerando a quantidade de água utilizada no ano agrícola 2013/2014 de $5.258.725 m^3$ .....	45
TABELA 18	Análise de sensibilidade do recurso terra, considerando a quantidade de água utilizada no ano agrícola 2013/2014 de $5.258.725 m^3$ .....	46
TABELA 19	Análise de sensibilidade do recurso água, considerando a quantidade de água utilizada no ano agrícola 2013/2014 de $5.258.725 m^3$ .....	47

TABELA 20	Áreas ocupadas pelas culturas em estudo (ha), para os seis níveis de disponibilidade de água, utilizando o modelo de programação não-linear.....	48
TABELA 21	Área ocupada por mês em (ha), pelas culturas estudadas, para os seis níveis de disponibilidade de água, utilizando o modelo de programação não-linear.....	50
TABELA 22	Consumo mensal de água (m <sup>3</sup> ) pelas culturas estudadas, considerando os seis níveis de disponibilidade de água, utilizando o modelo de programação não-linear.....	52
TABELA 23	Lâminas de água (W) em mm e produtividade (Y) em kg ha <sup>-1</sup> , considerando os seis níveis de disponibilidade de água, utilizando o modelo de programação não-linear.....	54
TABELA 24	Análise de sensibilidade da função objetivo, considerando os seis níveis de disponibilidade de água.....	55
TABELA 25	Análise de sensibilidade do recurso terra, considerando os seis níveis de disponibilidade de água.....	56
TABELA 26	Análise de sensibilidade do recurso água, considerando os seis níveis de disponibilidade de água.....	58

## LISTA DE SIGLAS

---

ASPIPP	Associação do Sudoeste Paulista de Irrigantes e Plantio na Palha
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CE	Ceará
ETc	Evapotranspiração da cultura
ETo	Evapotranspiração de referência
ETSIA	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos
FAO	Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
FCA	Faculdade de Ciências Agrônômicas
FEHIDRO	Fundo Estadual de Recursos Hídricos
$F_i$	Fator de correção
GAMS	General Algebraic Modeling System
Há	Hectares
Kc	Coefficiente de cultivo
Lat	Latitude
PE	Pernambuco
Pe	Precipitação efetiva
PL	Programação Linear
PNL	Programação Não-Linear
PVE	Pesquisador Visitante Estrangeiro
SCS	Soil Conservation Service
SP	São Paulo
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
UPM	Universidad Politécnica de Madrid
USDA	United States Department of Agriculture
W	Lâmina de água
Y	Produtividade

---



MODELO DE PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR PARA OTIMIZAÇÃO DO PADRÃO DE CULTIVO E RETORNO FINANCEIRO EM ÁREAS IRRIGADAS. Botucatu, 2014. 74 p. Tese (Doutorado em Agronomia - Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Autor: RAIMUNDO NONATO FARIAS MONTEIRO

Orientador: JOÃO CARLOS CURY SAAD

## 1. RESUMO

A técnica da irrigação visa o aumento da produtividade das culturas, principalmente em regiões onde a escassez de água é fator limitante para o desenvolvimento vegetal, entretanto, causa um grande impacto na disponibilidade hídrica dos mananciais, pois requer a captação de um grande volume de água, devido ao grande consumo requerido pelos cultivos. O manejo adequado da irrigação beneficia além do produtor, com a redução do custo de produção, a todos os usuários da água, devido à economia deste bem e de outras vantagens advindas de seu uso eficiente. Uma maneira racional de se definir planos ótimos de cultivo, bem como escolher uma lâmina de água que seja economicamente viável e produtiva dentre todas as opções existentes, é o emprego de técnicas que ajudem na tomada de decisão. As técnicas de programação linear e não-linear são poderosas ferramentas que podem ser utilizadas para a alocação ótima desses recursos. Esta pesquisa objetivou propor planos ótimos de cultivos, utilizando a técnica de programação não-linear (PNL), que proporcionassem a maximização do retorno líquido da fazenda Olhos D'água, em Paranapanema, SP, aliando as restrições de disponibilidade de água, terra e condições de produção das culturas, bem como estudar os efeitos de diferentes disponibilidades anuais de água sobre a renda líquida da propriedade. O modelo consistiu de uma função objetivo, sujeita a restrições no uso dos recursos terra e água, assim como restrições na produção das culturas, tendo como objetivo a maximização da soma dos benefícios líquidos decorrentes da produção das culturas no ano agrícola 2013/2014. O valor otimizado do retorno financeiro da fazenda Olhos D'água foi de R\$ 746.988,69, para o ano agrícola 2013/2014 e apresentou o seguinte padrão de cultivo em sua solução ótima:

60 ha de algodão, 205 ha de feijão, 119 ha de milho e 138 ha de soja plantada em setembro e 112 ha de soja plantada em dezembro, para o volume anual de água disponível de 5.258.725,52 m<sup>3</sup>. O modelo de PNL otimizou em 31% a renda líquida da fazenda para o ano agrícola 2013/2014 em comparação a renda obtida pelo padrão de cultivo do produtor. As análises de sensibilidade do recurso terra apresentaram preços sombra zero, indicando que esse recurso não foi restritivo. O estudo com os seis níveis de água disponíveis demonstrou que os retornos financeiros aumentam com o aumento da água disponível.

---

**Palavras-chave:** pesquisa operacional; modelagem; irrigação; produtividade; receita líquida.

NON-LINEAR PROGRAMMING MODEL TO OPTIMIZE THE CULTIVATION PATTERN AND FINANCIAL RETURNS IN IRRIGATED AREAS. Botucatu, 2014. 74 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Author: RAIMUNDO NONATO FARIAS MONTEIRO

Adviser: JOÃO CARLOS CURY SAAD

## 2. SUMMARY

The technique of irrigation aims at increasing crop yields, especially in regions where water scarcity is a limiting factor to production, however, has an expressive impact on the water availability of water sources, it requires the captation of a large volume of water due consumption required by crops. Proper irrigation management benefits the producer with reducing the cost of production and all water users due to economy this resource and other advantages arising from their efficient use. A rational way to define optimal plans of cultivation, as well as choose a water slide that be economically viable and productive among all the existing options, is the use of techniques that help in decision making, and the techniques of linear programming and nonlinear are powerful tools that can be used for the optimal allocation of these resources. This research aims to propose optima plans of cultivation, using the techniques of nonlinear programming, which provide the maximization of net return of Farm Olhos D'Agua, on Paranapanema - SP, allying the constraints of water availability, land and market, as well how to study the effects of different annual volumes of water available over the net income from the property. The model consists of an objective function, which is subject to restrictions on use of crop area and water resources as well as constraints in crop production and aim to maximization the sum of net benefits stemming from the production of crops in agricultural year 2013/2014. The optimized value of the financial returns of Olhos D'água farm was R\$ 746.988,69, for the agricultural year 2013/2014, and presented the following cropping pattern in its optimal solution: 60 ha of cotton, 205 ha of beans, 119 ha of maize, 138 ha of soybeans planted in September and 112 ha of soybeans planted in December to

and the annual volume of water available 5,258,725.52 m<sup>3</sup>. The model of NLP optimized in 31% financial return from the farm to the agricultural year 2013/2014 compared to income from the traditional model adopted by the producer. The crop area resource sensitivity analysis showed zero shadow, indicating that this feature was not restrictive. The study with the six water levels available showed that the financial returns rise with the increase of available water.

---

**Keywords:** operational research; modeling; irrigation; productivity; net revenue.

### 3. INTRODUÇÃO

A técnica da irrigação visa o aumento da produtividade das culturas, principalmente em regiões onde a escassez de água é fator limitante para o desenvolvimento vegetal, entretanto, causa um grande impacto na disponibilidade hídrica dos mananciais, pois requer a captação de um grande volume de água, devido ao grande consumo requerido pelos cultivos. A otimização do uso da água e a procura de melhorias nos rendimentos da agricultura irrigada são fatores que merecem grande atenção pelo desafio que é para o produtor este tipo de gerenciamento. Para se ter um rendimento líquido maximizado, é necessário que se faça um planejamento da irrigação, combinando a demanda de água requerida pelas culturas com o balanço hídrico local, tanto no que se refere à quantidade como a sua distribuição espaço/temporal. Sabendo que a água é o fator que mais afeta o rendimento da cultura, o conhecimento das relações de produção da água é a chave para a seleção dos planos ótimos de gestão mais adequados em áreas irrigadas.

O manejo adequado da irrigação beneficia além do produtor, com a redução do custo de produção, a todos os usuários da água, devido à economia deste bem e de outras vantagens advindas de seu uso eficiente.

Para a obtenção de estratégias ótimas de irrigação, o produtor precisa relacionar a quantidade de água aplicada com a produtividade obtida. A essa relação atribuiu-se a denominação de função de produção água-cultura, que é a produtividade da cultura em função do volume de água aplicado. A utilização dessas funções facilita que se encontrem soluções ótimas no processo de otimização do uso da água e de outros insumos.

Em áreas irrigadas onde diferentes culturas competem por uma determinada quantidade de água, uma maneira eficiente de se escolher uma lâmina de água que seja economicamente viável e produtiva dentre todas as opções existentes, é o emprego de técnicas que ajudem na tomada de decisão. As técnicas de programação linear e não-linear são poderosas ferramentas que podem ser utilizadas para a alocação ótima desses recursos.

A hipótese desta pesquisa é que modelos de programação não-linear que visam a maximização da renda líquida são eficazes na definição do padrão de ocupação dos cultivos, por avaliar uma gama maior de possibilidades na resolução de problemas.

O presente trabalho teve como objetivo geral propor planos ótimos de cultivos, utilizando a técnica de programação não-linear, que proporcionassem a maximização do retorno líquido da fazenda Olhos D'água, em Paranapanema – SP, aliando as restrições de disponibilidade de água, terra e produção dos cultivos.

Objetivos específicos:

- Determinar um plano ótimo de cultivo utilizando o modelo de programação não-linear e comparar com o plano adotado pela administração da fazenda Olhos D'água;
- Simular os efeitos de diferentes volumes anuais de água disponível sobre a renda líquida da propriedade.

## **4. REVISÃO DE LITERATURA**

### **4.1. Agricultura Irrigada**

#### **4.1.1. Aspectos gerais**

No dinâmico processo da produção agrícola, em que características do solo e planta são restringidos pela falta de água, torna-se essencial a prática da irrigação. Essa técnica é de grande importância, principalmente em locais onde a má distribuição das chuvas é um fator constante, é necessário um planejamento para se introduzir qualquer sistema produtivo com base em plantio irrigado (FRIZZONE; ANDRADE JUNIOR, 2005).

A agricultura irrigada tem sido, historicamente, importante estratégia para otimização da produção mundial de alimentos. Mais da metade da população mundial depende dos alimentos produzidos em áreas irrigadas. No passado, a utilização da irrigação era uma opção técnica de aplicação de água que visava principalmente à luta contra a seca. Atualmente, a irrigação, no foco do agronegócio, insere-se em um conceito mais amplo de agricultura irrigada, sendo uma estratégia para o aumento da produção, produtividade e rentabilidade da propriedade agrícola de forma sustentável, preservando o meio ambiente e criando condições para manutenção do homem no campo, através da geração de empregos permanentes e estáveis (MANTOVANI et al., 2009).

Segundo Bernardo (1995), é de grande importância que se tenha consciência que a irrigação, como prática isolada, não assegurará os benefícios desejados. Para que a irrigação seja maximizada deverá ser acompanhada de outras técnicas de cultivo, gerando os lucros esperados, tais como: variedades produtivas e de bom valor comercial, adubações, tratos culturais apropriados, dentre outros.

Embora a irrigação seja uma técnica agrícola muito antiga, no Brasil seu uso tornou-se frequente somente nas últimas décadas. Inicialmente no Estado do Rio Grande do Sul, aplicada em arroz irrigado por inundação, e em São Paulo, em café irrigado por aspersão. Posteriormente, nas décadas de 60 e 70 passou a ser implementada na Região Nordeste (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2008)

A contribuição dada pela irrigação no aumento de produção de alimentos é um fato inegável. Estima-se que a agricultura irrigada ocupa em torno de 18% da área total cultivada no planeta, consumindo cerca de 70% do total de água doce disponível, valor superior à quantidade consumida pelo setor industrial (21%) e pelo consumo doméstico (9%) (COELHO et al., 2005). Christofidis (2002) apresenta dados sobre a área irrigada na América Latina e mostra que o somatório dessas áreas está em, aproximadamente, 16 milhões de hectares, distribuídos principalmente nos países como México, Argentina, Brasil, Chile e Peru. Apesar de representar uma pequena parcela do total cultivado no mundo, as áreas irrigadas são responsáveis pela produção de aproximadamente 42% do montante de alimentos.

A necessidade de incremento na eficiência do uso de água está claramente definida pela crise alimentar e pela escassez dos recursos hídricos (DANTAS NETO; FARIAS, 2013).

Existe uma disposição natural de aumento do consumo da água no futuro, seja pelo aumento populacional, culminando numa maior necessidade por alimentos, seja pela disponibilidade de terras para uso na agricultura irrigada estimadas em 470 milhões de hectares (CHRISTOFIDIS, 2002).

#### **4.1.2. Uso eficiente da água na agricultura**

Segundo Carvalho (2008), diante da crescente escassez de água que já se verifica em várias regiões do país, é importante que se leve em consideração a eficiência com a qual utilizarão esse recurso, na escolha da quantidade de água a ser



aplicada ou na forma de manejo adotada. Mantovani et al. (2009) acreditam que as principais perspectivas para a agricultura irrigada envolvem “produtividade e rentabilidade, com eficiência no uso da água, da energia, de insumos e respeito ao meio ambiente”. Nesse sentido, a evolução tecnológica dos sistemas de irrigação é por si mesma insuficiente para que se vislumbrem tais perspectivas. É preciso que o irrigante conheça o momento oportuno para irrigar e a quantidade de água que deve ser aplicada em cada cultura.

Segundo Frizzone (2007), na elaboração das metas para uso de água é oportuno reanalisar e considerar não só o quanto esta água pode ser produtiva, mas também qual seria a produtividade potencial que está se perdendo pelo manejo inapropriado deste recurso. Um exemplo tradicional deste assunto é a pouca atenção dada às perdas produtivas por falhas derivadas da falta de manutenção dos sistemas de irrigação. Essas perdas potenciais, ao longo do tempo, podem vir a somar uma quantidade muitas vezes superior a quantidade de recursos financeiros necessários para a apropriada manutenção dos sistemas. As perdas de produtividade potencial em projetos de irrigação, causadas pela manutenção inadequada, pouco são discutidas na literatura.

Espindula Neto (2002) afirma que no Brasil a grande maioria dos usuários da agricultura irrigada não adota qualquer estratégia de uso e manejo racional da água de irrigação. Apesar da disponibilidade de vários métodos de manejo, os irrigantes não têm sido receptivos a qualquer método em particular. Jensen (1983) explica que os principais fatores que colaboram para tal ocorrência são os baixos custos da água de irrigação, em comparação com o custo de implantação de um programa de manejo, bem como a dificuldade na identificação e quantificação da redução na produtividade devido ao atraso na irrigação, à fertilização imprópria e irrigação excessiva.

O estudo das necessidades hídricas das culturas, em que se procura identificar as exigências das plantas em seus diferentes estádios de desenvolvimento é fundamental para o planejamento e a otimização do manejo da irrigação (STONE et al., 2002). Para o controle adequado da água de irrigação, é necessário o controle rigoroso da disponibilidade de água no solo e/ou da evapotranspiração durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura. Para tanto, é indispensável o conhecimento de parâmetros relacionados às plantas, ao solo e ao clima, para determinar o momento oportuno de irrigar e a quantidade de água a ser aplicada (DANTAS NETO; FARIAS, 2013).

Uma irrigação deficitária acarreta em menor lâmina aplicada em comparação à irrigação plena, com decorrente redução da produtividade da cultura, no

porém, com algumas vantagens consideráveis. Os benefícios potenciais de uma irrigação com déficit originam-se de três fatores, o primeiro é o aumento da eficiência da irrigação, segundo é a redução dos custos da irrigação e, por último, a redução dos riscos relacionados aos impactos ambientais advindos da irrigação plena. Quando se irriga com déficit, o objetivo é maximizar a produção por unidade de volume de água (FRIZZONE, 2007).

