

**CONDIÇÕES ÓTIMAS DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS  
DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO**

**VITAL PEDRO DA SILVA PAZ**

**Engenheiro Agrícola**

**Orientador: Prof. Dr. José Antonio Frizzone**

**Tese apresentada à Escola Superior  
de Agricultura "Luiz de Queiroz",  
da Universidade de São Paulo, para  
obtenção do Título de Doutor em  
Agronomia, Área de Concentração:  
Irrigação e Drenagem.**

**PIRACICABA**

**Estado de São Paulo - Brasil**

**Janeiro de 1995**

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

---

Paz, Vital Pedro da Silva  
P348c Condições ótimas de operação de sistemas de irrigação por aspersão. Piracicaba, 1995.  
125p. ilus.

fese - ESALQ  
Bibliografia.

1. Água de irrigação - Custo 2. Irrigação por aspersão - Informática I. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba

CDD 631.7

*À minha mãe MARIA PAZ*

*À meu pai MANOEL PEDRO*

*Aos meus irmãos e sobrinhos*

*À Valéria*

***DEDICO.***

## **AGRADECIMENTOS**

**À Universidade Federal da Paraíba, através do Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade oferecida para a realização do curso.**

**À Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", através do Departamento de Engenharia Rural, pela acolhida e apoio.**

**À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.**

**Ao Prof. Dr. José Antonio Frizzone, pela orientação, pelos ensinamentos e grande amizade.**

**Ao Prof. Sérgio Marques Júnior, pela colaboração, apoio e amizade.**

**Aos demais professores e colegas do curso, pelo apoio, pela amizade e pelas sugestões recebidas durante o Doutorado.**

# SUMÁRIO

	<b>PÁGINA</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>viii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	<b>xvi</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>xix</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>xxi</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1. Uniformidade de aplicação de água e rendimento das culturas</b> .....	<b>6</b>
<b>2.2. Qualidade da irrigação</b> .....	<b>8</b>
<b>2.3. Resposta da cultura à irrigação</b> .....	<b>13</b>
<b>2.3.1. Funções de custo e receita</b> .....	<b>17</b>
<b>2.4. Otimização da irrigação</b> .....	<b>20</b>
<b>2.5. Conceito de lâmina ótima de irrigação</b> .....	<b>26</b>
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>38</b>
<b>3.1. Modelo computacional: descrição</b> .....	<b>38</b>
<b>3.1.1. Sistemas de irrigação</b> .....	<b>41</b>
<b>3.1.2. Uniformidade de distribuição de água</b> .....	<b>41</b>

	vi
<b>3.1.3. Resposta da cultura à irrigação</b> .....	<b>45</b>
<b>3.1.4. Custos de produção das culturas</b> .....	<b>45</b>
<b>3.1.4.1. Custos da irrigação</b> .....	<b>47</b>
<b>3.1.5. Lâmina ótima total de irrigação e maximização</b> <b>da receita líquida</b> .....	<b>51</b>
<b>3.1.5.1. Preços do produto</b> .....	<b>52</b>
<b>3.1.6. Otimização da irrigação e operação</b> <b>do sistema</b> .....	<b>52</b>
<b>3.1.6.1. Análise da perda econômica</b> .....	<b>53</b>
<b>3.1.6.2. Operação ótima do sistema</b> .....	<b>55</b>
<b>3.1.7. Qualidade da irrigação</b> .....	<b>56</b>
<b>3.2. Aplicação do modelo</b> .....	<b>57</b>
<b>3.2.1. Sistemas de irrigação</b> .....	<b>58</b>
<b>3.2.2. Cultura e função de resposta à irrigação: <math>Y(W)</math></b> .....	<b>58</b>
<b>3.2.3. Custos de produção da cultura (<math>C_i</math>)</b> .....	<b>59</b>
<b>3.2.3.1. Custo não associado à irrigação: <math>C_o</math></b> .....	<b>59</b>
<b>3.2.3.2. Custo associado à irrigação: <math>C_w</math></b> .....	<b>60</b>
<b>3.2.4. Preço do produto: <math>P_i</math></b> .....	<b>60</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>61</b>
<b>4.1. Receita líquida para máxima produção</b> .....	<b>61</b>
<b>4.2. Lâmina de água ótima econômica</b> .....	<b>62</b>
<b>4.3. Produção ótima econômica</b> .....	<b>65</b>

<b>4.4. Receita líquida ótima</b> .....	<b>67</b>
<b>4.4.1. Redução da receita líquida devida ao</b> <b>déficit de água aplicada</b> .....	<b>69</b>
<b>4.4.2. Redução da receita líquida devida ao</b> <b>excesso de água aplicada</b> .....	<b>73</b>
<b>4.4.3. Efeito relativo do déficit sobre o</b> <b>excesso de água na receita líquida</b> .....	<b>76</b>
<b>4.5. Operação ótima de sistemas de irrigação</b> .....	<b>80</b>
<b>4.5.1. Lâmina média ótima econômica (Caso 1)</b> .....	<b>80</b>
<b>4.5.2. Requerimento ótimo econômico (Caso 2)</b> .....	<b>86</b>
<b>4.5.3. Qualidade da irrigação</b> .....	<b>89</b>
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>98</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>100</b>
<b>APÊNDICE</b> .....	<b>107</b>

## LISTA DE SÍMBOLOS

- A** - parâmetro de ajuste da função de produção.
- Ad** - área deficientemente irrigada, adimensional;
- A<sub>i</sub>** - área irrigada com a cultura i.
- a<sub>r</sub>** - fração da área que recebe uma lâmina de água igual ou superior a lâmina requerida, decimal.
- B** - parâmetro de ajuste da função de produção.
- C** - parâmetro de ajuste da função de produção.
- C<sub>m</sub>** - conservação ou manutenção e reparos anuais, US\$/ano.
- CUC** - coeficiente de uniformidade de Cristhiansen, decimal.
- CUH** - coeficiente de uniformidade de Hart, decimal.
- cv** - coeficiente de variação, decimal.
- C(W)** - custo total de produção da cultura irrigada, US\$/ha.
- Co** - custo de produção da cultura irrigada, não relacionado à aplicação de água, US\$/ha.
- C<sub>w</sub>** - custo do volume de água de irrigação aplicado, US\$/mm.ha.
- C<sub>b</sub>** - custos com combustíveis e lubrificantes, US\$.
- C<sub>op</sub>** - custo do operador, US\$/h.
- CT<sub>ins</sub>** - custo total de insumos, US\$/ha.



- Cee** - custo efetivo de energia elétrica, US\$/kw.h;
- Cdp** - custo da demanda de potência elétrica, US\$/kw.mês.
- Cte** - custo total de energia elétrica, US\$.
- Ci** - valor inicial do equipamento de irrigação, US\$.
- Cf** - valor final ou residual do equipamento de irrigação, US\$.
- CMO<sub>ir</sub>** - custo de mão-de-obra para operação do sistema de irrigação, US\$.
- D** - custo diário de um implemento agrícola, US\$/dia.
- De** - quota anual de depreciação do equipamento de irrigação, US\$.
- Ea** - eficiência de aplicação de água, decimal.
- Es** - eficiência de armazenamento de água, decimal.
- erfc** - função erro complementar.
- ET** - evapotranspiração média diária da cultura, mm/dia.
- Fr** - fator de redução da tarifa de energia elétrica, decimal.
- I** - lâmina de água aplicada por unidade de tempo, mm/h.
- IF(W)** - receita líquida total (para uma lâmina de água W), US\$.
- IL(W)** - receita líquida (para uma lâmina de água W), US\$/ha.
- IL\*** - receita líquida ótima obtida com a lâmina ótima W\*, US\$.
- IL<sub>i</sub>** - receita líquida no ponto i (fração da área) obtida com a lâmina W<sub>i</sub>, US\$.
- JSC** - juros sobre o capital, US\$.
- J** - juros anuais sobre o valor de compra do implemento, decimal.
- Ld** - redução da receita líquida total devida ao déficit de água, US\$/ha.

- Le** - redução da receita líquida total devida ao excesso de água, US\$/ha.
- Lt** - redução da receita líquida total, US\$.
- M** - número de dias de serviço do implemento, dias/ano.
- N** - número de anos de serviço do implemento, anos.
- N<sub>m</sub>** - número de meses do ciclo da cultura, meses.
- N<sub>ir</sub>** - necessidade total de água de irrigação, mm.
- n** - número de coletores.
- P** - valor de compra do implemento, US\$;
- p** - valor residual do implemento, US\$.
- Pi** - preço do produto, US\$/Kg.
- Pp** - perda de água por percolação, decimal.
- Pot** - potência necessária ao acionamento da motobomba, kw.
- Pot<sub>ins</sub>** - potência instalada, kw.
- Pkwh** - preço do kw.h, US\$/kw.h.
- Q(z)** - área sob a curva normal padrão, adimensional.
- r** - taxa de juros anual, decimal.
- s** - desvio padrão, decimal.
- t** - tempo de irrigação, h.
- Tsd** - tempo de funcionamento do sistema sem desconto, h.
- Tcd** - tempo de funcionamento do sistema com desconto, h.
- Ts** - tempo de operação do sistema durante o ciclo da cultura, h.
- T<sub>dm</sub>** - tarifa de demanda, US\$/kw.mês.