O manejo coerente de qualquer projeto de irrigação deve analisar aspectos sociais e ecológicos da região onde será executado e deve procurar maximizar a produtividade das culturas, suavizar os custos, aumentar a eficiência no uso de água e de energia elétrica, mantendo sempre as condições de umidade favoráveis ao adequado desenvolvimento da planta, bem como favorecer as condições físicas, químicas e biológicas do solo, pois todos esses aspectos podem afetar a vida útil do projeto (BERNARDO et al., 2008).

Métodos mais eficientes empregados nos sistemas de irrigação são imprescindíveis para a otimização do uso da água. No Brasil, a eficiência da irrigação chega a cerca de 60%. (COELHO et al., 2005).

Considerando que todo empreendimento somente poderá ser economicamente viável se seus benefícios econômicos forem superiores aos seus custos, torna-se fundamental para os projetos de irrigação melhorar a eficiência do uso da água (BERNARDO, 1995). Dantas Neto e Farias (2013) afirmam que a otimização da eficiência de uso de água de forma a contribuir para a sustentabilidade dos recursos hídricos pode ser alcançada de duas maneiras: com base nas curvas de respostas físicas da produtividade e na eficiência do uso da água, que por sua vez, é calculada como a razão entre a produtividade e o volume de água aplicado.

#### **4.2. Função de resposta Água – Cultura**

Na agricultura irrigada, o elemento “água” deve ser otimizado propiciando, sem grandes riscos, aumentar o emprego dos demais fatores de produção e, conseqüentemente, obter-se produtividades superiores com uma melhor combinação dos insumos empregados. Para tanto, o conhecimento das funções de produção ou funções de resposta é fundamental para auxiliar nas decisões, haja vista que estas possibilitam determinar as interações entre os diversos fatores que afetam a produtividade e escolher as

soluções mais condizentes com a realidade regional, permitindo assim o manejo racional da irrigação em bases técnicas e econômicas (BERNARDO, 2004).

A função de produção é uma relação entre produto e fatores de produção que mostra a quantidade física de produto produzido a partir de dado conjunto de insumos, para dada tecnologia existente, por unidade de tempo, ou seja, descreve de forma gráfica ou estatística os produtos que deverão ser obtidos da combinação de diferentes quantidades de insumos (SILVA, 2000).

O termo função de produção é usualmente conceituado como a relação entre o rendimento das culturas e os fatores de produção (VALERO; MAÑAS, 1993). As funções de resposta podem ser utilizadas para se estimar o rendimento de uma cultura com a utilização de determinados níveis dos fatores de produção, bem como para se estimar os níveis ótimos dos fatores e o respectivo rendimento da cultura (PALÁCIOS, 1981).

De acordo com Aguiar (2005) a função de produção baseia-se na teoria de que o rendimento dos cultivos é afetado pelas variações do regime de umidade do solo, durante seu desenvolvimento. Desta forma, as funções de produção são desenvolvidas a partir de dados experimentais e são utilizadas na determinação de quanto irrigar.

Frizzone (1993) define função de resposta ou função de produção das culturas como sendo uma relação física entre as quantidades empregadas de certo insumo com as quantidades físicas máximas obtidas do produto, para uma determinada tecnologia conhecida. Considerando o grande número de variáveis que influenciam a produtividade das culturas e a complexidade das relações que influenciam tanto a quantidade quanto a qualidade do produto, essa produtividade pode ser representada exclusivamente em função de um único fator, como exemplo, a água aplicada quando se trata de irrigação, contanto que os demais fatores da produção permaneçam fixos, em níveis ótimos. Assim, ao se supor que a função representa o máximo que se pode obter com o uso de cada combinação de insumos, está se definindo uma relação funcional entre os insumos e o produto.

Na exploração da atividade agrícola o produtor decide qual tecnologia será utilizada em seu processo de produção, a qual é determinada pelos fatores, e pela escolha de insumos utilizados e suas respectivas quantidades (AGUIAR, 2005). A otimização no manejo da irrigação requer um conhecimento das funções de produção e do

consumo de água, mediante as quais o rendimento se relaciona com alguma medida do uso da água, por parte do cultivo (VALERO; MAÑAS, 1993).

Frizzone (1993) destaca duas estratégias ótimas de irrigação baseadas na análise econômica de funções de produção. A primeira é a disponibilidade da terra como exclusivo fator limitante da produção, ou seja, a água pode ser adquirida e aplicada com um custo unitário constante; para a regra de otimização agroeconômica, preconiza-se que a lâmina aplicada maximize a receita líquida por unidade de área. A segunda estratégia apresenta o fator água como único elemento que limita a produção.

Em regiões em que a disponibilidade de água é fator limitante à produção, faz-se necessário à otimização dos recursos hídricos disponíveis tendo em vista a maximização da receita líquida por unidade de volume de água aplicada. Nestes casos, a utilização de irrigação com déficit proporciona um maior retorno econômico do que a irrigação completa (ANDRADE JÚNIOR et al., 2001).

O conhecimento das funções de produção ou superfície de resposta é o instrumento ideal de análise, haja vista que permite determinar as interações entre fatores e escolher as soluções mais condizentes com a realidade local para o manejo racional da irrigação em bases técnica e econômica (MARTINS, 1998).

Muitas funções de produção obtidas experimentalmente são relações lineares. Uma razão possível é que a produtividade é associada linearmente com as taxas de evapotranspiração (DOORENBOS; KASSAN, 1979). Pode ocorrer também, durante a implantação do experimento, que os tratamentos não sejam escolhidos de forma a contemplar um domínio suficientemente amplo que possa possibilitar a obtenção de funções não lineares. Neste caso, é explorada a região da curva cuja resposta é linear (SANTOS JÚNIOR, 2011).

Frizzone e Andrade Junior (2005) abordam que as aplicações das funções de produção água-cultura são frequentemente criticadas por serem empíricas e específicas de um local e geralmente incompletas, encobrendo efeitos de muitos outros fatores e suas interações com a água. Contudo, Vaux e Pruitt (1983) e Howell et al. (1992), reforçam que estas funções são necessárias para prever, sob dadas condições de clima, cultivo e operação, as produtividades físicas marginais da água a serem empregadas nas análises econômicas.

Segundo Hexem e Heady (1978), os modelos estatísticos que descrevem uma função de produção mais comumente utilizada na análise econômica das pesquisas são: polinomial, raiz quadrada e potencial.

Quando, de forma experimental, se trabalha com uma grande amplitude dos níveis dos fatores de produção, o rendimento das culturas e a lâmina de água aplicada têm sido mais bem representados por uma relação do tipo quadrática (DANTAS NETO, 1994).

### **4.3. Planejamento e otimização dos recursos hídricos**

Diante das turbulências atuais no mundo e do cenário cada vez mais presente de mudanças climáticas e como consequência a escassez alimentar, destacam-se o uso restritivo e a disputa pela água entre os diversos segmentos da sociedade, tanto do ponto de vista regional quanto continental. Assim, a gestão e o manejo criterioso dos recursos hídricos são fundamentais, uma vez que estão relacionados à qualidade de vida da humanidade. Apesar do Brasil como um todo situar-se numa posição privilegiada, com disponibilidade de cerca de 12% da água doce do mundo, há áreas com acentuada escassez e conflitos. A visão de abundância de água é enganosa, haja vista a concentração de 74% da disponibilidade hídrica superficial situar-se na Amazônia, onde habitam somente 5% da população do país (ANA, 2007).

Segundo Paz et al. (2000), o planejamento dos recursos hídricos é indispensável no sentido de compatibilizar os múltiplos usos da água, viabilizando os distintos setores produtivos, supervisionando a quantidade e a qualidade dos recursos hídricos, melhorando os níveis de eficiência global de uso.

De maneira geral, o planejamento da utilização dos recursos hídricos tem o objetivo de impedir o agravamento de problemas relacionados ao uso de água, tanto de natureza ambiental, como o lançamento de efluentes nos corpos de água, como na prevenção do uso excessivo da água (MACEDO, 1995). A bacia hidrográfica tem sido adotada intencionalmente como unidade física territorial básica para o planejamento e a gestão de recursos naturais, principalmente hídricos. Sendo a água de um manancial o resultado da drenagem de sua bacia, sua qualidade e, portanto suas características físicas, químicas, biológicas e ecológicas, encontram-se sempre na dependência direta das ações.

O uso de técnicas de pesquisa operacional na análise de sistemas de recursos hídricos tem sido consagrado desde o surgimento dos computadores pessoais. São várias as categorias de algoritmos que podem ser utilizados. Em muitas situações, os problemas de tomada de decisão em engenharia de recursos hídricos referem-se à alocação eficiente da água e podem ser modelados e formulados como problemas de otimização. O grande número de variáveis, as não linearidades, a natureza estocástica dos fluxos, os conflitos provocados pelos múltiplos usos da água, a operação integrada de vários reservatórios e as restrições envolvidas, constituem um sistema hídrico complexo (SCHARDONG et al., 2010).

Técnicas de otimização têm sido empregadas nas recentes décadas para tratar problemas de planejamento e manejo de sistemas de recursos hídricos. Os modelos de otimização são baseados em algum tipo de técnica de programação matemática, que incluem uma variedade de algoritmos, cuja escolha depende das características do sistema a ser analisado, da disponibilidade de dados e dos objetivos e restrições do problema (YEH, 1985).

Quando um agricultor procura otimizar seus recursos, em meio as alternativas de produção disponíveis, ele deve escolher a mais eficiente no emprego dos recursos produtivos e a que mais atenda a certos objetivos pré-estabelecidos. Nas situações em que a tomada de decisão está relacionada à alocação de recursos escassos, são necessários métodos eficientes que auxiliem o planejador no processo decisório. Para resolver esse tipo de problema, os modelos matemáticos são os mais indicados, capazes de quantificar de maneira ótima o uso dos recursos limitados (terra, água, capital, mão-de-obra, equipamentos, tempo, etc.), maximizando algum índice de desempenho ou minimizando alguma medida de custo (FRIZZONE, 1995).

Segundo Silva Neto e Stulp (2000), com vistas ao planejamento, a aplicação de modelos determinísticos torna-se condicionalmente limitada em empreendimentos agrícolas em virtude das condições de risco perante as quais estes se desenvolvem. Isto sugere que não se despreze, na maioria dos casos, a casualidade de determinados coeficientes e que se introduza um estudo do risco na avaliação do projeto.

De acordo com Velez (1977), a distribuição irregular dos recursos hídricos e a escassez de recursos financeiros justificam o emprego de técnicas de programação matemática, as quais concedem aumentos nos lucros das áreas irrigadas. Em geral, quando se deseja produzir utilizando a irrigação, procura-se maximizar a receita

líquida sujeita às limitações de água, terra e mercado. Tal situação demonstra um problema de programação matemática, que pode ser linear ou não linear. Nas últimas décadas essa técnica da modelagem vem sendo utilizada em várias áreas da ciência e, com o progresso das ferramentas computacionais, cada vez mais se tem procurado utilizar instrumentos que maximizem os lucros e minimizem os custos, fazendo com que a otimização agrícola se torne uma área fascinante (BAIO et al., 2004; OJIMA; YAMAKAMI, 2006). Como a maior parte dos modelos matemáticos é solucionada através de computadores e os problemas originados são cada vez maiores e de complexa resolução, deve-se buscar técnicas mais eficientes para resolvê-los (JUSSIANI, 2004).

#### **4.3.1. Programação Linear**

Simonovic (1992) afirma que a programação linear (PL) é um dos métodos de otimização mais utilizados no planejamento dos recursos hídricos e é considerada, por muitos autores, como um dos avanços mais importantes da história científica no final do século XX. Seu grande emprego em pesquisa operacional ocorre devido a sua versatilidade e por aplicar embasamentos matemáticos pouco sofisticados, isto é, a análise e resolução de esquemas de equações lineares (LANZER, 1988).

O termo linear, como o próprio nome diz, refere-se à necessidade de haver relações lineares entre as variáveis, traduzidas pelas equações que caracterizam o problema. Mesmo quando as relações são não-lineares, a PL tem sido empregada com o auxílio de processos de linearização de funções ou através de um procedimento iterativo (SANTOS JUNIOR, 2011).

A PL foi estabelecida em 1947 pelo matemático americano George Bernard Dantzig para resolver problemas de logística da Força Aérea Americana. No campo de recursos hídricos, nos Estados Unidos, as primeiras aplicações ocorreram em meados de 1960, em trabalhos do “Harvard Water Resources Group”, em que se fez uma aplicação da programação linear a um problema de gestão de água subterrânea (ALMEIDA, 2001).

A aplicação da PL nos estudos de recursos hídricos pode variar desde problemas bem simples de distribuição direta de recursos hídricos até circunstâncias mais complexas como gerenciamento e operação de reservatórios. Em algumas ocasiões os

problemas não-lineares podem vir a ser linearizados e solucionados por iteração ou mecanismos de aproximação (YEH, 1985).

Segundo Dantas Neto (1994), em áreas irrigadas, onde inúmeras culturas em diferentes regimes de irrigação estão competindo por uma quantidade limitada de água, uma maneira de se escolher uma lâmina de água economicamente viável entre diferentes opções de lâminas de água existentes, é a utilização de técnicas que auxiliem na tomada de decisão, e a PL é uma excelente ferramenta para alocação ótima desses recursos.

Dantas Neto et al. (1997) estudando o padrão de cultivo do perímetro irrigado Senador Nilo Coelho, PE, empregando um modelo de programação linear, onde a função objetivo consistia em maximizar o rendimento líquido do projeto, usando as culturas mais tradicionalmente cultivadas no perímetro irrigado, sob regime de irrigação, concluíram que a técnica da PL se mostrou muito eficiente para fins de planejamento em áreas novas ou para aprimorar projetos de irrigação já em operação.

Carvalho et al. (2000) selecionaram algumas culturas, bem como os meses de plantio que acarretassem a maximização do lucro do agricultor e do emprego dos recursos hídricos no perímetro irrigado de Gorutuba, utilizando um modelo de PL, em que a função objetivo visava maximizar os rendimentos líquidos mensais em função da área plantada com as culturas tradicionalmente cultivadas na região.

Curi et al. (2005) aplicaram a técnica de PL para a maximização da receita líquida sob condições de variantes hídricas e econômicas em um perímetro irrigado no sertão da Paraíba, considerando, inclusive, a interferência do custo da água bruta na viabilidade da produção das culturas.

Santos et al. (2009), utilizando um modelo de PL, visaram otimizar o uso da água no Perímetro de Irrigação do Baixo Acaraú, CE. O modelo objetivava à maximização do retorno financeiro do pequeno produtor, aliando com as restrições de disponibilidade de terra, água e mercado, e concluíram que a disponibilidade de água não se mostrou limitante quanto ao uso da terra na maioria dos planos de cultivo estudados, sendo limitante quanto ao uso da terra apenas quando restrita a 60% de sua disponibilidade.

Tavares et al. (2011) analisaram o padrão de cultivo em uma fazenda com o intuito de otimizar do uso de recursos hídricos e de maximizar o retorno financeiro no agreste pernambucano e obtiveram planos ótimos de cultivo para os padrões estudados utilizando a técnica da PL.



Delgado et al. (2012) construíram um modelo de programação matemática com o objetivo de aumentar a receita líquida em função de limitações de terra e água no município de Campos dos Goytacazes no estado do Rio de Janeiro, empregando funções de resposta água-cultura para das culturas do maracujá, cana-de-açúcar, mamão e abacaxi. Este estudo também objetivou fazer uma comparação entre duas metodologias que gerassem aumento do retorno financeiro em diferentes padrões de cultivos.

Segundo Dantas Neto (1994), os problemas baseados em PL caracterizam-se pelo estabelecimento de relações lineares. As características gerais de um problema de PL estabelecem-se mediante um modelo matemático cuja forma é a seguinte: considere  $n$  variáveis não-negativas  $X_j$  ( $j=1, 2, 3... n$ ) e uma função linear  $Z$  destas variáveis que deve ser maximizada segundo a forma das equações (1), (2) e (3):

$$\text{MAX } Z = C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n \quad (1)$$

Sujeito às restrições:

$$\begin{aligned} a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1n}X_n &\leq b_1 \\ a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2n}X_n &\leq b_2 \\ \cdot & \\ \cdot & \\ \cdot & \\ a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \dots + a_{mn}X_n &\leq b_m \end{aligned} \quad (2)$$

$$X_1 \geq 0; X_2 \geq 0; \dots X_n \geq 0; \quad (3)$$

A equação 1, denominada função objetivo, representa a variável que se deseja otimizar. Nos casos de maximização,  $Z$  representa usualmente a receita monetária, lucro, benefício, taxa de retorno do capital, etc. Nos casos de minimização  $Z$  representa geralmente custos ou benefícios. As variáveis  $X_1, X_2, \dots, X_n$  são chamadas de variáveis de decisão do problema. A programação linear procura os valores de  $X_i$  (quando esses valores existirem) de modo a se atingir o máximo da função  $Z$ .

As restrições apresentadas pelas equações 2, indicam limitações de maneira geral, sejam elas físicas, de recursos humanos, monetários, etc. As constantes  $b_1, b_2, \dots, b_n$  representam o nível máximo que se pode atingir para cada um dos recursos.

Para Baltra (1982), os modelos de PL nos projetos de irrigação podem ser utilizados no planejamento econômico para otimização de planos de culturas, e uso de recursos, podendo-se utilizar como função objetivo fatores como: maximização do lucro, minimização do uso da mão-de-obra, otimização do uso da água, otimização do uso de máquinas agrícolas, usando algumas restrições como: volume de água disponível, demanda de água pelas culturas, custo de produção, disponibilidade de terra, receita líquida e custos de mercado.

#### **4.3.2. Programação Não-Linear**

A programação não-linear (PNL) caracteriza-se por não possuir um método geral para resolução dos seus problemas, como o método simplex na programação linear. Seu processo de otimização requer um pouco mais de atenção, quando comparado com outros métodos, uma vez que a matemática envolvida nos modelos não-lineares é muito mais complicada do que nos casos de programação linear (YEH, 1985).

A PNL, na sua formulação, é semelhante à formulação geral da programação linear, consistindo em uma função objetivo e um conjunto de restrições. A programação não-linear caracteriza-se por não ter requisitos de linearidade que a programação linear exige (SANTOS JUNIOR, 2011).

Chiang (1982) afirma que a PNL difere da programação linear em pelo menos cinco aspectos, alguns deles relacionados entre si, ou seja: o campo de escolha abrange toda região possível, não somente o conjunto de seus pontos extremos; o número de restrições que são exatamente satisfeitas pode ser igual ao número de variáveis de escolha; um deslocamento contínuo em uma direção uniforme pode não conduzir a valores continuamente crescentes (ou decrescentes) da função objetivo; a região possível pode não ser um conjunto convexo; um ótimo local pode não ser um ótimo global.

Mateus e Luna (1986), apresentam outra característica da PNL, que seria a inexistência de critérios absolutos para comparação entre os vários algoritmos existentes. O que se faz é comparar algumas características não definidas precisamente, tais como: simplicidade computacional, tempo de máquina necessário para atingir um ponto ótimo a partir de um ponto inicial qualquer, memória necessária para rapidez de convergência, sensibilidade a erros computacionais.

A complexidade da PNL aumenta consideravelmente quando a mesma é comparada à programação linear. Entretanto, é preferível a utilização desta técnica a aplicação de outras técnicas de programação, por se tratar de um caso mais genérico que pode representar mais fielmente os processos físicos que são majoritariamente não lineares (MELO, 2004).

Cirilo (1997) classifica a técnica da PNL em técnicas analíticas e em técnicas de busca numérica. As técnicas analíticas são os métodos que buscam determinar soluções ótimas através da resolução de equações, com o auxílio de derivadas. Essa otimização pode ser abreviada à procura das raízes desses sistemas. Por sua vez, as técnicas de busca numérica compõem métodos que utilizam informações passadas, em um processo dinâmico, a fim de gerar soluções ótimas no processo de otimização. Este procedimento de otimização consente, ainda, a aplicação de métodos numéricos para solucionar problemas para os quais não se conhece uma solução analítica.

Os maiores problemas da PNL relacionam-se à incerteza, em diversos casos, de que a solução ótima encontrada trata-se realmente da melhor solução entre todas (ótimo local ao contrário de ótimo global). A grande vantagem é justamente a sua abrangência (CIRILO, 1997).

Dentre alguns autores que realizaram pesquisas utilizando a PNL pode-se citar: Carvallo et al. (1998), que criaram um modelo de PNL para a determinação de um padrão de cultivo ótimo para a agricultura irrigada. Os resultados mostraram que alterações de preços de produtos exportáveis e o custo da água tem um grande impacto nos padrões de cultivo e no lucro. Sinha et al. (1999), fizeram uso de um modelo de otimização não-linear para estudo de sistema de reservatórios com múltiplas finalidades, concluindo que o modelo levou a uma diminuição no armazenamento de água do sistema e no custo de desenvolvimento.

Saad e Frizzone (1996) basearam-se no conjunto de equações proposto por Holzapfel et al. (1990) para formularem um modelo de PNL para maximização da receita líquida de culturas irrigadas por sistemas de irrigação localizada, aplicável a áreas regulares com declividade uniforme e que considerasse o critério de uniformidade de emissão na definição da unidade operacional. Tal modelo mostrou-se adequado quando utilizado na determinação da configuração, dimensionamento de sistemas de irrigação em pomares de laranja irrigada, na região de Limeira, SP.

Os modelos de PL e PNL desenvolvidos até então, tem-se caracterizado por serem determinísticos. Desta forma, quando se maximiza a receita líquida adota-se um único valor para representar o preço da cultura, o que é válido desde que a distribuição de probabilidade do parâmetro apresente pequena dispersão em torno da estimativa adotada, caso contrário, a solução ótima definida pelo modelo determinístico poderá diferir significativamente da verdadeira solução ótima, ou seja, aquela que só pode ser obtida “a posteriori”, quando os elementos probabilísticos já tiverem assumido característica do evento ocorrido (LANZER, 1988, apud SAAD, 2002).

## **5. MATERIAL E MÉTODOS**

Esta pesquisa está vinculada ao projeto “Avaliação dos recursos hídricos na sub-bacia hidrográfica do Boi Branco, SP, para capacitação e gestão sustentável da agricultura irrigada”, que é uma cooperação entre a Faculdade de Ciências Agrônomicas, FCA/UNESP, campus de Botucatu, a Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, ETSIA/UPM, em Madri, Espanha, e a Associação do Sudoeste Paulista de Irrigantes e Plantio na Palha, ASPIPP, em Paranapanema, SP, financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, Programa PVE - projeto N° 063/2012.

### **5.1. Caracterização da área**

A fazenda Olhos D'Água está situada a sudoeste do estado de São Paulo, nas coordenadas 48°52'40"W e 23°34'00"S, com altitude média de 701 metros. A propriedade está inserida na sub-bacia do Boi Branco, que se destaca pelo elevado uso agrícola de seus recursos e é pertencente à Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema.

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima da região é do tipo Cwa, caracterizado como clima temperado úmido, apresentando inverno seco, e chuvas no verão. Esse clima abrange toda a parte central do estado de São Paulo (MIRANDA et al., 2014). A precipitação média anual é de 1380 mm, sendo os meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março os mais chuvosos, e os meses de junho, julho e agosto os que apresentam um menor volume de chuva. A temperatura média anual é de

21°C, apresentando temperaturas inferiores a 18°C nos meses de inverno e superiores a 22°C no verão (SALES, 2014).

O solo da região é classificado como Latossolo vermelho Álico, Distrófico e Eutrófico típico, de textura argilosa e muito argilosa, e latossolo vermelho eutrófico, ambos com horizonte A moderado e de textura argilosa a muito argilosa, apresentando percentuais de 57% de argila, 27% de silte e 16% de areia. A declividade do terreno varia entre 6 a 12% (ASPIPP/FEHIDRO, 2011).

A área total da fazenda é de 805 ha, sendo 509 ha irrigados por pivô central. Apresenta-se na Tabela 1 a distribuição, em hectares, da área total irrigada por pivô e na Figura 1 pode-se observar o croqui da fazenda com distribuição dos pivôs em sua área.

Tabela 1. Identificação dos pivôs e sua área irrigada na fazenda Olhos D' Água.

Pivô	Área irrigada (ha)
01	146
02	63
03	126
04	20
05	44
06	25
07	25
08	60
Total	509

A água utilizada para a irrigação é proveniente de um reservatório com capacidade de armazenamento de 600.000 m<sup>3</sup>. Para abastecer esse reservatório a água é captada do córrego do Boi Branco, sendo que seu curso adentra a área da fazenda.

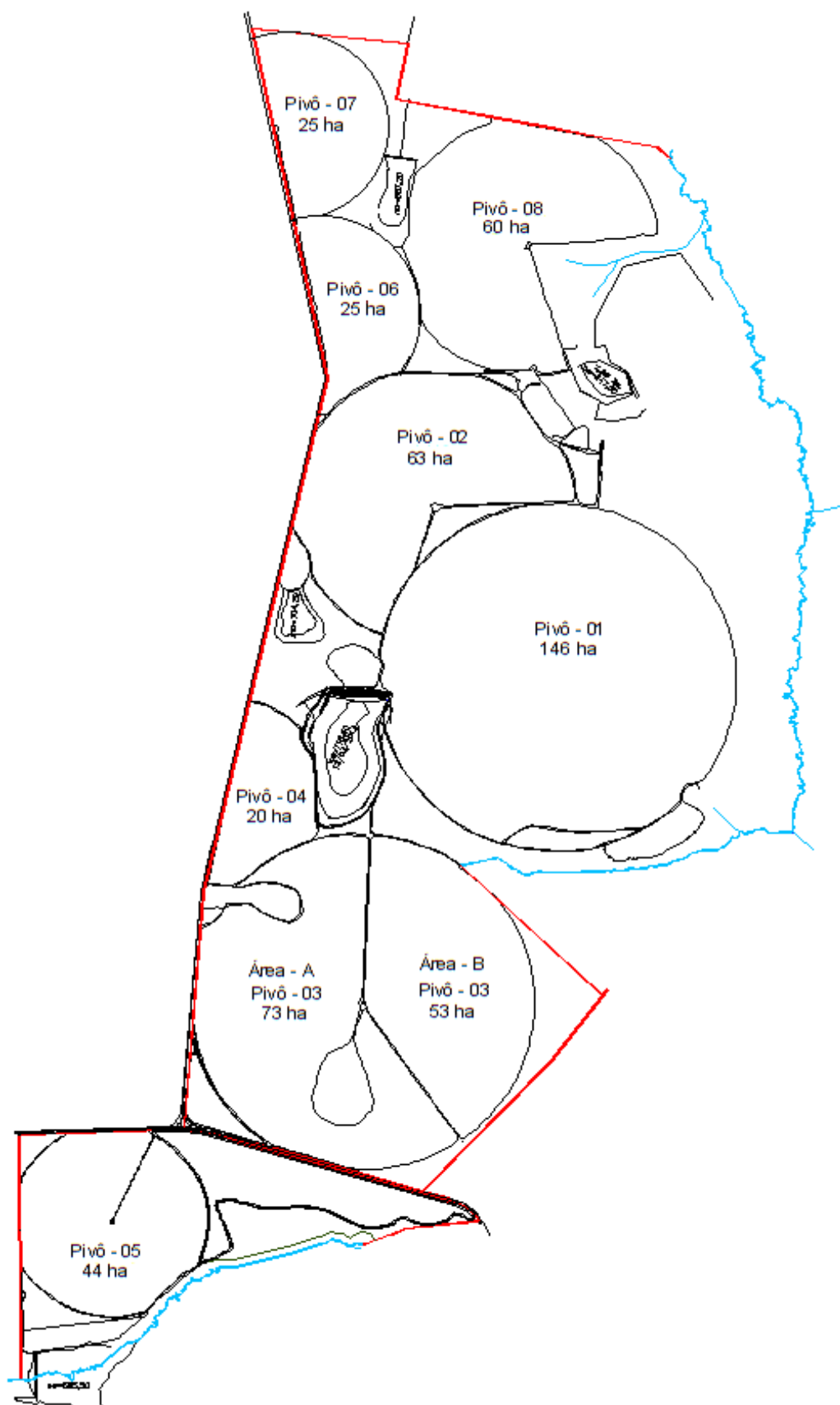


Figura 1. Croqui da fazenda Olhos D'água em Paranapanema, SP, com a identificação dos pivôs.

## 5.2. Modelo de otimização

Para se comprovar a hipótese formulada foi empregado um modelo matemático utilizando a técnica da programação não-linear, baseado nos dados coletados com a administração da fazenda Olhos D'água para o ano agrícola 2013/2014. Procurou-se formular o modelo com fidelidade às características de exploração da área, permitindo determinar os melhores planos de cultivo.

O modelo consiste de uma função objetivo que está sujeita às restrições de uso dos recursos terra e água, assim como restrições na produção das culturas, tendo como objetivo a maximização da soma dos benefícios líquidos decorrentes da produção das culturas.

$$\begin{aligned} \text{MAX RL} = & [((\text{PF} \cdot \text{YFRF}) - \text{CPF}) \text{X}10] + [((\text{PM} \cdot \text{YFRM}) - \text{CPM}) \text{X}20] + & (4) \\ & [((\text{PS} \cdot \text{YFRS}) - \text{CPS}) \text{X}30] + [((\text{PS} \cdot \text{YFRS}) - \text{CPS}) \text{X}40] + [((\text{PA} \cdot \\ & \text{YFRA}) - \text{CPA}) \text{X}50] \end{aligned}$$

Em que:

MAX RL – Maximização da receita líquida (R\$);

PF – Preço do feijão (R\$ kg<sup>-1</sup>);

PM – Preço do milho (R\$ kg<sup>-1</sup>);

PS – Preço da soja (R\$ kg<sup>-1</sup>);

PA – Preço do algodão (R\$ kg<sup>-1</sup>);

YFRF – Produtividade do feijão obtida com a função de resposta dessa cultura a água de irrigação (kg ha<sup>-1</sup>);

YFRM – Produtividade do milho obtida com a função de resposta dessa cultura a água de irrigação (kg ha<sup>-1</sup>);

YFRS – Produtividade da soja obtida com a função de resposta dessa cultura a água de irrigação (kg ha<sup>-1</sup>);

YFRA – Produtividade do algodão obtida com a função de resposta dessa cultura a água de irrigação (kg ha<sup>-1</sup>);

CPF – Custo da produção (diretos e indiretos), durante o ciclo da cultura do feijão (R\$ ha<sup>-1</sup>);



CPM – Custo da produção (diretos e indiretos), durante o ciclo da cultura do milho (R\$ ha<sup>-1</sup>);

CPS – Custo da produção (diretos e indiretos), durante o ciclo da cultura da soja (R\$ ha<sup>-1</sup>);

CPA – Custo da produção (diretos e indiretos), durante o ciclo da cultura do algodão (R\$ ha<sup>-1</sup>);

X10 – Área plantada com feijão em julho (ha);

X20 – Área plantada com milho em janeiro (ha);

X30 – Área plantada com soja em setembro (ha);

X40 – Área plantada com soja em dezembro (ha);

X50 – Área plantada com algodão em novembro (ha);

### **5.3. Determinação dos parâmetros do modelo**

#### **5.3.1. Padrão de cultivo**

Foram consideradas todas as culturas implantadas no ano agrícola 2013/2014. Segundo informações da administração da propriedade, estas culturas obedecem a um padrão anual de implantação, que vem se repetindo ao longo dos últimos anos. Na Tabela 2, encontra-se o padrão de ocupação mensal dessas culturas comumente adotado pela administração da propriedade.