- $T_{op}$  - tempo de operação do implemento, h.
- $u$  - vida útil do equipamento de irrigação, anos.
- $V_d$  - volume de déficit de água na área, mm/ha.
- $V_e$  - volume de excesso de água na área, mm/ha.
- $X_i$  - lâmina aplicada no ponto  $i$ , mm.
- $X_m$  - lâmina média de água aplicada pelo sistema, mm.
- $X_m^*$  - lâmina média ótima de água aplicada pelo sistema, mm.
- $X_r$  - requerimento de água, para uma irrigação em particular, mm.
- $X_r^*$  - requerimento ótimo de água, para uma irrigação em particular, mm.
- $X_{mp}$  - lâmina média ponderada, mm.
- $(X_m^*/X_r)$  - lâmina média ótima relativa, adimensional.
- $(X_r^*/X_m)$  - requerimento ótimo relativo, adimensional.
- $z$  - variável reduzida da função de distribuição normal.
- $Y(W)$  - produção da cultura obtida com a aplicação de uma lâmina  $W$ , Kg/ha.
- $Y(W_{m\acute{a}x})$  - produção máxima da cultura, Kg/ha.
- $Y(W^*)$  - produção ótima da cultura, obtida com a lâmina ótima  $W^*$ , Kg/ha.
- $W_t$  - disponibilidade total de água, mm.
- $W_w^*$  - lâmina total de água econômica que permite obter uma receita líquida máxima, quando a disponibilidade de água é limitante à produção, mm.

- $W_i^*$  - lâmina total de água econômica que permite obter uma receita líquida máxima, quando a disponibilidade de terra é limitante à produção, mm.
- $W_{máx}$  - lâmina total de irrigação necessária para máxima produção, mm.
- $W_e$  - lâmina de água que conduz a uma receita líquida igual àquela obtida por  $W_{máx}$ , quando a disponibilidade de terra é limitante à produção, mm.
- $W_{ew}$  - lâmina de água que conduz a uma receita líquida igual àquela obtida por  $W_{máx}$ , quando a disponibilidade de água é limitante à produção, mm.
- $\beta$  - redução da receita líquida por unidade de volume de déficit, US\$/mm.ha.
- $\alpha$  - redução da receita líquida por unidade de volume de excesso, US\$/mm.ha.
- $\beta/\alpha$  - efeito relativo do déficit sobre o excesso de água aplicada, adimensional.
- $\Delta EC$  - perda econômica no ponto i ao longo da área irrigada, US\$.
- $\Delta'$  - parâmetro para aproximação da função de distribuição normal.
- $\Delta$  - diferença entre a lâmina média adimensional e a lâmina requerida adimensional.

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA</b>		<b>PÁGINA</b>
<b>1</b>	<b>Distribuição normal acumulada, para lâminas de água aplicadas .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Função de resposta da cultura à irrigação .....</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>Funções de receita bruta, custos e receita líquida .....</b>	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>Intervalo para manejo racional da irrigação quando a disponibilidade de terra é fator limitante à produção .....</b>	<b>26</b>
<b>5</b>	<b>Áreas de excesso e de déficit em função da distribuição de água de um sistema de irrigação .....</b>	<b>30</b>
<b>6</b>	<b>Receita líquida para máxima produção em função do custo da água e do preço do produto .....</b>	<b>62</b>
<b>7</b>	<b>Lâmina de água ótima econômica em função (a) do preço do produto e (b) do custo da água .....</b>	<b>64</b>
<b>8</b>	<b>Produção ótima econômica em função (a) do preço do produto e (b) do custo da água .....</b>	<b>66</b>
<b>9</b>	<b>Receita líquida ótima em função do custo da água e do preço do produto .....</b>	<b>68</b>

10	Redução da receita líquida devida ao déficit de água aplicada ( $\beta$ ), em função do preço do produto ( $P_i$ ) e do custo da água ( $C_w$ ), para diferentes uniformidades de distribuição de água (CUC) .....	71
11	Redução da receita líquida devida ao excesso de água aplicada ( $\alpha$ ), em função do preço do produto ( $P_i$ ) e do custo da água ( $C_w$ ), para diferentes uniformidades de distribuição de água (CUC) .....	74
12	Efeito relativo do déficit sobre o excesso de água aplicada ( $\beta/\alpha$ ) em função do custo da água e do preço do produto, para (a) CUC = 90% e (b) CUC = 75% .....	77
13	Efeito relativo do déficit sobre o excesso de água ( $\beta/\alpha$ ) em função da uniformidade de distribuição de água (CUC), para diferentes custos da água ( $C_w$ ) e preços do produto ( $P_i$ ) .....	78
14	Lâmina média ótima em função de $\beta/\alpha$ , para diferentes requerimentos e uniformidades de distribuição de água (CUC) .....	82
15	Lâmina média ótima relativa ( $X_m^*/X_r$ ) em função de $\beta/\alpha$ , para (a) CUC = 90%, (b) CUC = 80% e (c) CUC = 75 % .....	84

16	Requerimento ótimo em função de $\beta/\alpha$ , para diferentes lâminas médias e uniformidades de distribuição de água (CUC) .....	87
17	Requerimento ótimo relativo ( $X_r^*/X_m$ ) em função de $\beta/\alpha$ , para (a) CUC = 90% e (b) CUC = 80% .....	90
18	Qualidade da irrigação, para a condição ótima de operação do sistema, quando o requerimento é fixo e a uniformidade de distribuição de água é 90% .....	92
19	Qualidade da irrigação, para a condição ótima de operação do sistema, quando o requerimento é fixo e a uniformidade de distribuição de água é 80% .....	93
20	Qualidade da irrigação, para a condição ótima de operação do sistema, quando a lâmina média aplicada é fixa e a uniformidade de distribuição de água é 90% .....	96
21	Qualidade da irrigação, para a condição ótima de operação do sistema, quando a lâmina média aplicada é fixa e a uniformidade de distribuição de água é 90% .....	97

## LISTA DE QUADROS

QUADRO		PÁGINA
1	Receita líquida para máxima produção, em US\$/ha, para diferentes custos da água e preços do produto ...	108
2	Lâmina de água ótima econômica, em mm, para diferentes custos da água e preços do produto .....	108
3	Produção ótima econômica, em Kg/ha, para diferentes custos da água e preços do produto .....	109
4	Receita líquida ótima econômica, em US\$/ha, para diferentes custos da água e preços do produto .....	109
5	Redução da receita líquida devido ao déficit de água aplicada ( $\beta$ ), em US\$/ha, para uniformidade de distribuição de água de 90% .....	110
6	Redução da receita líquida devida ao déficit de água aplicada ( $\beta$ ), em US\$/ha, para uniformidade de distribuição de água de 80% .....	110
7	Redução da receita líquida devida ao déficit de água aplicada ( $\beta$ ), em US\$/ha, para uniformidade de distribuição de água de 70% .....	111



<b>8</b>	<b>Redução da receita líquida devida ao excesso de água aplicada (<math>\alpha</math>), em US\$/ha, para uniformidade de distribuição de água de 90% .....</b>	<b>111</b>
<b>9</b>	<b>Redução da receita líquida devida ao excesso de água aplicada (<math>\alpha</math>), em US\$/ha, para uniformidade de distribuição de água de 80% .....</b>	<b>112</b>
<b>10</b>	<b>Redução da receita líquida devida ao excesso de água aplicada (<math>\alpha</math>), em US\$/ha, para uniformidade de distribuição de água de 70% .....</b>	<b>112</b>
<b>11</b>	<b>Efeito relativo do déficit sobre o excesso de água aplicada (<math>\beta/\alpha</math>), para diferentes custos da água e preços do produto, para uniformidade de distribuição de água de 90% .....</b>	<b>113</b>
<b>12</b>	<b>Efeito relativo do déficit sobre o excesso de água aplicada (<math>\beta/\alpha</math>), para diferentes custos da água e preços do produto, para uniformidade de distribuição de água de 80% .....</b>	<b>113</b>
<b>13</b>	<b>Lâmina média ótima relativa em função de <math>\beta/\alpha</math>, para uniformidade de distribuição de água de 90% .....</b>	<b>114</b>
<b>14</b>	<b>Lâmina média ótima relativa em função de <math>\beta/\alpha</math>, para uniformidade de distribuição de água de 80% .....</b>	<b>114</b>

15	Requerimento ótimo relativo em função de $\beta/\alpha$ , para uniformidade de distribuição de água de 90% .....	115
16	Requerimento ótimo relativo em função de $\beta/\alpha$ , para uniformidade de distribuição de água de 80% .....	115
17	Qualidade da irrigação para a condição ótima de operação do sistema, quando o requerimento é fixo e a uniformidade de distribuição de água é 90% .....	116
18	Qualidade da irrigação para a condição ótima de operação do sistema, quando o requerimento é fixo e a uniformidade de distribuição de água é 80% .....	116
19	Qualidade da irrigação para a condição ótima de operação do sistema, quando a lâmina média aplicada é fixa e a uniformidade de distribuição de água é 90% .....	117
20	Qualidade da irrigação para a condição ótima de operação do sistema, quando a lâmina média aplicada é fixa e a uniformidade de distribuição de água é 80% .....	117

# **CONDIÇÕES ÓTIMAS DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO**

**Autor: VITAL PEDRO DA SILVA PAZ**

**Orientador: PROF. DR. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE**

## **RESUMO**

O projeto adequado de um sistema de irrigação deverá ser capaz de propiciar ao agricultor irrigante a possibilidade de fazer uso do recurso água com máxima eficiência, aumentando a produtividade das culturas, reduzindo os custos de produção, e, conseqüentemente, maximizando o retorno dos investimentos. Para tornar viável economicamente a agricultura irrigada é necessário um criterioso planejamento das atividades de produção e o correto manejo da água aplicada pelo sistema de irrigação.