Tabela 2. Calendário de cultivo da fazenda Olhos D'Água.

Mês	Algodão	Feijão	Milho	Soja
Janeiro	X50		*X20	X40
Fevereiro	X50		X20	X40
Março	X50		X20	X40
Abril	X50		X20	
Maio			X20	
Junho				
Julho		*X10		
Agosto		X10		
Setembro		X10		*X30
Outubro		X10		X30
Novembro	*X50			X30
Dezembro	X50			X30 *X40

\* Mês de plantio.

Este calendário de cultivo leva em consideração todas as restrições de cultivo, como meses com maior susceptibilidade às doenças e pragas, fotoperíodo, geada, disponibilidade de água para irrigação, entre outros fatores.

### 5.3.2. Preço de mercado e custo de produção para as culturas estudadas

Na Tabela 3 encontram-se os valores médios de mercado da produção agrícola para a região de Paranapanema, SP e o custo médio de produção das quatro culturas implantadas na fazenda Olhos D'Água, fornecidos pelo produtor. Dentro do custo médio de produção estão embutidos os gastos diretos e indiretos como máquinas, depreciação do pivô, mão de obra, insumos sintéticos químicos, bombeamento da água para irrigação, entre outros. Esses valores foram considerados fixos no modelo por se tratarem de valores médios.

Tabela 3. Valor médio de venda dos produtos agrícolas (R\$ kg<sup>-1</sup>) na região de Paranapanema, SP para o ano agrícola de 2013/2014, e custo médio da produção (R\$ ha<sup>-1</sup>) para as culturas implantadas na fazenda Olhos D'água.

Culturas	Valor de mercado para as culturas (R\$ kg <sup>-1</sup> )	Custo médio da produção (R\$ ha <sup>-1</sup> )
Algodão	4,10	5.671,16
Feijão	1,71	4.669,37
Milho	0,43	3.361,77
Soja	1,05	3.628,32

### 5.3.3. Função de resposta das culturas a água

Por serem especialmente importantes no planejamento da irrigação, as funções de produção água-cultura constituem um artifício básico de decisão dos planos de desenvolvimento e operação da irrigação, pois permitem a tomada de decisões sobre planos ótimos de cultivo e ocupação de área, visando à produção econômica com base na água disponível.

As funções de resposta água-cultura foram inseridas diretamente no modelo de PNL, permitindo que este calculasse a melhor opção de lâmina, dada às condições de disponibilidade dos recursos terra e água. Para esta pesquisa, foram utilizadas funções de resposta água-cultura publicadas na literatura, porém não desenvolvidas para área de estudo, pois apesar da região ser um grande polo produtor, ainda existe uma grande carência de dados e pesquisas relacionadas à produtividade das culturas. No entanto, foi dada preferência para as funções desenvolvidas em regiões próximas ou as que mais se ajustaram ou puderam ser ajustadas aos dados fornecidos pela propriedade. Na Tabela 4 são apresentadas as funções utilizadas neste trabalho.

Tabela 4. Funções de resposta das culturas à água utilizadas no modelo de programação não-linear.

CULTURA	EQUAÇÕES	FONTE
1. Algodão	$Y = -0,0048W^2 + 5,3887W - 267,36$	ARAÚJO et al. (2013)
2. Feijão	$Y = -0,0314W^2 + 31,696W - 3745,3$	CRUZ et al. (2012)
3. Milho	$Y = -10472,43 + 112,10W - 0,1438W^2$	OLIVEIRA, (1993)
4. Soja	$Y = -0,0195W^2 + 16,007W + 586,55$	GOMES, (2011)

Y = Produtividade (kg ha<sup>-1</sup>); W = Lâmina de água (mm).

### 5.3.4. Requerimento mensal de água

No modelo estudado, as funções de resposta água-cultura utilizam lâminas de água para todo o ciclo das culturas, ou seja, lâminas totais, porém, há necessidade de estimar o requerimento mensal de água de cada uma delas. Para calcular os coeficientes de requerimento mensal de água, fez-se necessário encontrar um fator mensal de proporcionalidade  $F_i$ , que é um fator que relaciona o requerimento mensal e a lâmina total dada pela função de resposta para o fator água.

Para o cálculo das necessidades mensais de água para as culturas foram estimados valores mensais de evapotranspiração de referência pelo método de Thornthwaite (1948), apresentado na equação 5. Essa metodologia foi escolhida em função dos dados climáticos disponíveis.

$$ETp = 16 * (10 * Tm / I)^a \quad (5)$$

em que:  $ETp$  é a evapotranspiração potencial ou de referência (mm mês<sup>-1</sup>);  $Tm$  a temperatura média mensal (°C);  $I$  e  $a$  são índices térmicos, que podem ser calculados pelas equações 6 e 7 respectivamente.

$$I = \sum_{n=1}^{12} (0,2 * Tm)^{1,514} \quad (6)$$

$$a = 6,75 * 10^{-7} I^3 - 7,71 * 10^{-5} I^2 + 1,7912 * 10^{-2} I + 0,49239 \quad (7)$$

Os valores de evapotranspiração de referência estimados pelo método de Thornthwaite são representativos para um mês com 30 dias, em que cada dia teria 12 horas de fotoperíodo, necessitando assim de uma correção em função do fotoperíodo e da latitude do local. Esta correção pode ser feita utilizando as equações 8 e 9.

$$ET_o = ET_p * Cor \quad (8)$$

$$Cor = (ND / 30) * (N / 12) \quad (9)$$

em que: *ND* é o número de dias do mês e *N* o fotoperíodo do dia que pode ser calculado ou tabelado. Nesta pesquisa, foram utilizados valores de *N* tabelados em função da latitude e do mês, mostrados na Tabela 5.

Tabela 5. Duração máxima da insolação diária (FOTOPERÍODO – N), em horas, no 15º dia de cada mês, em latitudes compreendidas na área do trabalho.

Lat (°)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
22	13,4	12,8	12,2	11,6	11,1	10,8	10,9	11,3	12,0	12,6	13,2	13,5
24	13,5	12,9	12,3	11,5	10,9	10,7	10,8	11,2	11,9	12,6	13,3	13,6

FONTE: Pereira et al. (2007).

Os valores estimados de evapotranspiração de referência são apresentados na Tabela 6, bem como os dados de temperatura máxima, mínima e média fornecidos pela propriedade.

Tabela 6. Dados de temperatura máxima (T max), mínima (T min) e média (T med), evapotranspiração de referência (ETo), para o período de julho de 2013 a junho de 2014, da fazenda Olhos D'Água, Paranapanema, SP.

Meses	T max (°C)	T min (°C)	T med (°C)	ETo (mm)
Jul/13	24,37	14,4	19,27	54,1
Ago/13	29,21	14,8	21,91	78,9
Set/13	29,65	17,2	23,11	93,5
Out/13	30,06	18,1	23,88	111,6
Nov/13	30,79	17,2	24,25	118,7
Dez/13	32,22	18,7	25,47	142,9
Jan/14	30,92	17,5	24,22	124,1
Fev/14	31,35	18,9	25,13	118,2
Mar/14	28,59	17,8	23,22	101,1
Abr/14	28,89	15,5	22,2	81,2
Mai/14	27,08	13,3	20,27	62,4
Jun/14	23,94	13,8	18,86	49,0

Os valores mensais de evapotranspiração da cultura (ETc) foram calculados em seguida com base na evapotranspiração de referência e nos coeficientes de cultura (Kc) (Equação 10).

$$ETc = ETo * Kc \quad (10)$$

em que: Kc é o coeficiente de cultivo (adimensional).

Os valores referentes aos coeficientes de cultivo (Kc) foram obtidos de Doorenbos e Kassam (1994) e podem ser visualizados na Tabela 7.

Tabela 7. Coeficientes de cultura (Kc), segundo o Boletim FAO 24.

Culturas	Estádios de Desenvolvimento da Cultura				
	(I)	(II)	(III)	(IV)	(V)
Algodão	0,4 – 0,5	0,7 – 0,8	1,05 – 1,25	0,8 – 0,9	0,65 – 0,7
Feijão	0,3 – 0,4	0,7 – 0,8	1,05 – 1,2	0,65 – 0,75	0,25 – 0,3
Milho	0,3 – 0,5	0,8 – 0,85	1,05 – 1,2	0,8 – 0,95	0,55 – 0,6
Soja	0,3 – 0,4	0,6 – 0,8	1,0 – 1,15	0,7 – 0,8	0,4 – 0,5

Os valores de ETc para as quatro culturas implantadas na fazenda Olhos D'água são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Dados de evapotranspiração mensal da cultura para o período de julho de 2013 a junho de 2014, na fazenda Olhos D'Água, Paranapanema, SP.

Meses	ETc (mm mês <sup>-1</sup> )			
	Algodão	Feijão	Milho	Soja
Jul/13		19,84		
Ago/13		52,25		
Set/13		78,34		24,93
Out/13		60,06		77,22
Nov/13	58,86			129,49
Dez/13	113,43			99,25 49,62
Jan/14	174,82		58,27	131,12
Fev/14	140,13		108,28	140,13
Mar/14	130,57		143,63	83,09
Abr/14	53,66		72,82	
Mai/14			40,83	
Jun/14				

Após o cálculo da evapotranspiração da cultura, calculou-se o fator mensal de proporcionalidade  $F_i$ , cujo valor é determinado pela equação 11. Os valores calculados do fator  $F_i$  são apresentados na Tabela 9.

$$F_i = \frac{ETC_i}{ETC_{total}} \quad (11)$$

em que:  $ETC_i$  é a evapotranspiração máxima da cultura no mês  $i$  de estudo; e  $ETC_{total}$  a evapotranspiração da cultura durante todo o ciclo.

Tabela 9. Percentuais do fator  $F_i$  para o cálculo do requerimento mensal de água das culturas estudadas na fazenda Olhos D'Água, Paranapanema, SP.

Meses	Fator $F_i$ (%)				
	Algodão	Feijão	Milho	Soja	
Jul/13		9			
Ago/13		25			
Set/13		37		8	
Out/13		29		23	
Nov/13	9			39	
Dez/13	17			30	12
Jan/14	26		14		32
Fev/14	21		26		35
Mar/14	19		34		21
Abr/14	8		17		
Mai/14			10		
Jun/14					

#### 5.4. Restrições de terra, água e produção das culturas.

O modelo está sujeito às restrições de terra, água e condições de produção das culturas, as quais expressam as características de exploração da área.

##### 5.4.1. Recurso Terra

As restrições de terra são apresentadas nas equações 12 a 22 e correspondem à combinação das culturas nos 12 meses do ano e determinam que a



ocupação da área deva ser menor ou igual à área disponível. Atualmente a área explorada pela fazenda Olhos D'água é de 509 ha.

$$\text{AJAN} \quad X_{20} + X_{40} + X_{50} \leq 509 \quad (12)$$

$$\text{AFEV} \quad X_{20} + X_{40} + X_{50} \leq 509 \quad (13)$$

$$\text{AMAR} \quad X_{20} + X_{40} + X_{50} \leq 509 \quad (14)$$

$$\text{AABR} \quad X_{20} + X_{50} \leq 509 \quad (15)$$

$$\text{AMAI} \quad X_{20} \leq 509 \quad (16)$$

$$\text{AJUL} \quad X_{10} \leq 509 \quad (17)$$

$$\text{AAGO} \quad X_{10} \leq 509 \quad (18)$$

$$\text{ASET} \quad X_{10} + X_{30} \leq 509 \quad (19)$$

$$\text{AOUT} \quad X_{10} + X_{30} \leq 509 \quad (20)$$

$$\text{ANOV} \quad X_{30} + X_{50} \leq 509 \quad (21)$$

$$\text{ADEZ} \quad X_{30} + X_{40} + X_{50} \leq 509 \quad (22)$$

em que: AJAN, AFEV, AMAR, AABR, AMAI, AJUL, AAGO, ASET, AOUT, ANOV, ADEZ, representam respectivamente as áreas irrigadas nos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio, julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro, respectivamente. O mês de junho para o ano agrícola de 2013/2014 esteve sem cultivo.

#### 5.4.2. Recurso Água

As disponibilidades hídricas mensais e anual são dependentes do volume de precipitação. Com os dados de precipitação média mensal foram calculadas as precipitações efetivas pelo método proposto pelo USDA (Soil Conservation Service - USDA-SCS) (CLARKE, 1998 apud BARBOSA et al., 2005), utilizando as equações 23 e 24.

$$Pe = \frac{P * (125 - 0,2 * P)}{125}; \text{ para } P < 250 \text{ mm} \quad (23)$$

$$Pe = 125 + 0,1 * P ; \text{ para } P \geq 250 \text{ mm} \quad (24)$$

em que:  $Pe$  e a precipitação efetiva ( $\text{mm mês}^{-1}$ ) e  $P$  a precipitação mensal ( $\text{mm mês}^{-1}$ ).

Na Tabela 10 são apresentados os dados de precipitação para o período de julho de 2013 a junho de 2014, da fazenda Olhos D'Água, bem como a precipitação efetiva.

Tabela 10. Dados precipitação (Precip.) e precipitação efetiva (Pe) para o período de julho de 2013 a junho de 2014, da fazenda Olhos D'Água, Paranapanema, SP.

Meses	Precip. (mm)	Pe (mm)
Jul/13	16	15,59
Ago/13	0	0
Set/13	168	122,84
Out/13	38	35,69
Nov/13	105	87,36
Dez/13	137	106,97
Jan/14	32	30,36
Fev/14	92	78,46
Mar/14	176	126,44
Abr/14	18	17,48
Mai/14	89	76,33
Jun/14	0	0

O volume total anual para o ano agrícola 2013/2014 foi o somatório do volume aplicado via irrigação com o volume de precipitação efetiva, totalizando 5.258.725 m<sup>3</sup>. Os valores mensais de água disponível ao consumo dos cultivos são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. Volume mensal de água disponível, (Precipitação efetiva + irrigação) em m<sup>3</sup>, para o ano agrícola de 2013/2014.

Volume mensal de água (m <sup>3</sup> )			
Janeiro	274.198	Julho	155.533
Fevereiro	609.577	Agosto	233.034
Março	678.427	Setembro	826.883
Abril	96.181	Outubro	391.828
Maio	508.158	Novembro	668.771
Junho	-	Dezembro	816.134

Considerando o recurso água, as equações 25 a 36 asseguram que em nenhum mês do ano a demanda de água consumida pelas culturas será maior que o volume de água disponível.

$$\text{WJAN} \quad X_{20} * ((0,14 * \text{WM}) * 10) + X_{40} * ((0,32 * \text{WS}) * 10) + X_{50} * ((0,26 * \text{WA}) * 10) \leq \text{VDJAN} \quad (25)$$

$$\text{WFEV} \quad X_{20} * ((0,26 * \text{WM}) * 10) + X_{40} * ((0,35 * \text{WS}) * 10) + X_{50} * ((0,21 * \text{WA}) * 10) \leq \text{VDFEV} \quad (26)$$

$$\text{WMAR} \quad X_{20} * ((0,34 * \text{WM}) * 10) + X_{40} * ((0,21 * \text{WS}) * 10) + X_{50} * ((0,19 * \text{WA}) * 10) \leq \text{VDMAR} \quad (27)$$

$$\text{WABR} \quad X_{20} * ((0,17 * \text{WM}) * 10) + X_{50} * ((0,08 * \text{WA}) * 10) \leq \text{VDABR} \quad (28)$$

$$\text{WMAI} \quad X_{20} * ((0,10 * \text{WM}) * 10) \leq \text{VDMAI} \quad (29)$$

$$\text{WJUL} \quad X_{10} * ((0,09 * \text{WF}) * 10) \leq \text{VDJUL} \quad (30)$$

$$\text{WAGO} \quad X_{10} * ((0,25 * \text{WF}) * 10) \leq \text{VDAGO} \quad (31)$$

$$\text{WSET} \quad X_{10} * ((0,37 * \text{WF}) * 10) + X_{30} * ((0,08 * \text{WS}) * 10) \leq \text{VDSET} \quad (32)$$

$$\text{WOUT} \quad X_{10} * ((0,29 * \text{WF}) * 10) + X_{30} * ((0,23 * \text{WS}) * 10) \leq \text{VDOUT} \quad (33)$$

$$\text{WNOV} \quad X_{30} * ((0,39 * \text{WS}) * 10) + X_{50} * ((0,09 * \text{WA}) * 10) \leq \text{VDNOV} \quad (34)$$

$$\text{WDEZ} \quad X_{30} * ((0,30 * \text{WS}) * 10) + X_{40} * ((0,12 * \text{WS}) * 10) + X_{50} * ((0,17 * \text{WA}) * 10) \leq \text{VDDEZ} \quad (35)$$

$$\text{WTOTAL} \quad X_{10} * (\text{WF} * 10) + X_{20} * (\text{WM} * 10) + X_{30} * (\text{WS} * 10) + X_{40} * (\text{WS} * 10) + X_{50} * (\text{WA} * 10) \leq \text{VAD} \quad (36)$$

em que: WJAN, WFEV, WMAR, WABR, WMAI, WJUL, WAGO, WSET, WOUT, WNOV e WDEZ representam o volume de água mensal, em m<sup>3</sup>, consumido nos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio, julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro, em m<sup>3</sup> respectivamente; WTOTAL representa o volume total de água consumido durante o ano, em m<sup>3</sup>; VDJAN, VDFEV, VDMAR, VDABR, VDMAI, VDJUL, VDAGO, VDSET, VDOUT, VDNNOV e VDDEZ representam os volumes disponíveis em janeiro, fevereiro, março, abril, maio, julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro, em m<sup>3</sup> respectivamente; VAD, volume anual de água disponível, em m<sup>3</sup> e WF, WM, WS e WA são valores das lâminas de água (mm) para as culturas do feijão, milho, soja e algodão respectivamente. A equação 36 restringe o uso de água total anual pelas culturas à água disponível.