O presente estudo teve como objetivos: estimar a redução da receita líquida, devida à aplicação deficiente ou excessiva de água, conhecidas a quantidade de água que maximiza a receita líquida e, a uniformidade de distribuição do sistema; analisar o efeito do preço do produto, do custo da água e da uniformidade de distribuição na redução da receita líquida; desenvolver um modelo computacional para prever a operação ótima de sistemas de irrigação por aspersão convencional e pivô-central,

**minimizando a redução da receita líquida e, analisar a qualidade da irrigação para a condição ótima de operação do sistema.**

**O modelo proposto possibilita ao produtor irrigante decidir sobre a melhor alternativa de exploração de culturas, quando o preço do produto e os custos de produção são conhecidos ou são previsíveis no período.**

**A minimização de perdas econômicas, ou redução da receita líquida, está relacionada à uniformidade de distribuição de água pelo sistema, ao preço do produto e ao custo da irrigação.**

**A operação ótima dos sistemas de irrigação baseada nas estratégias de otimização econômica para maximização da receita líquida, proporciona níveis adequados de eficiência de aplicação, eficiência de armazenamento, perda por percolação e área adequadamente irrigada.**

# **OPTIMAL OPERATIONAL CONDITIONS OF SPRINKLER IRRIGATION SYSTEMS**

**Author: VITAL PEDRO DA SILVA PAZ**

**Adviser: PROF. DR. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE**

## **SUMMARY**

**An adequate project of an irrigation system shall be able to provide the farmer with the possibility of making use of water with maximum efficiency, with the increase of crop yields and reduction of production costs, thus maximizing the return of investments. A criterious design of the production activities and correct water management applied by the system of irrigation are necessary in order to make the irrigated agriculture economically viable.**

**The aims of this study were to estimate the economical loss or reduction of net revenue due to deficient or excessive water application once the amount of water for maximum net revenue is known, and the distribution uniformity of the system; to analyze cost and revenue factors and distribution uniformity on the decline of the net revenue; to develop a computer model to predict the optimal operation of the sprinkler irrigation systems, such as to minimize the decline of net revenue due to deficit or**

excess of applied water, and, to analyze the adequacy of the irrigation to the optimal operational condition of the system.

The proposed model allows the farmer to decide upon the best choice of crop exploitation when the price of the product and production costs are known or predictable in that period.

Minimum economical losses, or decline of net revenue, are related to the uniformity of water distribution by the system at a product price and at an irrigation cost.

The optimal operation of the irrigation systems based on economical optimization strategies for maximum net revenue provides adequate levels of application efficiency, storage efficiency, percolation loss and adequacy of irrigation.

# 1. INTRODUÇÃO

Apesar do crescente uso, a irrigação tem apresentado problemas ocasionados por diagnósticos mal elaborados, por projetos dimensionados sem os critérios exigidos e, principalmente, por manejo inadequado dos recursos hídricos e edáficos, resultando em baixa produtividade das culturas e reduzido retorno dos investimentos.

Os sistemas de irrigação pressurizados vêm assumindo grande importância em extensas áreas agrícolas irrigadas. A aspersão, incluindo o sistema pivô-central, tem possibilitado melhor controle da lâmina de água aplicada, boa uniformidade, adaptação às diversas condições de solo e topografia, além de uso na maioria das culturas. A demanda mínima de mão-de-obra, devido à automação de funcionamento e aplicação de água, tem sido um dos fatores também considerados quando da escolha dos sistemas pressurizados, comparados aos sistemas de irrigação por superfície. No entanto, estes sistemas apresentam como principais desvantagens o alto custo de aquisição e o grande consumo de energia (HOWELL & PHENE, 1983).

A empresa agrícola, como qualquer outra, para tornar-se economicamente sólida, não pode estar alheia à maximização de seus lucros, ou seja, deve-se considerar o princípio básico da teoria da produção que orienta o comportamento da atividade para a maximização dos seus resultados. Um estudo das técnicas e processos envolvidos na produção pode determinar as melhores condições de operação de um sistema, para se obter um resultado ótimo com um determinado custo de produção.

A necessidade de tornar viável economicamente a agricultura irrigada tem conduzido a pesquisa a formular respostas às clássicas perguntas: quanto, quando e como irrigar? Nesse contexto, as duas primeiras perguntas referem-se à quantidade de água que deve ser fornecida à cultura e aos intervalos de aplicação, de forma a se obter a máxima produção econômica. A terceira pergunta refere-se ao método de irrigação que se deve utilizar para permitir uma distribuição uniforme da água, minimizando as perdas econômicas decorrentes do excesso e do déficit de água (FRIZZONE, 1992).

Portanto a quantidade de água e o momento adequado de sua aplicação são parâmetros importantes para o correto planejamento, o dimensionamento e o manejo de qualquer sistema de irrigação, bem como para a avaliação de recursos hídricos (BERNARDO, 1989). Esses parâmetros devem ser continuamente estudados para que se obtenha êxito na atividade agrícola irrigada.



**Um manejo eficiente da irrigação, conhecendo-se as características de funcionamento de um sistema, pode ser proposto considerando as seguintes hipóteses:**

- 1) se a necessidade de água da cultura é conhecida, então o sistema de irrigação deverá aplicar uma lâmina média de água, distribuída de forma a proporcionar a máxima receita líquida;**
- 2) se o sistema de irrigação aplica uma lâmina média de água com distribuição conhecida, então essa lâmina deverá ser aplicada para atender a necessidade da cultura que proporciona a máxima receita líquida.**

**A condição de máximo rendimento econômico deve ser verificada considerando as condições de operação do sistema de irrigação. A aplicação uniforme da água reduz as possíveis perdas econômicas, decorrentes da aplicação excessiva ou deficitária de água na área irrigada, pois, o excesso ou o déficit de água influenciam o rendimento da cultura e, conseqüentemente, a receita líquida total. A uniformidade de aplicação de água é um parâmetro importante no rendimento da cultura e, portanto, na maximização da receita líquida.**

**Este trabalho tem como objetivos:**

- 1) estimar a redução da receita líquida devida à aplicação deficiente ou excessiva de água, conhecendo-se a quantidade que maximiza a receita líquida e, a uniformidade de distribuição de sistemas de irrigação por aspersão convencional e pivô-central;**

**2) analisar economicamente a influência do custo da água, do preço pago pelo produto e da uniformidade de distribuição de água do sistema, sobre a redução da receita líquida devido ao déficit e ao excesso de água aplicada;**

**3) desenvolver um modelo computacional para prever a operação ótima de sistemas de irrigação por aspersão convencional e pivô-central;**

**4) analisar a qualidade da irrigação para a condição ótima de operação do sistema.**

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

**Na agricultura irrigada o objetivo básico é a obtenção do maior retorno monetário utilizando racionalmente os recursos disponíveis. O recurso água, o principal e determinante para o êxito da irrigação, tende a torna-se limitante, à medida que novas áreas são implementadas numa mesma região. É necessário a formulação e a execução de uma política racional de expansão de áreas irrigadas, com um eficiente controle dos recursos hídricos disponíveis.**

**Com o desenvolvimento da irrigação, têm-se alcançado elevados níveis de produtividade com as mais variadas culturas, aplicando-se água por diferentes maneiras. Para tanto, investimentos têm sido feitos em tecnologia, visando aos objetivos de maiores lucros por unidade de área irrigada e por unidade de água aplicada. Na maioria das vezes, torna-se indispensável adotar medidas de planejamento do uso dos recursos hídricos e de operação dos sistemas, a nível de fazenda individual ou empresas de maior porte, sob pena de inviabilizar economicamente a irrigação.**

**Em um sistema de irrigação não é possível uma aplicação de água com perfeita uniformidade. Para uma boa uniformidade de distribuição, é necessário um criterioso trabalho operacional que, por sua vez, requer investimento de capital devido aos maiores custos com energia e manutenção.**

## **2.1. Uniformidade de aplicação de água e rendimento das culturas**

**As medidas de uniformidade expressam a variabilidade da lâmina de irrigação aplicada na superfície do solo, sendo comum expressá-las por coeficientes de uniformidade.**

**A uniformidade depende, basicamente, dos critérios considerados quando da elaboração do projeto, do manejo e da operação do sistema de irrigação, além dos elementos climáticos (WALKER, 1979; PAIR, 1968).**

**CHRISTIANSEN (1942) foi o primeiro pesquisador a propor um coeficiente para caracterizar a uniformidade de distribuição de água em um sistema de irrigação por aspersão. Desde então, muitos outros coeficientes foram apresentados, porém nenhum deles foi suficientemente completo, de forma a possibilitar a substituição, com vantagem, do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC). A literatura, em geral, cita um valor médio recomendável de 80% para a uniformidade em sistemas de irrigação por aspersão (KELLER & BLIESNER, 1990).**

**WILCOX & SWAILES (1947) e HART (1961), avaliando a uniformidade da irrigação, propuseram um coeficiente, utilizando o desvio padrão como medida de dispersão. Outra medida de uniformidade utilizada é a razão entre a média dos 25% dos menores valores de lâminas de irrigação e a lâmina média aplicada no solo (KRUSE, 1978).**

**Para sistemas de irrigação por aspersão pivô-central, HEERMANN & HEIN (1968) propuseram uma modificação no coeficiente de uniformidade de Christiansen, proporcionalizando-se as lâminas de água coletadas, uma vez que cada coletor representa áreas progressivamente maiores, a partir do ponto pivô.**

**Várias pesquisas têm demonstrado que a uniformidade de aplicação de água relaciona-se com o rendimento da cultura (MANTOVANI, 1993; GOHRING & WALLENDER, 1987). Culturas de maior valor econômico são diretamente afetadas pela baixa uniformidade, porém, em condições de água limitada, a uniformidade pode ser compensada por um manejo eficiente da lâmina a ser aplicada, proporcionando melhor eficiência de utilização da água, minimizando a redução da receita líquida.**

**A uniformidade de distribuição e a eficiência de aplicação de água têm sido os parâmetros mais comuns na análise de desempenho de um sistema de irrigação, servindo de elementos comparativos com o rendimento das culturas (HOWELL, 1964).**

A otimização de sistemas de irrigação tem levado a estudos econômicos dos parâmetros que expressam a qualidade da irrigação. SOLOMON (1984), apresentou uma análise, mostrando como as medidas de uniformidade e eficiência de irrigação podem ser interpretadas para previsão da produção. VARLEY (1976) verificou o efeito da uniformidade de aplicação de água no rendimento da cultura, enfatizando a importância de se considerar a relação água-rendimento para as condições de irrigação deficiente e excessiva. Von BERNUTH (1983) e CHEN & WALLENDER (1984) desenvolveram modelos que relacionam o coeficiente de uniformidade e quantidade de água aplicada à cultura, visando a maximização da receita líquida total.

GOHRING & WALLENDER (1987) estudaram a otimização econômica de sistemas de irrigação por aspersão, relacionando a uniformidade de distribuição e a lâmina aplicada. Os autores verificaram que a uniformidade, associada a uma condição de operação do sistema, influencia efetivamente na obtenção de lucro ou rendimento da cultura.

## **2.2. Qualidade da irrigação**

As medidas de eficiência quantificam fisicamente a qualidade da irrigação, por incorporarem algumas conseqüências da uniformidade (SOLOMON, 1984). Se, por um lado, as medidas de uniformidade dependem

somente do grau de dispersão com que a água é aplicada, por outro, as medidas de eficiência dependem tanto da uniformidade como da forma com que o sistema é operado (FRIZZONE, 1992).

A eficiência de aplicação é um dos parâmetros mais importantes que deve ser considerado quando da elaboração de projetos de irrigação. Para tanto, é necessário conhecer o padrão da cultura durante o ciclo, o sistema de irrigação, uma previsão das práticas de cultivos, características do solo e, provavelmente, o mais importante de todos, o manejo da irrigação. Valores acima ou abaixo da eficiência efetivamente requerida para o projeto podem provocar total insucesso do mesmo.

A adequação da irrigação refere-se à fração da área que recebe quantidade suficiente de água para manter a qualidade do produto e a produtividade vegetal num nível econômico. Uma vez que essa definição requer a especificação da cultura, do solo e das condições de mercado, o grau de adequação da irrigação é normalmente definido em relação à porcentagem da área que recebe no mínimo, a lâmina de água necessária para suprir o déficit hídrico da cultura (JAMES, 1988).

Um sistema de irrigação não aplica água perfeitamente uniforme em toda a área. Com isso, uma fração da área é adequadamente irrigada e outra deficientemente irrigada. Uma área adequadamente irrigada recebe água suficiente ou em excesso àquela necessária ou requerida pela cultura. A água em excesso é perdida por percolação, enquanto na área com

déficit, toda a água infiltrada é considerada armazenada na zona radicular e disponível para as plantas. A fração de área adequadamente irrigada ou com déficit pode aumentar ou diminuir em função da quantidade de água aplicada que se infiltra no solo (FRIZZONE, 1992).

Assim como a distribuição de água que resulta de uma irrigação, a avaliação do grau de adequação é feita utilizando uma distribuição de frequências acumuladas (HART, 1961; NORUM, 1966; HART et al, 1980).

Um dos principais benefícios da utilização de modelos é permitir, de acordo com a função de distribuição ajustada aos dados, expressões analíticas para o cálculo dos coeficientes de uniformidade e eficiência de aplicação de água dos sistemas (WARRICK, 1983; WARRICK et al., 1989). Vários modelos matemáticos de distribuição, como normal, potencial, gama, beta, têm sido utilizados para descrever a distribuição de água infiltrada após a irrigação (SILVA & HART, 1992).

HART & REYNOLDS (1965), a partir da frequência acumulada das lâminas de água adimensionalizadas, mostram que o modelo tende à distribuição normal. Para uma condição de aplicação menos uniforme a curva de distribuição tenderá a uma reta (KARMELI, 1978).

Os modelos possibilitam a análise da qualidade da irrigação, definindo as frações da área que recebem uma lâmina de água maior e/ou menor àquela requerida, caracterizando excesso ou déficit de água na área irrigada. Os parâmetros de eficiência, para caracterização da qualidade da



irrigação, segundo o modelo normal apresentado por WALKER (1979), baseiam-se no diagrama de distribuição de frequência acumulada e normalizada (Figura 1).

Diferentes lâminas médias aplicadas e lâminas requeridas, conduzem a diferentes áreas de excesso e déficit de água, determinando valores diferenciados de eficiências.

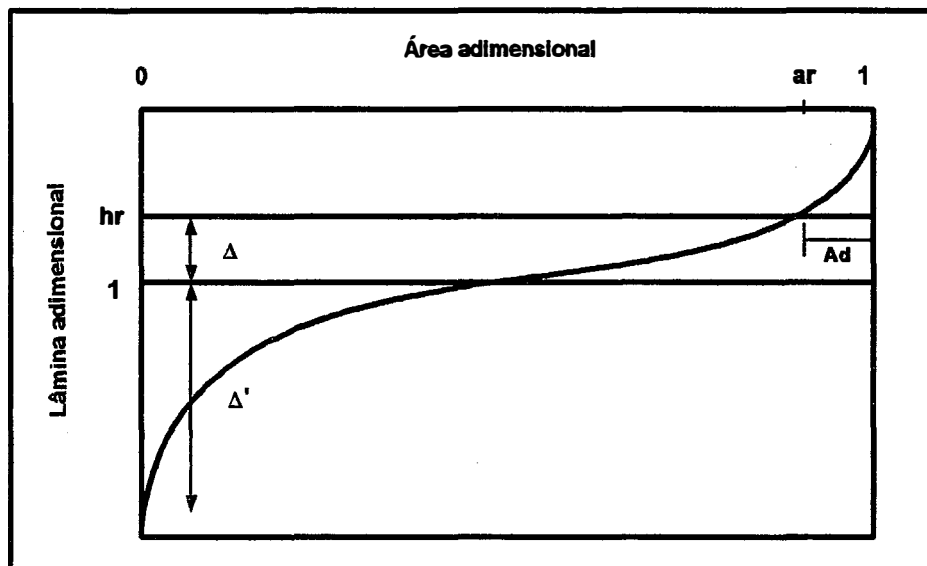


Figura 1. Distribuição normal acumulada, para lâminas de água aplicadas.

Os parâmetros do modelo ( Figura 1) são definidos como:

- $\Delta'$  - parâmetro para aproximação da função de distribuição normal;
- $\Delta$  - diferença entre a lâmina média adimensional e a lâmina requerida adimensional ( $\Delta = 1 - hr$ );
- $Ad$  - área deficientemente irrigada;

WALKER (1979) propõe o cálculo do parâmetro  $\Delta'$  pela aproximação:

$$\Delta' = 3,634 CV \quad [1]$$

em que, CV é o coeficiente de variação, em decimal.

A área deficientemente irrigada, Ad, é expressa como uma função de  $\Delta$  e  $\Delta'$ , ou seja:

$$Ad = \left[ 3,2362 \left( 1 - \frac{\Delta}{\Delta'} \right) \right]^{3,3223} \quad [2]$$

Portanto,  $1 - Ad$ , representa a área adequadamente irrigada e indica o grau de adequação da irrigação.

A eficiência de aplicação (Ea), que é um indicador do excesso de água aplicada durante a irrigação, é calculada pela expressão:

$$Ea = 1 - CV (3,634 - 1,123 Ad^{0,301} + 0,003 Ad^{1,2325}) \quad [3]$$

Avaliando a reposição da água ao solo para a cultura, calcula-se a eficiência de armazenamento (Es). Assim,

$$Es = \frac{Ea}{1 - CV (3,634 - 1,123 Ad^{0,301})} \quad [4]$$

A porcentagem de água perdida por percolação profunda (Pp) é calculada por:

$$Pp = 1 - Ea \quad [5]$$

Um sistema de irrigação deve proporcionar condições para uma produção econômica, o que só é possível com o aumento da produtividade e com a redução dos custos por unidade produzida. Portanto, os parâmetros que expressam a qualidade da irrigação devem ser entendidos como componentes decisórios no planejamento e operação dos sistema.

### **2.3. Resposta da cultura à irrigação**

A produção das culturas em resposta à água aplicada, depende de muitos fatores, tais como quantidade e frequência de irrigação, método de aplicação de água, variabilidade do solo, condições climáticas, estádios de desenvolvimento da cultura e outros.

Para uma análise econômica, é possível apresentar uma relação funcional da produção das culturas e as quantidades de certo conjunto de insumos envolvidos na produção. Assim, função de resposta ou produção das culturas representa a relação entre os insumos e as quantidades físicas que podem ser obtidas do produto. FERGUSON (1988) define função de produção como as relações entre um conjunto específico de fatores, envolvidos num processo produtivo qualquer, e a máxima produção física possível de se obter com a tecnologia existente.

O conceito de 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. As funções de produção são desenvolvidas a partir de dados experimentais de várias produções e são utilizadas na determinação de quando e quanto irrigar. Com uma expressão matemática derivada, podem-se estimar os resultados econômicos decorrentes da não irrigação em determinado momento (VELEZ, 1981).

Devido à variabilidade dos fatores que a definem, diferentes tipos de expressões matemáticas têm surgido, mas de grande importância nos diversos campos de aplicação. Os modelos matemáticos mais comumente utilizados nas análises econômicas das pesquisas agrícolas são o linear, o polinomial e o potencial (HEXEM & HEADY, 1978). O modelo polinomial quadrático tem demonstrado, na maioria das vezes, o que melhor representa a estimativa de resultados otimizados do emprego de fertilizantes e níveis de umidade do solo (LANZER & PARIS, 1980; FRIZZONE, 1986).