Posteriormente à análise para a condição atual, simulou-se cinco valores para VAD: 6.573.406 m<sup>3</sup>; 4.732.852 m<sup>3</sup>; 3.944.044 m<sup>3</sup>; 3.155.235 m<sup>3</sup> e 2.629.362 m<sup>3</sup>, que representam, respectivamente, 125%, 90%, 75%, 60% e 50% do valor anual de água disponível, que podem vir a ocorrer em função da disponibilidade hídrica da região. Os valores mensais de água para os cinco volumes estudados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12. Volumes mensais de água disponível (m<sup>3</sup>) para os cinco valores de VAD.

MESES	125%	90%	75%	60%	50%
Janeiro	342.746	246.777	205.648	164.518	137.098
Fevereiro	761.971	548.619	457.182	365.746	304.788
Março	848.034	610.584	508.820	407.056	339.213
Abril	120.226	86.563	72.136	57.708	48.090
Maio	635.197	457.342	381.118	304.895	254.079
Junho	149.571	107.691	89.742	71.794	59.828
Julho	194.416	139.979	116.649	93.319	77.766
Agosto	291.292	209.730	174.775	139.820	116.517
Setembro	1.033.603	744.194	620.162	496.129	413.441
Outubro	489.785	352.645	293.871	235.096	195.914
Novembro	835.964	601.894	501.578	401.262	334.385
Dezembro	1.020.167	734.520	612.100	489.680	408.067

### 5.4.3. Produção das culturas

Para a restrição de produção das culturas, as equações 37 a 41 asseguram que o padrão de cultivo a ser formulado pelo modelo obedeça às condições de áreas mínimas e máximas determinadas pela administração da fazenda.

$$\text{MINALG} \quad X_{50} \geq 60 \text{ ha} \quad (37)$$

$$\text{MINFEI} \quad X_{10} \geq 20 \text{ ha} \quad (38)$$

$$\text{MAXFEI} \quad X_{10} \leq 456 \text{ ha} \quad (39)$$

$$\text{MINMIL} \quad X_{20} \geq 20 \text{ ha} \quad (40)$$

$$\text{MINSOJ-1} \quad X_{30} \geq 20 \text{ ha} \quad (41)$$

em que: MINALG é a área mínima a ser cultivada com algodão em novembro; MINFEI é a área mínima a ser cultivada com feijão em julho; MAXFEI é a área máxima que pode ser cultivada com feijão em julho; MINMIL é a área mínima a ser cultivada com milho em janeiro; MINSOJ-1 é área mínima a ser cultivada com soja em setembro.

### 5.5. Software utilizado

Para se chegar à solução do problema foi utilizado o pacote computacional GAMS<sup>®</sup> (*General Algebraic Modeling System*) (BROOKE et al., 1997), para otimização da renda líquida e para o estudo das análises de sensibilidade da função objetivo e das restrições.

## **6. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A análise dos dados se deu da seguinte forma, primeiramente foi feita a análise com os dados do modelo de programação não-linear em comparação ao padrão de cultivo adotado pela fazenda. Em seguida, foram analisados os resultados de rendimento líquido gerados pelo modelo de programação não-linear, em diferentes cenários de volume de água anual.

### **6.1. Análise comparativa entre o modelo de programação não-linear e o padrão de cultivo adotado pelo produtor**

#### **6.1.1. Padrão de cultivo**

Na fazenda Olhos D'água, no ano agrícola 2013/2014 o volume anual de água captado no reservatório e utilizado para irrigação foi de 1.588.708 m<sup>3</sup> e teve como volume de precipitação efetiva durante o mesmo período o valor de 3.670.017 m<sup>3</sup>, totalizando 5.258.725 m<sup>3</sup> o volume de água disponível para os cultivos. O valor mensal de água disponível foi variável, pois este valor é dependente do volume de precipitação. Os meses com maior e menor oferta de água foram setembro e abril, com ofertas de água de 826.883 e 96.181 m<sup>3</sup>, respectivamente. O modelo de programação não-linear utilizando as restrições de água e atendendo as exigências de áreas máximas e mínimas para as culturas, resultou no plano ótimo de cultivo apresentado na Tabela 13.

Tabela 13. Áreas ocupadas pelas culturas em estudo (ha) e rendimento líquido (R\$) para o modelo de programação não-linear e para o padrão adotado pelo produtor, considerando a quantidade de água utilizada no ano agrícola 2013/2014 de 5.258.725 m<sup>3</sup>.

Culturas	Modelos	
	Programação não-linear	Produtor
Algodão	60	253
Feijão	205	459
Milho	119	110
Soja 1	138	50
Soja 2	112	146
TOTAL (ha)	634	1.018
Renda Líquida (R\$)	746.988,69	570.121,42

Verifica-se na Tabela 13 que o total de área utilizada no modelo de programação não-linear foi de 634 ha, valor esse 37,7% menor que o adotado pelo produtor, que foi de 1.018 ha. Os cultivos de algodão, feijão e soja 2, tiveram suas áreas reduzidas no modelo de PNL em 76,3%, 55,3% e 23,3%, respectivamente. O cultivo de algodão apresentou saldo negativo para a receita líquida no modelo tradicional, pois sua produtividade não superou o custo de produção e fez parte da solução ótima do modelo de PNL apenas para atender as necessidades de área mínima desta cultura que é 60 ha. Para a cultura do feijão, a redução de 55,3% de sua área se deu devido à oferta de água no mês de agosto não ser suficiente para suprir as necessidades hídricas desta cultura para uma área maior que 205 ha. Para a soja 2, plantada em dezembro, a redução de sua área em 23,3% se deu devido à oferta de água no mês de janeiro ser limitante para suprir, simultaneamente, as necessidades hídricas do milho, algodão e soja. Para a soja 1, cultivada em setembro, houve um aumento de área de 176% em relação à área cultivada pelo produtor devido à diminuição da área cultivada com algodão em novembro; já a cultura do milho teve um aumento 8%.

Considerando o padrão de ocupação da área adotado pelo produtor para o ano agrícola 2013/2014, verifica-se que o retorno financeiro foi de R\$ 570.121,42, valor este 23,7% menor do que o retorno financeiro obtido pelo modelo de PNL, que foi de R\$ 746.988,69. Esta diminuição no retorno financeiro do padrão do produtor em

comparação ao modelo de PNL se deu, em boa parte, devido à exploração de elevada área com o cultivo do algodão, que apresentou rendimento negativo nesta safra.

Dantas Neto (1994) estudando modelos de programação linear com lâminas fixas e lâminas alternativas para a otimização do retorno líquido no projeto de irrigação Senador Nilo Coelho, em Petrolina na Bahia, obteve otimização do retorno financeiro para ambos os modelos, o valores de renda líquida chegaram a ser 27,32% e 37,03% maiores em comparação com o modelo tradicional, para os modelos de lâminas fixas e lâminas alternativas, respectivamente. Santos Junior (2011) aplicando modelos de programação linear similares, visando à otimização da renda líquida no Perímetro Irrigado Formoso, também na Bahia, obteve valores otimizados do rendimento líquido 42% superiores, quando comparados ao modelo de padrão tradicional naquele perímetro irrigado.

### **6.1.2. Utilização do recurso Terra**

Na Tabela 14 são apresentados os valores de área ocupada por mês no ano agrícola 2013/2014 e o percentual de ocupação, considerando o volume de água utilizado durante o ano. A média de ocupação da área foi maior no padrão adotado pelo produtor, 391 ha, enquanto no modelo de PNL foi de 252 ha. Para o produtor, os meses de setembro, outubro, janeiro, fevereiro e março apresentaram uma ocupação total da área irrigada que é de 509 ha. Já para o modelo de PNL os meses com maiores percentuais de áreas ocupadas foram os meses de setembro e outubro, com 67% da área da propriedade, período em que ocorreram os ciclos do feijão e da soja 1. O mês de maio foi o que apresentou o menor percentual de ocupação, 23% da área total, sendo o último mês do ciclo da cultura do milho, que na solução ótima gerada pelo modelo apresentou apenas 119 ha.

Os valores dos percentuais de ocupação da terra mostram que esse recurso não foi restritivo a exploração dos cultivos. O baixo valor de ocupação da terra, deve-se ao fato de que, para o ano agrícola 2013/2014, o volume disponível de água em alguns meses foi insuficiente para a demanda hídrica dos cultivos, quando explorados simultaneamente.



Tabela 14. Área ocupada por mês em ha, pelas culturas estudadas para o modelo de programação não-linear e para o padrão adotado pelo produtor e percentuais de ocupação, considerando a quantidade de água utilizada no ano agrícola 2013/2014 de 5.258.725 m<sup>3</sup>.

Mês	Modelos			
	Programação Não-Linear		Produtor	
	Área (ha)	Ocupação (%)	Área (ha)	Ocupação (%)
Janeiro	291	57	509	100
Fevereiro	291	57	509	100
Março	291	57	509	100
Abril	179	35	363	71
Mai	119	23	110	22
Junho	-	-	-	-
Julho	205	40	459	90
Agosto	205	40	459	90
Setembro	343	67	509	100
Outubro	343	67	509	100
Novembro	198	39	303	60
Dezembro	310	61	449	88
Média Anual	252	50	391	77

### 6.1.3. Utilização do recurso Água

Em relação à utilização do recurso água, a Tabela 15 mostra os volumes mensais utilizados pelo produtor e no modelo de PNL. Observa-se que em alguns meses do ano, os consumos de água igualam-se entre os dois modelos analisados. O consumo anual de água para o modelo de PNL foi de 2.616.863 m<sup>3</sup>, o que representou 49,7% do volume consumido pelo padrão adotado pelo produtor, que foi 5.258.725 m<sup>3</sup>.

Tabela 15. Consumo de água mensal ( $m^3$ ) pelas culturas estudadas, para o modelo de programação não-linear e para o padrão adotado pelo produtor, considerando a quantidade de água utilizada no ano agrícola 2013/2014 de 5.258.725  $m^3$ .

Mês	Modelos	
	Programação Não-Linear	Produtor
Janeiro	274.197	274.197
Fevereiro	323.320	609.577
Março	291.380	678.427
Abril	96.181	96.181
Maio	42.590	508.158
Junho	-	-
Julho	83.892	155.533
Agosto	233.034	233.034
Setembro	387.150	826.882
Outubro	391.828	391.828
Novembro	232.790	668.771
Dezembro	260.500	816.134
Consumo Anual ( $m^3$ )	2.616.863	5.258.725

Na maioria dos meses a demanda de água utilizada para suprir as necessidades das culturas foi menor no modelo de PNL do que no modelo tradicional. Paz et al. (2002) afirmam que o manejo adequado de um sistema de irrigação deverá ser capaz de propiciar ao agricultor o uso eficiente da água, para aumentar a produtividade das culturas, reduzir os custos de produção e, conseqüentemente, maximizar o retorno dos investimentos.

#### 6.1.4. Lâminas de Água utilizadas

A Tabela 16 mostra as lâminas de água calculadas pelo modelo de PNL e as utilizadas no padrão do produtor, assim como suas respectivas produtividades. Observa-se que as lâminas calculadas pelo modelo de PNL para as culturas do feijão, milho e soja aumentaram a produtividade das culturas, com o intuito de otimizar a renda líquida da propriedade, sendo esta a solução ótima encontrada pelo modelo. Para a cultura

do algodão, a lâmina escolhida pelo modelo de PNL é 100,8 mm menor que a aplicada no modelo tradicional e a diferença entre as produtividades é apenas de 18,8 kg/ha, gerando um retorno unitário negativo para ambos os modelos.

Para as culturas do milho e soja as lâminas selecionadas pelo modelo de PNL para se obter maior produtividade foram menores que as lâminas utilizadas pelo produtor, indicando que nem sempre uma maior lâmina de água aplicada objetivando aumentar a produtividade significa em um maior retorno líquido.

Tabela 16. Lâminas de água (W) em mm e produtividade (Y) em kg ha<sup>-1</sup> para os modelos de programação não-linear e para o padrão adotado pelo produtor, considerando a quantidade de água utilizada no ano agrícola 2013/2014 de 5.258.725 m<sup>3</sup>.

Culturas	Modelos			
	Programação Não-Linear		Produtor	
	W	Y	W	Y
Algodão	495,4	1224,2	596,2	1243,02
Feijão	454,1	4173,1	360,8	3476,4
Milho	356,6	11216,7	414,3	10293,6
Soja 1	383,6	3857,4	487,1	3748,5
Soja 2	383,6	3857,4	487,1	3748,5

Paz et al. (2002) assumindo que um sistema de irrigação aplica água conforme um modelo teórico de distribuição, existe uma lâmina ótima que deve ser infiltrada de forma a minimizar a redução da receita líquida esperada, causada pelo excesso e/ou pelo déficit de água na área. A esta lâmina denominou-se lâmina ótima de irrigação, ou seja, é a lâmina média de água que deve ser infiltrada no solo para proporcionar a máxima receita líquida.

## 6.2. Análise de sensibilidade

Frizzone e Andrade Junior (2005) afirmam que os coeficientes de um modelo de decisão estão sujeitos a variações. Após a resolução de problemas que envolvam programação linear ou não-linear, além da solução ótima obtida, deseja-se saber o que aconteceria com essa solução se ocorressem mudanças nos coeficientes da função-

objetivo ou nos níveis das restrições; para isso executa-se uma análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo. Para Arce (1990), a análise de sensibilidade representa a sensibilidade do modelo sobre o plano ótimo dos cultivos quando seus parâmetros sofrem mudanças.

### **6.2.1 Análise de sensibilidade da função objetivo**

Analisando os resultados obtidos na solução ótima encontrada pelo modelo de PNL, a execução de uma análise de sensibilidade é de grande importância para se observar o comportamento das variáveis que compõem a solução. Os resultados da análise de sensibilidade da função objetivo do modelo de PNL estão apresentados na Tabela 17. Considerando-se a cultura do algodão, a escolha desta variável na solução ótima do modelo gera um custo marginal associado ao seu cultivo, ou seja, esse custo representa a diminuição da receita líquida por unidade de área cultivada.