A representação matemática de uma função de produção linear não tem representado, de forma satisfatória, quando se trata de experimento de culturas irrigadas. Têm-se sempre acréscimos na produção, devido a acréscimos no fator água, ou seja, verifica-se sempre constante o produto físico marginal (acrécimo no rendimento, resultante da utilização de uma unidade a mais do fator água).

Vários trabalhos têm sido desenvolvidos, relacionando funções de resposta das culturas ao decréscimo de umidade ou à quantidade

de água no solo, visando a uma produção econômica (STEWART & HAGAN, 1973; VELEZ & GARZA, 1978; MARTIN et al., 1984; ENGLISH, 1990). No Brasil, as pesquisas concentraram-se, inicialmente, nos estudos do rendimento das culturas como efeito dos fertilizantes aplicados. Os efeitos da lâmina de irrigação sobre a produção, considerando os aspectos econômicos, destacam-se, dentre outros, nos trabalhos realizados por FRIZZONE (1986), AGUIAR (1989) e OLIVEIRA (1993).

A função matemática que fornece a quantidade produzida, a partir do conjunto de insumos, é representada da seguinte forma:

$$Y = Y ( W_1 , W_2 , W_3 , \dots , W_n ) \quad [6]$$

em que Y é a quantidade produzida e  $W_i$  ( $i=1,2,3, \dots , n$ ) são os insumos que participam do processo de produção.

A função de resposta da cultura à irrigação, representada por um polinômio de segundo grau (Figura 2), tem a forma:

$$Y (W) = A + B W + C W^2 \quad [7]$$

em que,

Y(W) - estimativa da produção da cultura, Kg/ha;

W - lâmina total de água aplicada, mm;

A, B, e C - parâmetros de ajuste da equação.

Pela Figura 2, verifica-se que, quando uma pequena quantidade de água é aplicada, esta é quase totalmente utilizada pela cultura e, para maiores quantidades, os acréscimos na produção são progressivamente menores, indicando perdas de água quando se está próximo da condição de máxima produção. A água aplicada, além do ponto de produção máxima, provoca redução da produção em consequência da diminuição da aeração do solo, da lixiviação de nutrientes e, provavelmente, do desenvolvimento de doenças associadas ao excesso de umidade (STEGMAN et al., 1980).

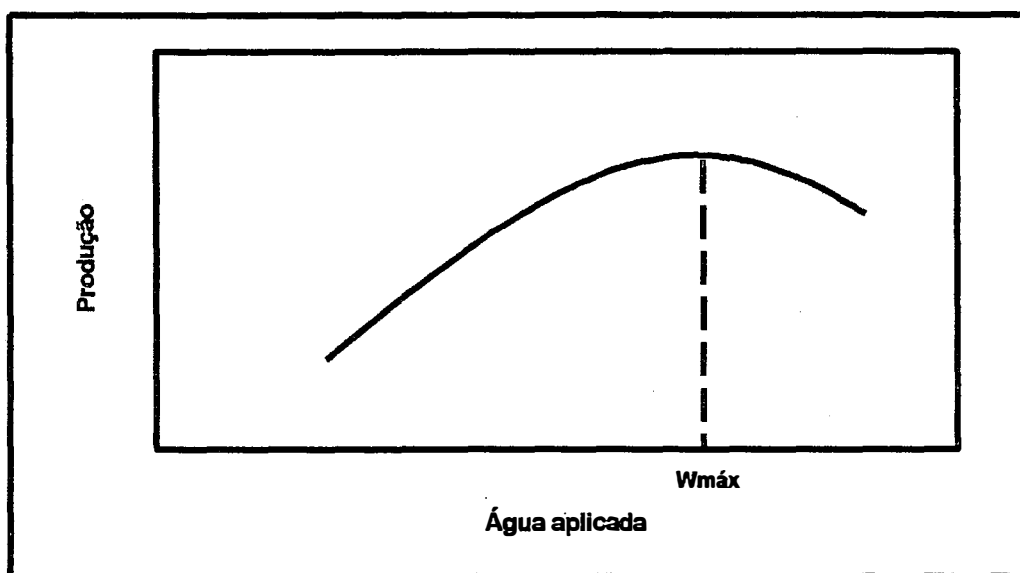


Figura 2. Função de resposta da cultura à irrigação (FRIZZONE, 1993).

A função de produção, dada pela equação 7, tem um máximo em  $W = W_{\text{máx}}$ , conforme esquematizado na Figura 2, igualando-se a zero sua derivada em relação a  $W$ , ou seja:

$$\frac{d Y (W)}{d W} = B + 2 C W = 0 \quad [8]$$

$$W_{\max} = -\frac{B}{2 C} \quad [9]$$

em que  $W_{\max}$  é a lâmina total de irrigação necessária para máxima produção.

### 2.3.1. Funções de custo e receita

Em qualquer atividade que requeira investimentos e utilização freqüente de insumos, a análise dos componentes de custos é indispensável para se verificar a viabilidade do empreendimento. Tratando-se de agricultura irrigada, isso não é diferente, pois existe uma série de variáveis que caracterizam a exploração econômica das culturas.

Segundo HART et al. (1980) o custo total de produção de uma cultura irrigada pode ser representado por uma função linear da forma:

$$C (W) = C_o + C_w W \quad [10]$$

em que,

$C(W)$  - custo de produção da cultura irrigada, por unidade de área, para uma determinada lâmina de água aplicada;

$C_o$  - custo de produção da cultura, por unidade de área, incluindo todos os custos não diretamente relacionados com a aplicação de água e

os custos de irrigação que não são função da lâmina de água aplicada;

$C_w$  - custo do volume unitário de água aplicado;

$W$  - volume de água aplicado por unidade de área.

A função de custos apresenta três importantes características (Figura 3b): o limite inferior, ou intercepto com a ordenada, representa os custos fixos anuais (equipamentos, maquinaria e operações de campo) e os custos variáveis de produção (sementes, fertilizantes, colheita); a declividade representa os custos marginais de produção (bombeamento, água, mão-de-obra, manutenção); o limite superior, a capacidade total do sistema (HART et al., 1980).

A receita líquida é dada pela diferença entre a receita bruta e os custos de produção envolvidos (fixos e variáveis). Custos fixos são os custos que não variam com a quantidade produzida, enquanto os variáveis são aqueles que variam de acordo com o nível de produção. A receita líquida obtida para uma determinada cultura irrigada pode ser estimada por:

$$IL(W) = P_i Y(W) - C(W) \quad [11]$$

em que,

$IL(W)$  - receita líquida por unidade de área;

$P_i$  - preço pago pelo produto.



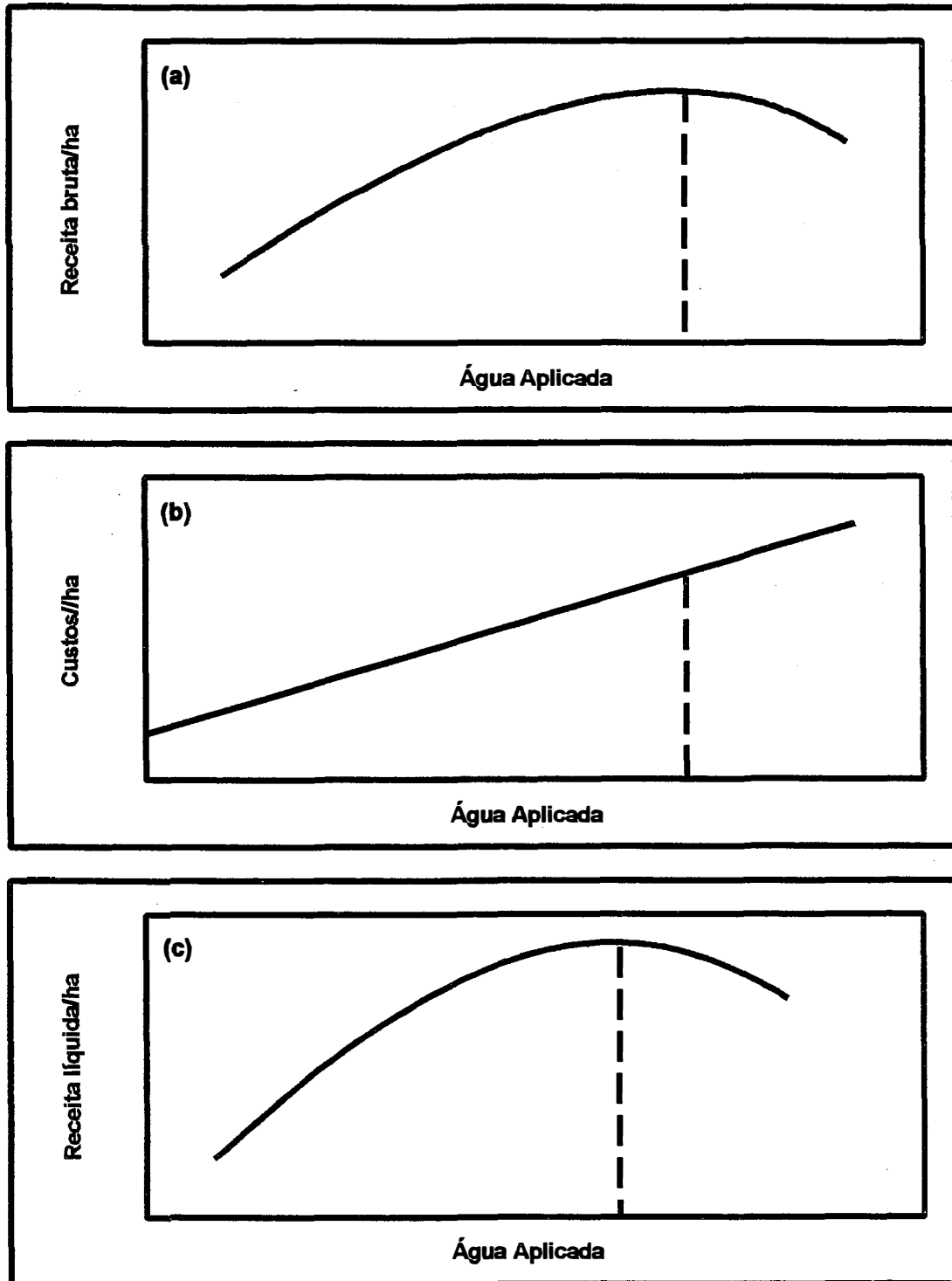


Figura 3. Funções de receita bruta, custos e receita líquida (FRIZZONE, 1993).

## 2.4. Otimização da irrigação

Sob condições em que o recurso água não é fator limitante à produção e o custo da energia é reduzido, verifica-se que a produção máxima econômica ótima é muito próxima da produção máxima da cultura. No caso de escassez ou custos elevados de água e energia, considerações econômicas devem ser estudadas para decisão sobre o manejo da irrigação e operação dos sistemas (MARTIN et al., 1984).

ENGLISH (1990), estudando as estratégias de maximização da receita líquida, utilizou o conceito de irrigação com déficit. Supondo que uma função de produção seja conhecida, esta pode ser incorporada na análise que considera todos os fatores que influenciam a lucratividade da irrigação. Apesar da dificuldade de se determinar precisamente a lâmina de água que maximiza a receita líquida, é possível definir um intervalo dentro do qual ela será maior que àquela obtida quando se utiliza a lâmina de água que maximiza a produção. Nesse intervalo, a irrigação com déficit apresenta lucratividade superior àquela alcançada quando se aplica a totalidade de água para máxima produção. Equações foram derivadas para estimar tal intervalo, quando da utilização de apenas uma cultura e com restrição de água e terra. Segundo o autor, o nível ótimo econômico ocorrerá no ponto em que o custo marginal de produção (variação no custo total devida à variação de uma unidade na taxa de produção) se iguala à receita marginal (variação na receita total devida à

variação de uma unidade na quantidade vendida) obtida com a venda do produto.

Os recursos disponíveis, especificamente a água e a terra, são fatores determinantes no modelo desenvolvido por ENGLISH et al.(1990). Quando a água é fator limitante, ela determina a área a ser plantada e, quando a terra é limitante, a área plantada não depende do fator água, estando toda a terra disponível para utilização. HARGREAVES & SAMANI (1984) analisaram a limitação de água e de terra em relação aos níveis de rentabilidade econômica, mostrando que: se o custo da irrigação é maior que zero, a aplicação de água deve se dar abaixo do ponto de máxima produção, de forma a se obter a maximização da receita líquida; se a terra é limitante, a economicidade da irrigação mostrou-se sensível ao preço do produto e às lâminas de irrigação com déficit aplicadas; a lâmina ótima tende a se aproximar da lâmina para máxima produção quando a terra é limitante, ou o preço do produto e a produtividade são elevados, ou ainda, quando os custos da irrigação são reduzidos.

Considerando a irrigação com déficit e sem déficit, ENGLISH & NUSS (1982) compararam os custos e o valor da produção de trigo e verificaram redução de 40% nos gastos com energia elétrica e 24% na água total aplicada. A receita líquida aumentou em até 42%. Os custos com a irrigação com déficit foram reduzidos pela diminuição do volume de água consumido, reduzindo-se o bombeamento de água.

**ENGLISH (1990), apresentou estratégias de maximização da receita líquida, baseando-se na resposta da cultura à irrigação, nos custos de produção e outros fatores que influenciam na lucratividade, estimando-se lâminas de água a aplicar, de modo a que proporcione o máximo rendimento econômico. Um conjunto de equações foram derivadas pelo autor, considerando o caso específico de uma função de resposta da cultura à irrigação do tipo quadrática e uma função de custos linear.**

**A receita líquida maximiza-se (considerando a água como fator variável) se a derivada primeira do rendimento em relação à lâmina total de água (produto físico marginal ou variação do produto físico total decorrente da variação de uma unidade do fator), for igual à relação de preços do fator e do produto (ENGLISH, 1990).**

**Dentro das estratégias utilizadas para otimização da irrigação, existem limitações que correspondem às restrições de terra e água e, juntamente com as funções de resposta da cultura à irrigação integram os fatores de análise econômica.**

**Quando a disponibilidade de terra à produção é o único fator limitante, a estratégia ótima de irrigação consiste em aplicar a quantidade de água que maximize a receita líquida por unidade de área, o que corresponde a maximizar a diferença entre as funções de custo e receita bruta (FRIZZONE, 1993). No caso de ser a água o fator limitante, o objetivo é encontrar o nível de água que maximize a receita líquida, por unidade de volume de água, sendo**

o custo de oportunidade a mais importante consideração no manejo da irrigação.

Assim, sendo  $A_i$  a área cultivada com uma cultura  $i$ , sob irrigação, a receita líquida total correspondente será:

$$IF(W) = A_i IL(W) \quad [12]$$

em que  $IF(W)$  é a receita líquida total da cultura  $i$ , na área  $A_i$ ;

Se a disponibilidade de terra é o fator limitante à produção, a receita líquida total ( $IF(W)$ ) tem um máximo quando

$$A_i \frac{\partial IL(W)}{\partial W} + IL(W) \frac{\partial A_i}{\partial W} = 0 \quad [13]$$

Considerando  $A_i$  constante e a receita líquida  $IL(W)$  dada pela equação [11], tem-se:

$$P_i \frac{\partial(W)}{\partial W} = \frac{\partial C(W)}{\partial W} \quad [14]$$

Com as derivadas das equações [11] e [10] substituídas na equação [14], obtém-se:

$$W_i^* = \frac{C_w - P_i B}{2 P_i C} \quad [15]$$

em que,

$W_i^*$  - lâmina de água que permite obter a máxima receita líquida quando a disponibilidade de terra é o fator limitante à produção;

Quando a disponibilidade de água é o fator limitante à produção,  $A_i$  é função de  $W$ , isto é:

$$A_i = \frac{W_t}{W} \quad [16]$$

em que  $W_t$  é a disponibilidade total de água.

Portanto,

$$\frac{d A_i}{d W} = - \frac{W_t}{W^2} \quad [17]$$

Com as equações [16] e [17] na equação [13], tem-se:

$$W \left( P_i \frac{\partial Y(W)}{\partial W} - \frac{\partial C(W)}{\partial W} \right) = P_i Y(W) - C(W) \quad [18]$$

Resolvendo a equação [18], obtém-se:

$$W_w = \sqrt{\frac{P_i A - C_o}{P_i B}} \quad [19]$$

em que,

$W_w^*$  - lâmina de água que permite obter a máxima receita líquida quando a disponibilidade de água é o fator limitante à produção.

Sendo a quantidade de água um ponto na curva, este tem pouco significado prático. Além disso, devido às incertezas a que está submetida a função de produção, o autor define um intervalo dentro do qual a receita líquida é maior que aquela obtida quando se utiliza a quantidade de

água que maximiza a produção. Esse intervalo é denominado de intervalo para manejo racional da água (FRIZZONE, 1993), e objetiva minimizar os riscos econômicos devidos à estimativa da produção por não se conhecer com precisão a forma da curva de produção em função da água aplicada e, portanto, não se poder determinar com certeza o nível de água que maximizará a receita líquida (Figura 4). Nesse intervalo, a irrigação com déficit deverá ser mais rentável que a irrigação sem déficit (máxima produção).

Os limites inferiores do intervalo quando a disponibilidade de terra ou de água são fatores limitantes à produção são :

$$W_e = \frac{C_w - P_l B + Z_1}{2 P_l C} \quad [20]$$

$$W_{ew} = \frac{Z_1 - \sqrt{Z_2^2 - 4 P_l C (P_l A - C_w)}}{2 P_l C} \quad [21]$$

em que,

$W_e$  - corresponde à lâmina que conduz a uma receita líquida igual à proporcionada por  $W_{máx}$ , quando a disponibilidade de terra é limitante;

$W_{ew}$  - corresponde à lâmina que conduz a uma receita líquida igual à proporcionada por  $W_{máx}$ , quando a disponibilidade de água é limitante;

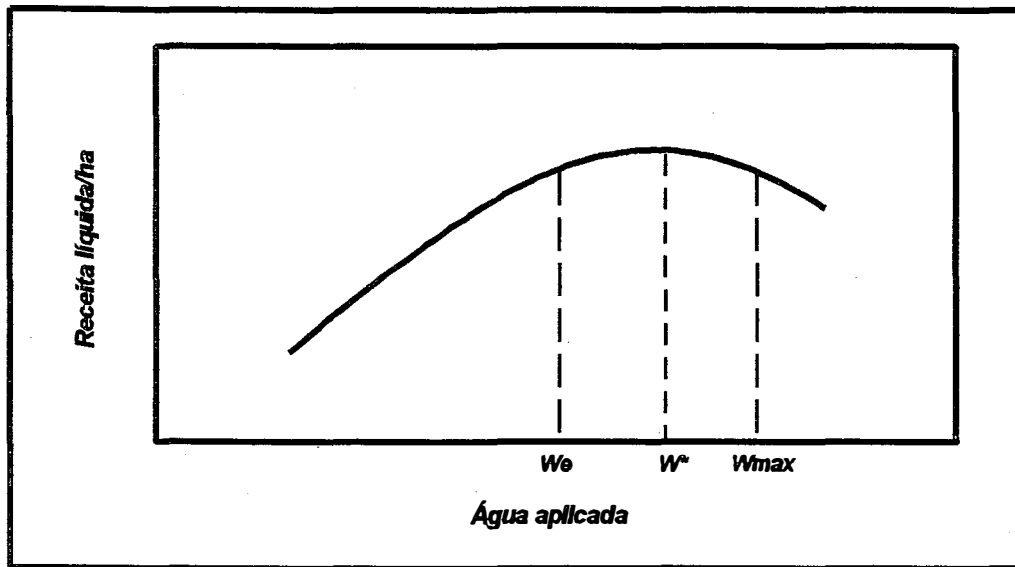


Figura 4. Intervalo para manejo racional da irrigação quando a disponibilidade de terra é o fator limitante à produção.