De acordo com Frizzone e Andrade Junior (2005) a resolução de problemas envolvendo programação linear ou não-linear, sempre resultam em mais informações do que as referentes as variáveis de decisão. Associado à solução ótima, tem-se o preço-sombra das restrições, que representa a variação no valor da função-objetivo em decorrência da variação de uma unidade no valor da restrição correspondente. Verifica-se que o preço-sombra da cultura do algodão foi de R\$1.937,90, para estas condições de restrições e para este padrão de cultivo escolhido. Isso significa que a entrada na solução ótima de 1 ha de algodão representa um decréscimo de R\$1.937,90 no valor da função-objetivo. A solução ótima só indicou o plantio de 60 ha de algodão para atender a restrição dada pela equação 35 que determinava que o padrão de cultivo deveria ter, pelo menos, 60 ha desta cultura.

Tabela 17. Análise de sensibilidade da função objetivo, considerando a quantidade de água utilizada no ano agrícola 2013/2014 de 5.258.725 m<sup>3</sup>.

Variável	Valor da Variável (ha)	Retorno Líquido Unitário (R\$ ha <sup>-1</sup> )	Preço Sombra (R\$ ha <sup>-1</sup> )
X10	205	2.466,58	-
X20	119	1.461,41	-
X30	138	421,95	-
X40	112	421,95	-
X50	60	-652,08	-1937,90

### 6.2.2. Análise de sensibilidade do recurso Terra

A análise de sensibilidade do recurso terra está apresentada na Tabela 18. Verifica-se que para todos os meses do ano a ocupação da área não atingiu o valor máximo de área disponível que era de 509 ha. Desta forma, todos os meses apresentaram folga, resultando em um preço sombra zero para este recurso, indicando que o mesmo não foi restritivo.

Santos Junior (2011) executando análises de sensibilidade em modelos de programação linear obteve preço sombra zero para o recurso terra, concluindo que o recurso não foi restritivo para obtenção de um maior retorno financeiro no perímetro irrigado Formoso na Bahia.

Tabela 18. Análise de sensibilidade do recurso terra, considerando a quantidade de água utilizada no ano agrícola 2013/2014 de 5.258.725 m<sup>3</sup>.

Mês	Área ocupada (ha)	Quantidade de folga (ha)	Preço sombra (R\$ ha <sup>-1</sup> )
Janeiro	291	218	0,00
Fevereiro	291	218	0,00
Março	291	218	0,00
Abril	179	330	0,00
Maio	119	390	0,00
Junho	-	509	0,00
Julho	205	304	0,00
Agosto	205	304	0,00
Setembro	343	166	0,00
Outubro	343	166	0,00
Novembro	198	311	0,00
Dezembro	310	199	0,00

### 6.2.3. Análise de sensibilidade do recurso Água

A análise de sensibilidade do recurso água está apresentada na Tabela 19, considerando a disponibilidade anual de 5.258.725 m<sup>3</sup>.

A disponibilidade mensal de água nos meses de janeiro, abril, agosto e outubro foram restritivas, gerando um preço sombra para este recurso nestes meses do ano. Este preço sombra indica que, na possibilidade de utilização de mais 1 m<sup>3</sup> de água, esse 1 m<sup>3</sup> aumentaria o valor da função objetivo (renda líquida) no valor do preço sombra da água para o mês em questão. Os meses de janeiro, abril, agosto e outubro geraram preços sombra de R\$ 0,34; 2,12; 1,61 e 0,47 para cada m<sup>3</sup> de água, respectivamente.

Tabela 19. Análise de sensibilidade do recurso água, considerando a quantidade de água utilizada no ano agrícola 2013/2014 de 5.258.725 m<sup>3</sup>.

Mês	Vol. consumido (m <sup>3</sup> )	Quantidade de folga (m <sup>3</sup> )	Preço sombra (R\$ m <sup>3</sup> )
Janeiro	274.197	0	0,34
Fevereiro	323.320	286.257	-
Março	291.380	387.047	-
Abril	96.181	0	2,12
Mai	42.590	465.568	-
Junho	-	119.657	-
Julho	83.892	71.640	-
Agosto	233.034	0	1,61
Setembro	387.150	439.732	-
Outubro	391.828	0	0,47
Novembro	232.790	435.981	-
Dezembro	260.500	555.634	-

### 6.3. Otimização considerando seis níveis de volumes de água disponível

Foram analisados cenários de variação do volume de água anual e sua influência no padrão de cultivo e conseqüentemente na otimização da renda líquida da fazenda Olhos D'água. Esses cenários compreendem os volumes de 6.573.406 m<sup>3</sup>; 4.732.852 m<sup>3</sup>; 3.944.044 m<sup>3</sup>; 3.155.235 m<sup>3</sup> e 2.629.362 m<sup>3</sup>, que representam, respectivamente, 125%, 90%, 75%, 60% e 50% do valor utilizado na produção dos cultivos para o ano agrícola 2013/2014, que foi de 5.258.725 m<sup>3</sup> (volume utilizado pelo produtor e considerado como sendo 100%). Como o volume anual de água é um valor dependente do volume de precipitação da região, os cenários foram gerados para representar diferentes anos com variação deste volume.

### 6.3.1 Padrão de cultivo

Na Tabela 20, observa-se a área ocupada pelas culturas, para os cinco níveis de volume de água anual e para o padrão adotado pelo produtor (100%). Observa-se que para todos os níveis de volume de água o modelo de PNL escolheu todas as culturas em sua solução ótima. Para todas as culturas, com exceção do algodão, os valores de ocupação da área foram maiores no cenário de 125% do volume de água anual; esse aumento da área se deu devido o aumento da oferta de água anual disponível. Para os demais níveis anuais de água as culturas tiveram diminuição da área à medida que os volumes de água foram diminuindo. A cultura do algodão apareceu apenas com sua área mínima de cultivo, para todos os níveis de água simulados.

Analisando os valores de área total para os diferentes níveis de oferta de água, observa-se que quanto maior a disponibilidade de água, maior é o total de área cultivada.

Tabela 20. Áreas ocupadas pelas culturas em estudo (ha), para os seis níveis de disponibilidade de água, utilizando o modelo de programação não-linear.

Culturas	Volume Anual de Água Disponível					
	125%	100%	90%	75%	60%	50%
Algodão	60	60	60	60	60	60
Feijão	257	205	185	154	123	103
Milho	159	119	104	80	56	40
Soja 1	172	138	124	103	83	69
Soja 2	152	112	96	72	48	32
Área total	800	634	569	499	370	304

A Figura 2 apresenta os valores de rendimento líquido para todos os níveis de água simulados. O cenário com volume de água 125% apresentou o maior retorno financeiro, R\$ 962.804,45, valor este 28,8% maior que a renda líquida otimizada para o cenário atual de oferta de água. Em geral, os retornos financeiros aumentaram com o aumento da oferta de água. Observa-se também que até o nível de 90% da oferta de água, o modelo de PNL otimizou a receita líquida, obtendo valores superiores ao alcançado pela fazenda Olhos D'água, que foi de R\$ 570.121,42 dispondo da oferta de 100% de água.



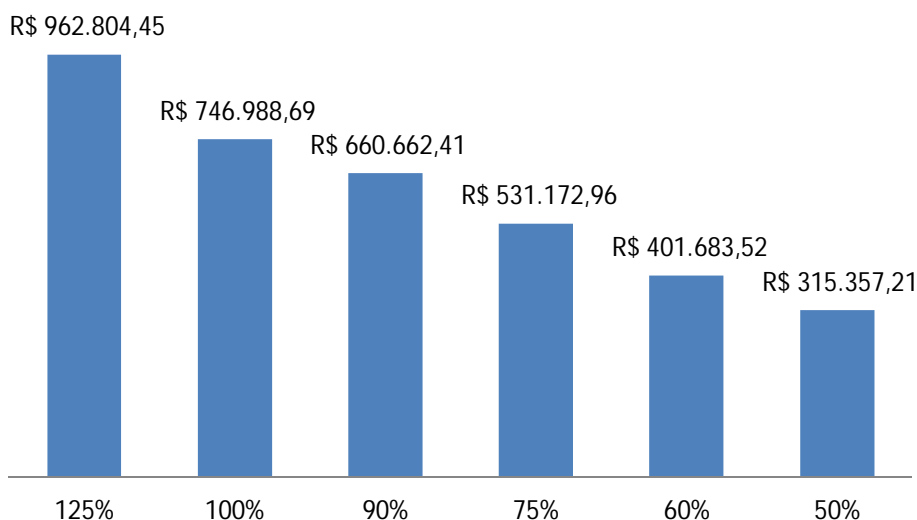


Figura 2. Rendimento Líquido considerando seis níveis de disponibilidade de água, utilizando o modelo de programação não-linear.

Dantas Neto (1994) otimizando a renda líquida do projeto de irrigação Senador Nilo Coelho, a partir de diferentes volumes de água anual, obteve resultados similares aos encontrados nesta pesquisa, tanto as áreas cultivadas como os retornos financeiros aumentaram com o aumento da disponibilidade de água.

### 6.3.2. Utilização da terra

A Tabela 21 apresenta as áreas mensais ocupadas pelas culturas na solução ótima, dadas pelo modelo de PNL para os níveis simulados de disponibilidade de água. A ocupação mensal da área vai aumentando à medida que aumenta a disponibilidade de água. Para o maior nível de disponibilidade de água (125%), a ocupação mensal foi a maior, se comparada com os demais níveis de disponibilidades de água. Entretanto, em nenhum dos níveis simulados de oferta de água houve ocupação total mensal da área, que é de 509 ha.

Tabela 21. Área ocupada por mês em (ha), pelas culturas estudadas, para os seis níveis de disponibilidade de água, utilizando o modelo de programação não-linear.

Meses	Volume Anual de Água Disponível					
	125%	100%	90%	75%	60%	50%
Janeiro	371	291	260	212	164	133
Fevereiro	371	291	260	212	164	133
Março	371	291	260	212	164	133
Abril	219	179	164	140	116	100
Maiο	159	119	104	80	56	40
Junho	-	-	-	-	-	-
Julho	257	205	185	154	123	103
Agosto	257	205	185	154	123	103
Setembro	429	343	309	257	206	171
Outubro	429	343	309	257	206	171
Novembro	232	198	184	163	143	129
Dezembro	384	310	280	235	191	161
Média Anual	316	252	227	189	151	115

Na Figura 3, observa-se os percentuais de ocupação mensal das culturas exploradas na propriedade. Os meses de setembro e outubro foram os que apresentaram os maiores valores de ocupação de área, valores estes tão maiores quanto maior a oferta de água disponível, chegando a valores maiores que 85% de ocupação para o nível de oferta de 125% de água anual. O mês com menor percentual de ocupação foi o mês de maio, apresentando valores que variam entre 30% e 10% de ocupação da área para os diferentes níveis de água.

Considerando o nível mais crítico de disponibilidade de água (nível de 50%), para todos os meses do ano, seus percentuais de ocupação não ultrapassaram a faixa de 35% de ocupação. Santos Junior (2011) obteve resultados semelhantes em sua pesquisa com diferentes níveis de oferta anual de água para otimização do padrão de cultivo do Perímetro Irrigado Formoso.

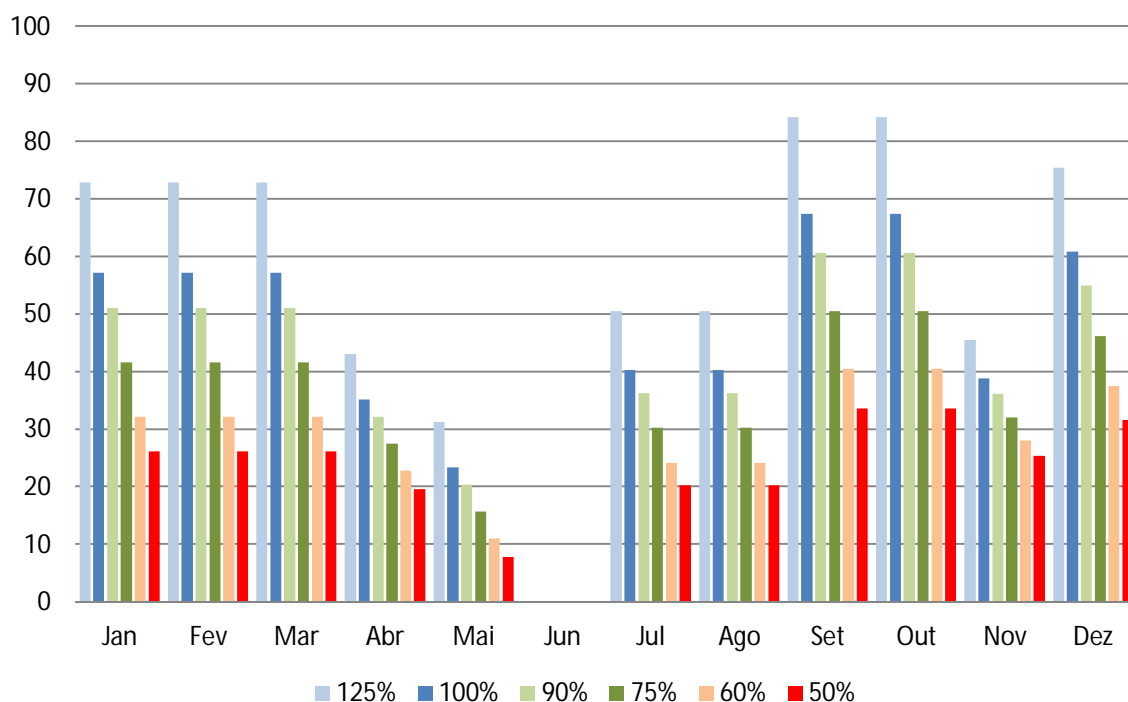


Figura 3. Percentuais de ocupação mensal, considerando seis níveis de disponibilidade de água anual.

### 6.3.3. Utilização da água

Na Tabela 22 encontram-se os valores de consumo mensal de água pelos cultivos na fazenda Olhos D'água, considerando os cinco níveis de disponibilidade de água e para cenário 2013/2014 (100%). Observa-se que o consumo mensal de água aumenta à medida que a disponibilidade desse recurso aumenta. Comparando-se os valores de consumo de água com os volumes disponíveis encontrados na Tabela 12, nota-se que para todos os níveis simulados, o consumo foi total nos meses de janeiro, abril, agosto e outubro, o que restringiu que o modelo escolhesse outro nível ótimo de ocupação dos cultivos. Os meses de fevereiro, setembro e outubro foram os que tiveram o maior consumo de água pelos cultivos, para todos os níveis simulados; fevereiro por estar contido no ciclo do milho, algodão e soja 2, e os meses de setembro e outubro por estarem inseridos nos ciclos do feijão e da soja 1.

Tabela 22. Consumo mensal de água (m<sup>3</sup>) pelas culturas estudadas, considerando os seis níveis de disponibilidade de água, utilizando o modelo de programação não-linear.

Meses	Volume Anual de Água Disponível (m <sup>3</sup> )					
	125%	100%	90%	75%	60%	50%
Jan	342.746	274.197	246.777	205.648	164.518	137.098
Fev	413.410	323.320	287.280	233.220	179.170	143.130
Mar	371.460	291.380	259.350	211.300	163.250	131.220
Abr	120.226	96.181	86.563	72.136	57.708	48.090
Mai	56.734	42.590	36.932	28.445	19.959	14.301
Jun	-	-	-	-	-	-
Jul	104.870	83.892	75.503	62.919	50.335	41.946
Ago	291.292	233.034	209.730	174.775	139.820	116.517
Set	483.940	387.150	348.440	290.370	232.290	193.580
Out	489.785	391.828	352.645	293.871	235.096	195.914
Nov	284.300	232.790	212.180	181.280	150.370	129.770
Dez	318.410	260.500	237.340	202.600	167.860	144.700
Anual	3.277.175	2.616.863	2.352.742	1.956.565	1.560.379	1.296.268

Analisando a Figura 4, observa-se que, para todos os níveis de disponibilidade de água, o volume utilizado pelo modelo de PNL foi equivalente a 50% do volume disponível. Esse baixo consumo é explicado pela disponibilidade hídrica mensal ser variável, fazendo com que os meses de baixa oferta de água limitem uma maior ocupação anual da área disponível.

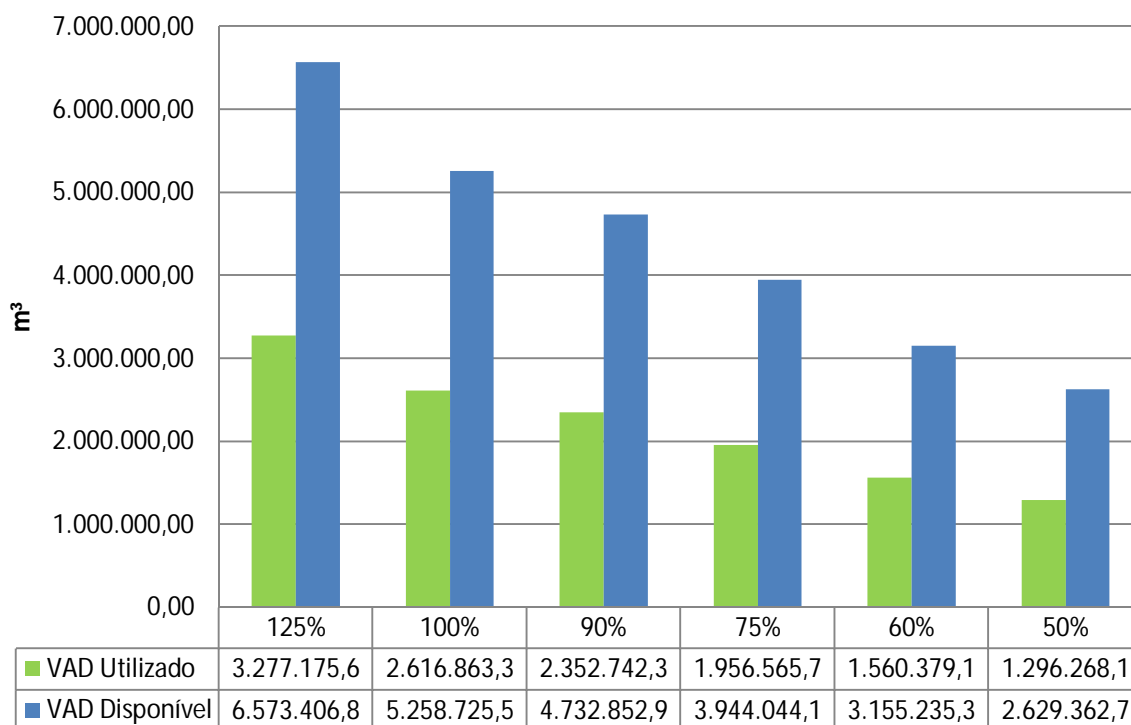


Figura 4. Diferença entre o volume anual de água disponível e o volume anual de água utilizado pelo modelo de programação não-linear.

#### 6.3.4. Lâminas de água utilizadas

As lâminas de água consumidas pelas culturas que fazem parte do padrão de cultivo considerando os cinco volumes de água disponíveis não sofreram aumento nem diminuição em nenhum dos níveis de água simulados, quando comparadas às lâminas calculadas pelo modelo de PNL para o nível de água de 100%.

Tabela 23. Lâminas de água (W) em mm e produtividade (Y) em kg ha<sup>-1</sup>, considerando os seis níveis de disponibilidade de água, utilizando o modelo de programação não-linear.

Culturas	Volume Anual de Água					
	125%		100%		90%	
	W	Y	W	Y	W	Y
Algodão	495,3	1224,2	495,4	1224,2	495,4	1224,2
Feijão	454,1	4173,1	454,1	4173,1	454,1	4173,1
Milho	356,6	11216,7	356,6	11216,7	356,6	11216,7
Soja 1	383,6	3857,4	383,6	3857,4	383,6	3857,4
Soja 2	383,6	3857,4	383,6	3857,4	383,6	3857,4
Culturas	75%		60%		50%	
	W	Y	W	Y	W	Y
	Algodão	495,3	1224,2	495,3	1224,2	495,3
Feijão	454,1	4173,1	454,1	4173,1	454,1	4173,1
Milho	356,6	11216,7	356,6	11216,7	356,6	11216,7
Soja 1	383,6	3857,4	383,6	3857,4	383,6	3857,4
Soja 2	383,6	3857,4	383,6	3857,4	383,6	3857,4

#### 6.4. Análise de sensibilidade considerando os cinco níveis de volume de água disponível

##### 6.4.1. Análise de sensibilidade da função objetivo

A sensibilidade das variáveis que compõem a solução ótima para os cinco volumes de água simulados e para o cenário atual de oferta de água pode ser visualizada na Tabela 24. Observa-se que para todos os níveis de água simulados o modelo escolheu todos os cultivos em sua solução ótima. O preço sombra de R\$ 1.937,90 gerado pelo modelo de PNL para o cultivo do algodão se repetiu em todos os cenários de disponibilidade de água.

Tabela 24. Análise de sensibilidade da função objetivo, considerando os seis níveis de disponibilidade de água.

Variável	125%			100%		
	Valor da variável (ha)	Retorno líquido unitário (R\$ ha <sup>-1</sup> )	Preço sombra (R\$ ha <sup>-1</sup> )	Valor da variável (ha)	Retorno líquido unitário (R\$ ha <sup>-1</sup> )	Preço sombra (R\$ ha <sup>-1</sup> )
X10	257	2.466,58	0,00	205	2.466,58	0,00
X20	159	1.461,41	0,00	116	1.461,41	0,00
X30	172	421,95	0,00	138	421,95	0,00
X40	151	421,95	0,00	112	421,95	0,00
X50	60	-652,08	-1937,90	60	-652,08	-1937,90
90%				75%		
X10	185	2.466,58	0,00	154	2.466,58	0,00
X20	104	1.461,41	0,00	80	1.461,41	0,00
X30	124	421,95	0,00	103	421,95	0,00
X40	96	421,95	0,00	72	421,95	0,00
X50	60	-652,08	-1937,90	60	-652,08	-1937,90
60%				50%		
X10	123	2.466,58	0,00	103	2.466,58	0,00
X20	56	1.461,41	0,00	40	1.461,41	0,00
X30	83	421,95	0,00	69	421,95	0,00
X40	48	421,95	0,00	32	421,95	0,00
X50	60	-652,08	-1937,90	60	-652,08	-1937,90

#### 6.4.2. Análise de sensibilidade do recurso Terra

A análise de sensibilidade do recurso de terra é mostrada na Tabela 25. Para todos os meses do ano e em todos os volumes de disponibilidade de água simulados, as áreas ocupadas mensalmente não atingiram o valor de área disponível (509 ha), conseqüentemente, o modelo de PNL apresentou preço sombra zero para o recurso terra em todos os cenários estudados, indicando que este recurso não foi restritivo em nenhum dos cenários de disponibilidade de água simulados.

Tabela 25. Análise de sensibilidade do recurso terra, considerando os seis níveis de disponibilidade de água.

Mes	125%			100%		
	Área ocupada (ha)	Quantidade de folga (ha)	Preço sombra (R\$ ha <sup>-1</sup> )	Área ocupada (ha)	Quantidade de folga (ha)	Preço sombra (R\$ ha <sup>-1</sup> )
Jan	371	138	0,00	291	218	0,00
Fev	371	138	0,00	291	218	0,00
Mar	371	138	0,00	291	218	0,00
Abr	219	290	0,00	179	330	0,00
Mai	159	350	0,00	119	390	0,00
Jun	-	509	0,00	-	509	0,00
Jul	257	252	0,00	205	304	0,00
Ago	257	252	0,00	205	304	0,00
Set	429	80	0,00	343	166	0,00
Out	429	80	0,00	343	166	0,00
Nov	232	277	0,00	198	311	0,00
Dez	384	125	0,00	310	199	0,00
	90%			75%		
Jan	260	249	0,00	212	297	0,00
Fev	260	249	0,00	212	297	0,00
Mar	260	249	0,00	212	297	0,00
Abr	164	345	0,00	140	369	0,00
Mai	104	405	0,00	80	429	0,00
Jun	-	509	0,00	-	509	0,00
Jul	185	324	0,00	154	355	0,00
Ago	185	324	0,00	154	355	0,00
Set	309	200	0,00	257	252	0,00
Out	309	200	0,00	257	252	0,00
Nov	184	325	0,00	163	346	0,00
Dez	280	229	0,00	235	274	0,00
	60%			50%		
Jan	164	345	0,00	133	376	0,00
Fev	164	345	0,00	133	376	0,00
Mar	164	345	0,00	133	376	0,00
Abr	116	393	0,00	100	409	0,00
Mai	56	453	0,00	40	469	0,00
Jun	-	509	0,00	-	509	0,00
Jul	123	386	0,00	103	406	0,00
Ago	123	386	0,00	103	406	0,00
Set	206	303	0,00	171	338	0,00
Out	206	303	0,00	171	338	0,00
Nov	143	366	0,00	129	380	0,00
Dez	191	318	0,00	161	348	0,00



### **6.4.3. Análise de sensibilidade do recurso Água**

Na Tabela 26 estão apresentados os resultados da análise de sensibilidade da variável água para os seis níveis de água estudados e para o cenário atual. Em todos os cenários, nos meses de janeiro, abril, agosto e outubro o modelo utilizou todo o volume de água disponível, gerando preços sombra para este recurso nestes meses.

Em todos os cenários simulados, os preços sombra não apresentaram aumento, nem diminuição em comparação aos preços sombra gerados para o cenário atual (100% de oferta de água).

Tabela 26. Análise de sensibilidade do recurso água, considerando os seis níveis de disponibilidade de água.

Mês	125%			100%		
	Vol. Consumido (m <sup>3</sup> )	Quantidade de folga (m <sup>3</sup> )	Preço Sombra (R\$ m <sup>3</sup> )	Vol. Consumido (m <sup>3</sup> )	Quantidade de folga (m <sup>3</sup> )	Preço Sombra (R\$ m <sup>3</sup> )
Jan	342.746	0,00	0,34	274.197	0	0,34
Fev	413.410	348.561	0,00	323.320	286.257	0,00
Mar	371.460	476.574	0,00	291.380	387.047	0,00
Abr	120.226	0	2,12	96.181	0	2,12
Mai	56.734	578.463	0,00	42.590	465.568	0,00
Jun	-	149.571	0,00	-	119.657	0,00
Jul	104.870	89.546	0,00	83.892	71.640	0,00
Ago	291.292	0	1,61	233.034	0	1,61
Set	483.940	549.663	0,00	387.150	439.732	0,00
Out	489.785	0	0,47	391.828	0	0,47
Nov	284.300	551.664	0,00	232.790	435.981	0,00
Dez	318.410	701.757	0,00	260.500	555.634	0,00
	90%			75%		
Jan	246.777	0	0,34	205.648	0	0,34
Fev	287.280	261.339	0,00	233.220	223.962	0,00
Mar	259.350	351.234	0,00	211.300	297.520	0,00
Abr	86.563	0	2,12	72.136	0	2,12
Mai	36.932	420.410	0,00	28.445	352.672	0,00
Jun	-	107.691	0,00	-	89.742	0,00
Jul	75.503	64.476	0,00	62.919	53.730	0,00
Ago	209.730	0	1,61	174.775	0	1,61
Set	348.440	395.754	0,00	290.370	329.792	0,00
Out	352.645	0	0,47	293.871	0	0,47
Nov	212.180	389.714	0,00	181.280	320.298	0,00
Dez	237.340	497.180	0,00	202.600	409.500	0,00
	60%			50%		
Jan	164.518	0	0,34	137.098	0	0,34
Fev	179.170	186.576	0,00	143.130	161.658	0,00
Mar	163.250	243.806	0,00	131.220	207.993	0,00
Abr	57.708	0	2,12	48.090	0	2,12
Mai	19.959	284.935	0,00	14.301	239.777	0,00
Jun	-	71.794	0,00	-	59.828	0,00
Jul	50.335	42.984	0,00	41.946	35.820	0,00
Ago	139.820	0	1,61	116.517	0	1,61
Set	232.290	263.839	0,00	193.580	219.861	0,00
Out	235.096	0	0,47	195.914	0	0,47
Nov	150.370	250.892	0,00	129.770	204.615	0,00
Dez	167.860	321.820	0,00	144.700	263.367	0,00

## **7. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Embasado nas experiências vivenciadas na execução deste trabalho e pensando em melhorias para dar maior consistência ao modelo estudado em futuras aplicações sugere-se:

- determinação a nível local ou regional de funções de resposta das culturas ao fator água;
- maior uniformização nas determinações dos custos de produção das culturas.
- maior precisão nas determinações do consumo de água mensal e anual por cultivo;
- melhoria na obtenção dos dados climatológicos, em nível de propriedade, para uma melhor precisão dos cálculos de requerimento de água pelos cultivos.

## 8. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados, oriundos das soluções do modelo de programação não-linear, assim como suas análises e discussões, permitiram concluir que:

- O valor do retorno financeiro da fazenda Olhos D`água foi de R\$ 746.988,69, para o ano agrícola 2013/2014, e apresentou o seguinte padrão de cultivo em sua solução ótima: 60 ha de algodão, 205 ha de feijão, 119 ha de milho e 138 ha de soja plantada em setembro e 112 ha de soja plantada em dezembro, para o volume anual de água disponível de 5.258.725,52 m<sup>3</sup>.

- O modelo de PNL otimizou em 31% a renda líquida da fazenda para o ano agrícola 2013/2014 em comparação a renda obtida com o padrão de cultivo do produtor.

- As análises de sensibilidade do recurso terra apresentaram preços sombra zero, indicando que esse recurso não foi restritivo.

- O estudo com os seis níveis de água disponíveis demonstrou que os retornos financeiros aumentaram com o aumento da água disponível.

- Os percentuais de ocupação da área foram maiores à medida que a oferta de água aumentava.

- O modelo de programação não-linear proposto nesta pesquisa, mostrou-se eficiente na otimização do uso dos recursos terra e água, otimizando assim o retorno financeiro da propriedade.

## 9. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS - ANA. **GEO Brasil: recursos hídricos: resumo executivo**. Ministério do Meio Ambiente; Agência Nacional das Águas; Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente: Brasília, 2007. 60p.

AGUIAR, J. V. **A função de produção na agricultura irrigada**. Fortaleza. Imprensa universitária. 2005. 195 p.

ALMEIDA, M. A. **Estimativa da receita líquida e empregos com uso da água otimizado de um reservatório no semi-árido paraibano**. 117 p. Dissertação (Mestrado) UFPB - Campina Grande: – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Área de Concentração: Recursos Hídricos, 2001.

ANDRADE JÚNIOR, A. S. et al. Estratégias ótimas de irrigação para a cultura da melancia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n.2, p. 301-305, 2001.

ARAÚJO, W. P. et al. Resposta fitotécnica do algodoeiro herbáceo BRS 8h, BRS Araripe e BRS Aroeira sob lâminas de água. **Revista Educação Agrícola Superior**. v.28, n.1, p.67-72, 2013.

ARCE, R. A. B. **Otimização de um projeto hidroagrícola, no município de Guaíra (SP), utilizando programação linear**. 76p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e

Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

ASPIPP/FEHIDRO. **Relatório Técnico**. Processo 112.082-085/11. Volumes 1, 2 e 3. 2011.

BAIO, F. H. R. et al. Modelo de programação linear para seleção de pulverizadores agrícolas de barras. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.2, 2004.

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

BARBOSA, F. C.; TEIXEIRA, A. S.; GONDIM, R. S. Espacialização da evapotranspiração de referência e precipitação efetiva para estimativa das necessidades de irrigação na região do Baixo Jaguaribe-CE. **Revista Ciência Agronômica**, v. 36, n. 1, p. 24-33, 2005.

BERNAL, A. M.; IBARS, R. F. Avaliação do rendimento de soja com diferentes níveis de irrigação por aspersão. **Anais... XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, CONBEA, Campo Grande-MS, 2014.

BERNARDO, S. Impacto Ambiental da irrigação no Brasil. **A água em revista**, Belo Horizonte, n. 5, p. 30-35, 1995.