Os parâmetros  $Z_1$  e  $Z_2$  são calculados por:

$$Z_1 = \sqrt{(P_1 B - C_w)^2 - 4 P_1 C \left( \frac{P_1 B^2}{4 C} - \frac{B C_w}{2 C} \right)} \quad [22]$$

$$Z_2 = \frac{P_1 B^2 - 4 C_o C + 4 P_1 A C}{2 B} \quad [23]$$

## 2.5. Conceito de lâmina ótima de irrigação

Estimativas mais precisas da produção a partir da combinação dos recursos disponíveis (principalmente, a água e os nutrientes) tem sido objeto de vários estudos nos últimos anos. Dos fatores de produção, a água



e os nutrientes, são os que limitam os rendimentos com maior frequência. Assim, um maior controle da água no solo e de sua fertilidade, constitui um critério essencial para o êxito da agricultura (FRIZZONE, 1993). Seja em regiões áridas ou semi-áridas, onde a água é escassa, e também em regiões úmidas, a otimização da produção se dá, necessariamente, pela utilização adequada e racional do recurso água. Por isso, a determinação da quantidade de água a ser fornecida à cultura, de forma a alcançar uma produção econômica ótima e, conseqüentemente, de estratégias de operação de sistemas de irrigação têm sido os objetivos de vários estudos realizados.

A aplicação da água por sistemas de irrigação não é perfeitamente uniforme. Em geral, para um método de irrigação em particular, elevada uniformidade pode ser alcançada, ocorrendo, no entanto, um aumento dos custos de operação. Do ponto de vista econômico, um certo grau de desuniformidade é plenamente justificado, minimizando-se os efeitos ou os custos dessa falta de uniformidade através da seleção apropriada das práticas de irrigação (FRIZZONE, 1992).

Assumindo que um sistema de irrigação aplica água segundo um modelo de distribuição, existe uma lâmina ótima que deve ser infiltrada, de forma a minimizar a redução da receita líquida esperada, devida ao excesso e ao déficit de água que ocorrem em respectivas frações da área. A essa 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 para uma irrigação em particular, minimizando a redução da receita devida ao excesso e ao déficit de água na área (NORUM et al.,1979; PERI et al. 1979). A lâmina ótima está relacionada com a lâmina de irrigação requerida em um dado momento, correspondente àquela quantidade de água que, infiltrada no solo, proporcionará a máxima receita líquida.

O conceito de lâmina ótima (sistema de lâmina ótima) foi apresentado pelos autores, a partir da análise econômica de sistemas de irrigação, considerando a redução da receita líquida devida ao excesso e ao déficit de água. Tal conceito foi desenvolvido e analisado, de forma a ser amplamente utilizado, auxiliando as práticas de irrigação e conduzindo a maiores lucros.

A lâmina ótima e a lâmina de água requerida dependem da cultura, do solo, do clima, dos custos da irrigação e, entre outros, do grau de umidade inicial do solo. A lâmina ótima depende ainda do modelo de distribuição de água sobre o solo, sendo portanto, uma função do sistema de irrigação e da forma como este sistema é operado. O conceito de lâmina ótima de irrigação, poderá ser utilizado em qualquer sistema de irrigação, sendo conhecida a distribuição de água aplicada.

Na prática da irrigação, a situação mais comum é a distribuição não uniforme de água, resultando na redução da receita líquida devida ao excesso e ao déficit de água. Portanto, a lâmina média de água a ser aplicada

deve ser tal que a redução da receita líquida devida ao excesso e ao déficit seja mínima.

A redução da receita líquida por unidade de área devida ao déficit de água,  $L_d$ , é uma função da diferença entre a lâmina requerida,  $X_r$ , e a lâmina infiltrada,  $X_i$ , isto é:

$$L_d = L_d (X_r - X_i) \quad [24]$$

em que  $X_r > X_i$ .

Igualmente, a redução da receita líquida por unidade de área devida ao excesso de água,  $L_e$ , é uma função da diferença entre a lâmina infiltrada e a lâmina requerida:

$$L_e = L_e (X_i - X_r) \quad [25]$$

em que  $X_i > X_r$ .

A redução da receita líquida total na área irrigada, devida ao excesso e ao déficit pode ser generalizada da seguinte forma:

$$L_t = \int_0^{a_r} L_e da + \int_{a_r}^1 L_d da \quad [26]$$

em que  $a_r$  é a fração da área que recebe uma lâmina de água igual ou superior a lâmina requerida.

Na Figura 5 tem-se uma ilustração das áreas de excesso e de déficit de água, conhecendo-se a forma de distribuição de água do sistema.

Considerando as funções  $L_d$  e  $L_e$  lineares, e os custos devido ao déficit e ao excesso diretamente proporcionais aos volumes, tem-se:

$$L_d = \beta (X_r - X_l) \quad [27]$$

$$L_e = \alpha (X_l - X_r) \quad [28]$$

em que,

$\beta$  - redução da receita líquida por unidade de volume de déficit de água.

$\alpha$  - redução da receita líquida por unidade de volume de excesso de água.

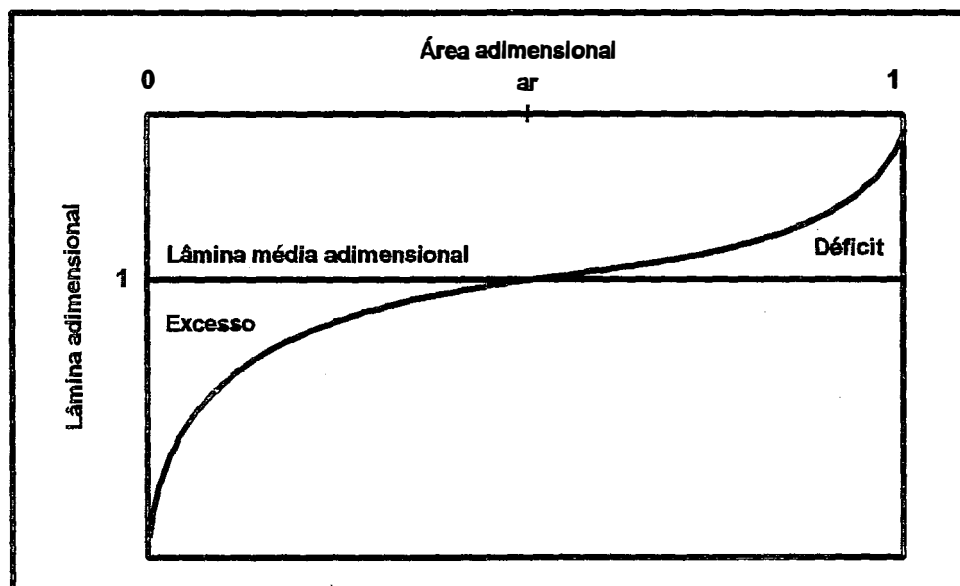


Figura 5. Áreas de excesso e de déficit em função da distribuição de água de um sistema de irrigação.

Aplicando as equações [27] e [28] à equação [26], tem-se:

$$L_t = \beta V_d + \alpha V_e \quad [29]$$

em que,

$V_d$  - volume de déficit de água na área;

$V_e$  - volume de excesso de água na área.

O conceito de lâmina ótima de irrigação, desenvolvido por PERI et al. (1979), para uma irrigação em particular considera as duas seguintes situações ou casos especiais:

- a) caso 1 - o requerimento é fixo e a distribuição final da água, com média  $X_m$ , deverá ser determinada, sendo função do sistema e do tempo de aplicação. Por exemplo, os sistemas convencionais de irrigação por aspersão, em que o tempo de irrigação é facilmente controlado e o perfil de distribuição de água pode ser assumido como função linear do tempo.
- b) caso 2 - a distribuição final da água, com lâmina média  $X_m$ , é fixa e o requerimento ótimo,  $X_r^*$ , deve ser determinado. Nesse caso, têm-se os sistemas de irrigação por superfície, onde a quantidade de água aplicada quase não é modificada, pois, normalmente, a lâmina média é fixa, devido à utilização de um modelo de distribuição fixo. Também nesse caso, têm-se os sistemas de aspersão que, devido a certas condições operacionais, aplicam a água necessária num tempo fixo.

No primeiro caso, a lâmina média ótima é determinada de forma a resultar na mínima redução da receita líquida. Assumindo a aplicação de água uma função linear com o tempo,  $(X(a,t))$ , em sistemas convencionais de irrigação por aspersão, tem-se:

$$X(a,t) = t I(a) \quad [30]$$

em que,

$t$  - tempo de irrigação;

$I(a)$  - função de distribuição da lâmina de irrigação por unidade de tempo, sendo que a determinação da lâmina ótima corresponde a determinação do tempo de irrigação, ou seja:

$$t = \frac{X_m}{I} \quad [31]$$

em que,

$I$  - lâmina de água aplicada por unidade de tempo.