BERNARDO, S. **Produção agrícola e uso da água. Importância e padrões do uso da água na agricultura brasileira**. In: Universidade de Passo Fundo. Uso da água na agricultura. Passo Fundo, UPF, 2004. Conferência apresentada no Simpósio Nacional sobre o uso da água na agricultura, Passo Fundo, 2004.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. Manual de irrigação. 8. Ed. Viçosa: UFV, 2008. 596 p.

BROOKE, A.; KENDRIK, D.; MEERAUS, A. **Gams - Sistema Geral de Modelagem Algébrica**. 1ª ed. Editora Edgard Blucher, 1997. 296 p.

CARVALHO, D. F. C. et al. Otimização do uso da água no perímetro irrigado do Gorutuba, utilizando-se a técnica da programação linear. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH)**, vol. 4, n. 2, p. 203-209, 2000.

CARVALLO, H. O.; HOLZAPFEL, E. A.; LOPEZ, M. A.; MARIÑO, M. A. Irrigated cropping optimization. **Jornal of Irrigation and Drainage Engineering**, vol. 124, n 2. 1998.

CARVALHO, H. P. **Irrigação, balanço hídrico climatológico e uso eficiente da água na cultura do café**. 2008. 174 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba – SP, 2008.

CHIANG, A. C. **Matemática para economistas**. São Paulo: McGraw-Hill, 1982. 684 p.

CHRISTOFIDIS, D. Irrigação, a fronteira hídrica na produção de alimentos. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília: ABID, n. 54, p. 46-55, 2002.

CIRILO, J. A. **Programação não linear aplicada a recursos hídricos**. In: PORTO, R L. L (ed.) Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos. 2º ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, 1997.

COELHO, E. F.; COELHO FILHO, M. A.; OLIVEIRA, S. L. de. Agricultura irrigada: eficiência de irrigação e de uso de água. **Bahia Agrícola**, vol. 7, nº 1, p. 57-60, 2005.

CRUZ, O. C. et al. Eficiência do uso de 'água para quatro cultivares de feijão na região de Uberaba-MG. **Anais... INOVAGRI Internacional Meeting & IV Winotec**, Fortaleza, 2012.

CURI, R. C.; CURI, W. F.; OLIVEIRA M. B. A. Análise de alterações na receita líquida de um perímetro irrigado no semi-árido sob condições de variações hídricas e econômicas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, São Paulo, v. 9, n. 3, p. 39-53, 2005.

DANTAS NETO, J. **Modelos de decisão para otimização do padrão de cultivo, em áreas irrigadas, baseados nas funções de resposta das culturas à água.** 125 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 1994.

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

DANTAS NETO, J.; FARIAS, M. S. S. **Eficiência do uso da água na agricultura.** In: AGUIAR NETTO, A. O.; BASTOS, E. A. (Ed.). Princípios agronômicos da Irrigação. Brasília, DF. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, EMBRAPA, 2013. p. 245-262.

DELGADO, A. R. S. et al. Planejamento da agricultura irrigada no norte fluminense, utilizando diferentes técnicas de programação matemática. **Rev. Ele. Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento.** Rio de Janeiro, v. 4, n. 3, p. 249-256, 2012.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Crop response to water.** Rome: FAO, 1979. 194 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 33).

ESPINDULA NETO, D. **Uso racional de água e de energia elétrica na cafeicultura irrigada por pivô central e gotejamento.** 2002. 126 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

FRIZZONE, J. A. **Funções de resposta das culturas à irrigação.** Piracicaba: ESALQ/USP. 1993. 42 p. (Série Didática, 6).

FRIZZONE, J. A. Planejamento da Irrigação com Uso de Técnicas de Otimização. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 1, n. 1, p. 24-49, 2007.

FRIZZONE, J. A. Programação matemática aplicada a projetos hidroagrícolas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24., 1995, Viçosa.



**Anais...** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa/Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1995.

FRIZZONE, J. A.; ANDRADE JUNIOR, A. S. **Planejamento de Irrigação: Análise de decisão de investimento.** Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2005, 626 p.

GOMES, A. C. S. **Estudo experimental e simulado da cultura da soja em função de diferentes níveis de irrigação.** 166 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2011.

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

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

JENSEN, M. E. Design and operation of farm irrigation systems. St. Joseph. Madison, **American Society of Agricultural Engineers**, 1983. 829 p.

JUSSIANE, L. F. **Desempenho do método de lagrangiano aumentado com penalidade quadrática.** 108 p. Dissertação (Mestrado em Matemática), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

LANZER, E. A. **Programação Linear: conceitos e aplicações.** Rio de Janeiro: IPEA/INPES, 2ª ed. 258 p. 1988.

MACEDO, R. K. **Metodologias para a sustentabilidade ambiental.** In: Tauk-Torniseiello, S. M. (ed.). **Análise ambiental: estratégias ações.** São Paulo: T. A. Queiroz, 1995, p. 77/102.

MANTOVANI, C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3º ed. Viçosa: UFV, 2009.

MARTINS, D. P. **Resposta do maracujazeiro amarelo (*Passiflora edulis* Sims var. *flavicarpa* Deg.) a Lâminas de Irrigação e Doses de Nitrogênio e de Potássio**. 1998. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) Programa de pós-graduação em Produção Vegetal UENF, 1998, Rio de Janeiro, 1998.

MATEUS, G. R.; LUNA, H. P. L. **Programação não linear**. Belo Horizonte: UFMG, 1986. 299 p.

MELO, D. M. **Estudo da otimização do uso dos recursos hídricos dos açudes Bruscas, Cachoeira dos Alves, Saco de Nova Olinda, Canoas e Queimadas na bacia do Rio Piancó – PB**. 202 f. Dissertação (Mestrado em Eng. Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2004.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **A irrigação no Brasil: situação e diretrizes**. Brasília: IICA, 2008.

MIRANDA, M. J. et al. **A classificação climática de Köppen para o estado de São Paulo**. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>>, Acesso em 25 de março de 2014.

OJIMA, O. R. L.A.; YAMAKAMI, A. Modelo de programação quadrática para análise da movimentação logística e comercialização da soja Brasileira. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 552-560, 2006.

OLIVEIRA, S. L. **Funções de resposta do milho doce ao uso de irrigação e nitrogênio**. 91p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa, 1993.

PALACIOS, E. V. Response functions of crop yield to soil moisture stress. **Water Resources Bulletin**. v. 17 n. 4, p. 699-703, 1981.

PAZ, V. P. S. et al. Otimização do uso da água em sistemas de irrigação por aspersão.

**Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 404-408, 2002.

PAZ, V. P. S.; TEODORO, R. E. F.; MENDONÇA, F. C. Recursos Hídricos, Agricultura irrigada e Meio Ambiente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n. 3, p. 465-473, 2000.

PERREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia Agrícola**. Edição revisada e ampliada, Piracicaba: USP, p. 191, 2007.

SAAD, J. C. C. **Modelos de programação linear e não-linear para otimização do dimensionamento e operação de sistemas de irrigação localizada**. 129 f. Tese (Livre Docência). Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2002.

SAAD, J. C. C.; FRIZZONE, J. A. Designer and management optimization of trickle irrigation systems using nonlinear programming. **Jornal of Agricultural Engineering Research**. v. 64, p. 109-118, 1996.

SALES, M. A. L. **Balanço hídrico na sub-bacia hidrográfica do Boi Branco – SP para gestão sustentável da agricultura irrigada**. 137 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Irrigação e Drenagem) Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2014.

SANTOS JUNIOR, J. L. C. **Otimização do uso da água no Perímetro Irrigado Formoso utilizando a técnica da programação linear**. 128 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

SANTOS, M. A. L. et al. Modelo de programação linear para otimização econômica do projeto de irrigação Baixo Acaraú – CE. **Caatinga**, Mossoró, v.22, n.1, p.06-19, 2009.

SCHARDONG, A.; GARCIA, L. A. V.; PORTO, R. L. L. Modelo de operação em tempo real para o sistema produtor de Alto Tietê. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos RBRH**, v. 15, n. 2, p. 37-48, 2010.

SILVA, L. A.C. da. **Aspectos econômicos em projetos de irrigação e drenagem**. In: Curso de aperfeiçoamento em irrigação e drenagem para engenheiros agrônomos e engenheiros agrícolas. Fortaleza: UFC, 2000.

SILVA NETO, B.; STULP, V. J. A consideração de tendências na otimização de sistemas de produção agropecuária sob condições de risco. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 38, n. 3, p. 61-80, 2000.

SIMONOVIC, S. P. Reservoir systems analysis: closing gap between theory and practice. **Journal of Water Resources Planning and Management**, vol. 118, nº 3, 1992.

SINHA, A. K.; RAO, B. V.; BISCHOF, C. H. Nonlinear optimization model for screening multipurpose reservoir systems. **Jornal of Water Resources Planning and Management**, v. 125, n 4. 1999.

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A.; SILVA, J. G. Desempenho do modelo computacional SISDA 2.0 no manejo da irrigação do feijoeiro em condições de plantio direto e preparo convencional do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n. 3, p. 304-311, 2002.

TAVARES, B. S. et al. Análise de risco e otimização de recursos hídricos e retorno financeiro em nível de fazenda. **Rev. Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 4, p. 338–346, 2011.

VALERO, J. A. J.; MAÑAS, F. J. M. S. O. **Agronomia del riego**. Madrid: Ed Mundi. 1993. 732 p.

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

VELEZ, H. P. **Introducción a la teoría de la operación de distritos y sistemas de riego.**  
Chapingo: Escuela Nacional de Agricultura, 1977. 472p.

YEH, W. W. G. Reservoir management and operations models: a state of the art Review.  
**Water Resources Research**, vol. 21, nº 12, 1985.

## **ANEXOS**

## ANEXO 1

### Modelo de Programação Não-Linear

#### sets

i /A/;

#### scalars

CPF Custo de produção para a cultura do feijão R\$ /4669.37/

CPM Custo de produção para a cultura do milho R\$ /3361.77/

CPS Custo de produção para a cultura da soja R\$ /3628.32/

CPA Custo de produção para a cultura do algodão R\$ /5671.16/

AT Área total da fazenda ha /509/

VAD Volume anual de água disponível m3 /2629362.76/

VDJAN Volume de água disponível em janeiro m3 /137098.77/

VDFEV Volume de água disponível em fevereiro m3 /304788.59/

VDMAR Volume de água disponível em março m3 /339213.73/

VDABR Volume de água disponível em abril m3 /48090.67/

VDMAI Volume de água disponível em maio m3 /254079.19/

VDJUL Volume de água disponível em julho m3 /77766.57/

VDAGO Volume de água disponível em agosto m3 /116517.00/

VDSET Volume de água disponível em setembro m3 /413441.37/

VDOUT Volume de água disponível em outubro m3 /195914.03/

VDNOV Volume de água disponível em novembro m3 /334385.70/

VDDEZ Volume de água disponível em dezembro m3 /408067.13/

PF Preço do feijão no mês da colheita R\$ kg-1 /1.71/

PM Preço do milho safra no mês da colheita R\$ kg-1 /0.43/

PS1 Preço da soja 1 ciclo no mês da colheita R\$ kg-1 /1.05/

PS2 Preço da soja 2 ciclo no mês da colheita R\$ kg-1 /1.05/

PA Preço do algodão no mês da colheita R\$ kg-1 /4.10/

#### variables

WF Lâmina a ser aplicada na cultura do feijão,

WA Lâmina a ser aplicada na cultura do algodão,

WM Lâmina a ser aplicada na cultura do milho,  
WS Lâmina a ser aplicada na cultura da soja,  
X10 área a ser cultivada com feijão em julho,  
X20 área a ser cultivada com milho em janeiro,  
X30 área a ser cultivada com soja em setembro,  
X40 área a ser cultivada com soja em dezembro,  
X50 área a ser cultivada com algodão em novembro,  
YFRF Produtividade do feijão em função da água de irrigação,  
YFRM Produtividade do milho em função da água de irrigação,  
YFRS Produtividade da soja em função da água de irrigação,  
YFRA Produtividade do algodão em função da água de irrigação,  
RL Renda Líquida,  
RLUF Renda líquida unitária feijão,  
RLUM Renda líquida unitária milho,  
RLUS Renda líquida unitária soja,  
RLUA Renda líquida unitária algodão;

**positive variables;**

WF.lo = 1;  
WF.up = 1000;  
WM.lo = 1;  
WM.up = 1000;  
WS.lo = 1;  
WS.up = 1000;  
WA.lo = 1;  
WA.up = 1000;  
X10.lo = 20;  
X10.up = 456;  
X20.lo = 20;  
X20.up = 509;  
X30.lo = 20;  
X30.up = 509;  
X40.lo = 0;



X40.up = 509;

X50.lo = 60;

X50.up = 509;

### equations

max, yf, ym, ys, ya, ajan, afev, amar, aabr, amai, ajul, aago, aset, aout, anov, adez, wjan, wfev, wmar, wabr, wmai, wjul, wago, wset, wout, wnov, wdez, wtot, ERLUF, ERLUM, ERLUS, ERLUA;

\*maximização da receita líquida

max.. RL =E=

$((RLUF)*X10)+((RLUM)*X20)+((RLUS)*X30)+((RLUS)*X40)+((RLUA)*X50);$

\*função de resposta das culturas a água

yf.. YFRF =E=  $-0.0314*WF**2+31.696*WF-3745.3;$

ym.. YFRM =E=  $-10472.43+112.10*WM-0.1438*WM**2;$

ys.. YFRS =E=  $-0.0195*WS**2+16.007*WS+586.55;$

ya.. YFRA =E=  $-0.0048*WA**2+5.3887*WA-267-36;$

\*restrições de terra

ajan..  $X20+X40+X50 =l= AT;$

afev..  $X20+X40+X50 =l= AT;$

amar..  $X20+X40+X50 =l= AT;$

aabr..  $X20+X50 =l= AT;$

amai..  $X20 =l= AT;$

ajul..  $X10 =l= AT;$

aago..  $X10 =l= AT;$

aset..  $X10+X30 =l= AT;$

aout..  $X10+X30 =l= AT;$

anov..  $X30+X50 =l= AT;$

adez..  $X30+X40+X50 =l= AT;$

\*restrições de água

wjan..  $X20*((0.14*WM)*10)+X40*((0.32*WS)*10)+X50*((0.26*WA)*10) =l= VDJAN;$

wfev..  $X20*((0.26*WM)*10)+X40*((0.35*WS)*10)+X50*((0.21*WA)*10) =l= VDFEV;$

wmar..  $X20*((0.34*WM)*10)+X40*((0.21*WS)*10)+X50*((0.19*WA)*10) =l=$

VDMAR;

wabr..  $X20*((0.17*WM)*10)+X50*((0.08*WA)*10) =l= VDABR;$   
 wmai..  $X20*((0.10*WM)*10) =l= VDMAI;$   
 wjul..  $X10*((0.09*WF)*10) =l= VDJUL;$   
 wago..  $X10*((0.25*WF)*10) =l= VDAGO;$   
 wset..  $X10*((0.37*WF)*10)+X30*((0.08*WS)*10) =l= VDSET;$   
 wout..  $X10*((0.29*WF)*10)+X30*((0.23*WS)*10) =l= VDOUT;$   
 wnov..  $X30*((0.39*WS)*10)+X50*((0.09*WA)*10) =l= VDNNOV;$   
 wdez..  $X30*((0.30*WS)*10)+X40*((0.12*WS)*10)+X50*((0.17*WA)*10) =l= VDDEZ;$   
 wtot..  $X10*(WF*10)+X20*(WM*10)+X30*(WS*10)+X40*(WS*10)+X50*(WA*10)$   
 $=l= VAD;$   
 ERLUF..  $RLUF =E= (PF*YFRF)-CPF;$   
 ERLUM..  $RLUM =E= (PM*YFRM)-CPM;$   
 ERLUS..  $RLUS =E= (PS1*YFRS)-CPS;$   
 ERLUA..  $RLUA =E= (PA*YFRA)-CPA;$

**model tese /all/;**

**solve tese using nlp maximizing RL;**