A condição ótima de operação consiste na minimização da equação [26], isto é:

$$\frac{dL_t}{dT} = \frac{d}{dT} \left[ \int_{a_r}^1 L_d (X_r - X(a,t)) da + \int_0^{a_r} L_e (X(a,t) - X_r) da \right] = 0 \quad [32]$$

que resulta na expressão (PERI et al., 1979):

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{\int_0^{a_r} l(a) da}{\int_{a_r} l(a) da} \quad [33]$$

Quando  $\beta/\alpha$  é conhecido e a função de distribuição  $l(a)$  é fixa,  $a_r$  pode ser determinado pela equação [33] e sabendo que  $X_r = t l(a_r)$ , pela equação [30], obtém-se:

$$X_m = l \frac{X_r}{l(a_r)} \quad [34]$$

Para uma distribuição normal, verifica-se:

$$a(X_r) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{X_r - X_m}{\sqrt{2} s} \right) \quad [35]$$

em que,

$s$  - desvio padrão das lâminas de água;

$\operatorname{erfc}$  - função erro complementar.

Substituindo a equação [35] na equação [33], PERI et al. (1979) encontraram:

$$\frac{\beta}{\alpha} = \left( \frac{\operatorname{erfc} \left[ \frac{-1}{\sqrt{\pi} (1-CUC)} \right] + (1-CUC) \exp \left[ - \left( \frac{-1}{\sqrt{\pi} (1-CUC)} \right)^2 \right]}{\operatorname{erfc} \left[ \frac{h_r-1}{\sqrt{\pi} (1-CUC)} \right] + (1-CUC) \exp \left[ - \left( \frac{h_r-1}{\sqrt{\pi} (1-CUC)} \right)^2 \right]} \right)^{-1} \quad [36]$$

em que,

**CUC** - coeficiente de uniformidade de Christiansen;

$h_r$  - requerimento adimensional ( $X_r/X_m$ ).

A condição ótima de operação do sistema, para o primeiro caso, consiste na determinação do valor adimensional  $h_r$ , que satisfaça a equação [36]. Assim, a lâmina média ótima de irrigação ( $X_m^*$ ) será:

$$X_m^* = \frac{X_r}{h_r} \quad [37]$$

No segundo caso, resolvendo a equação [26] e, quando a relação  $\beta/\alpha$  é conhecida, PERI et al. (1979) mostraram que para minimizar a redução da receita líquida total devida ao excesso e ao déficit de água, deve-se verificar:

$$a_r^* = \frac{\frac{\beta}{\alpha}}{1 + \frac{\beta}{\alpha}} \quad [38]$$

Os autores mostraram que, para uma distribuição normal, tem-se:

$$\frac{\beta}{\alpha} = \left[ \frac{2}{\operatorname{erfc} \left( \frac{h_r - 1}{\sqrt{\pi} (1 - \text{CUC})} \right)} - 1 \right]^{-1} \quad [39]$$

A condição ótima de operação do sistema, para o segundo caso, consiste na determinação do valor adimensional  $h_r$ , que satisfaça a



equação [39]. Assim, para uma função de distribuição de água com lâmina média  $X_m$ , conhecido  $\beta/\alpha$  (equação 39) e determinado o valor de  $h_r$ , o requerimento ótimo ( $X_r^*$ ) será:

$$X_r^* = h_r X_m \quad [40]$$

No segundo caso, o requerimento ótimo ( $X_r^*$ ) determinado deve proporcionar a maximização da receita líquida. A frequência de irrigação é determinada pelo intervalo de tempo T, isto é:

$$T = \frac{X_r^*}{ET} \quad [41]$$

em que,

ET - evapotranspiração média diária

A principal limitação da metodologia desenvolvida por PERI et al. (1979) é os custos do excesso e do déficit de água de irrigação serem considerados diretamente proporcionais às suas quantidades. Uma vez que o conceito foi desenvolvido para cada irrigação em particular, deve-se considerar que tais parâmetros podem variar ao longo da cultura. Um déficit ou um excesso de água em uma determinada fase do ciclo da cultura pode ter custos diferentes daqueles ocorridos em outras fases.

Com a metodologia proposta por PERI et al. (1979), DUKE et al. (1992) determinaram a lâmina de água econômica aplicada, utilizando sistemas de irrigação pivô-central, quando a disponibilidade de água não é

limitante à produção. Para o cálculo da perda econômica devida ao excesso de água aplicada, consideraram os custos da água em excesso, o custo do fertilizante lixiviado abaixo da zona radicular, a perda de produção, se a lixiviação resulta em déficit de nutrientes, e os custos ambientais.

Segundo os autores, a perda econômica por unidade de volume de excesso ( $\alpha$ ) pode ser expressa por:

$$\alpha = V_w + V_f F_l + V_c \frac{F_l}{F_u} + E_f F_l \quad [42]$$

em que,

$V_w$  - custo da água aplicada em excesso, US\$/mm.ha;

$V_f$  - custo do fertilizante lixiviado, US\$/Kg;

$F_l$  - concentração do fertilizante lixiviado na água, Kg/mm.ha;

$V_c$  - valor do produto, US\$/Kg;

$F_u$  - fertilizante utilizado por unidade produzida, Kg/Kg;

$E_f$  - custo ambiental devido ao fertilizante lixiviado, US\$/Kg.

Assumindo que as perdas econômicas são funções lineares do volume de déficit ou excesso de água aplicada, e que o déficit pode resultar na redução da produção devida ao estresse e à não utilização de fertilizantes, a perda econômica por unidade de volume de déficit ( $\beta$ ) será:

$$\beta = V_c Y_w + V_f F_u Y_w \quad [43]$$

em que,

$Y_w$  - redução da produção por unidade de volume de déficit, Kg/mm.ha.

Estimando, dessa forma, as perdas econômicas decorrentes do déficit e do excesso de água aplicada, os autores determinam a lâmina ótima econômica requerida, para a qual o sistema deve aplicar uma lâmina média de água com distribuição conhecida, segundo PERI et al. (1979) para o segundo caso de estudo. Os resultados mostram a importância da uniformidade de distribuição de água pelo sistema e dos custos considerados nos cenários econômicos apresentados para exploração da cultura de milho.

A metodologia proposta por DUKE et al. (1992) pode ser utilizada em estudos experimentais de resposta da cultura à irrigação, onde os parâmetros relativos a quantidade de fertilizantes lixiviados pela água de irrigação são facilmente determinados e os custos ambientais decorrentes da lixiviação podem ser melhor avaliados e estimados. Esses custos são estabelecidos segundo uma legislação própria de cada região onde ocorre uso inadequado de produtos ou elementos nocivos ao meio ambiente.

Portanto, é necessário estudar outra técnica, relativamente simples, para estimar os indicadores de redução da receita líquida devida ao excesso e ao déficit de água aplicada à cultura, de forma a possibilitar uma previsão do manejo da irrigação que resulte no melhor resultado econômico da cultura irrigada.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

**A obtenção de soluções ótimas torna-se cada vez mais difícil, na medida que um número maior de variáveis, decorrentes da diversidade de situações existentes, deve ser levado em consideração. A maior dificuldade consiste na análise dos dados, na organização e na otimização dos cálculos. Tornando tais procedimentos mais eficientes, a utilização dos recursos computacionais ganha importância indiscutível para, via simulação, auxiliar nas decisões que resultem no melhor resultado econômico.**

#### **3.1. Modelo computacional: descrição**

**Um modelo computacional foi desenvolvido para prever a condição ótima de operação de sistemas de irrigação por aspersão convencional e pivô-central, a partir das metodologias propostas por ENGLISH (1990), para maximização da receita líquida, e HART et al.(1979) e NORUM et al. (1979), para redução das perdas econômicas devida ao déficit e ao excesso de água aplicada.**

O modelo computacional, codificado em linguagem Pascal no ambiente Turbo, para utilização em microcomputadores da linha IBM-PC e compatíveis, tem a finalidade de oferecer maior rapidez na verificação de diversas condições de operação de sistemas de irrigação, a partir dos dados de produção das culturas. Com isso, é possível verificar o comportamento dos parâmetros determinantes da receita líquida do produtor ou empresa agrícola, principalmente, dos recursos disponíveis e custos de produção.

A condição ótima de operação de um sistema de irrigação por aspersão convencional ou pivô-central, utilizando o modelo apresentado, é simulada seguindo o procedimento:

- a) identificar o sistema de irrigação e suas características de operação;
- b) conhecer a uniformidade de distribuição e simular as lâminas de água aplicadas pelo sistema;
- c) definir a cultura a ser irrigada, a função de resposta à irrigação, os custos de produção e determinar a lâmina ótima econômica, ou quantidade de água a ser aplicada que maximize a receita líquida;
- d) estimar a redução da receita líquida decorrente do déficit ou do excesso de água de irrigação aplicada;
- e) otimizar a operação do sistema, minimizando a redução da receita líquida, devida ao déficit e ao excesso de água aplicada;
- f) verificar a qualidade da irrigação para as condições ótimas de operação do sistema de irrigação.

**O modelo requer os seguintes dados de entrada:**

**1) Sistema de irrigação: área irrigada (ha), vazão do sistema ( $\text{m}^3/\text{h}$ ), lâmina média aplicada (mm) e coeficiente de uniformidade de Christiansen (%);**

**2) Cultura: função de resposta à irrigação (coeficientes da função: A, B, C) e duração do ciclo da cultura (meses);**

**3) Custos de produção: custo de produção da cultura irrigada, não relacionados à irrigação (US\$/ha), custo da aplicação da água de irrigação (US\$/mm.ha). Quando tais custos não são conhecidos, as informações ou registros da propriedade com as atividades, equipamentos e implementos, mão-de-obra e insumos, tarifa de energia elétrica, valor dos equipamentos, etc., podem ser fornecidos para estimativa do custo de produção da cultura, inclusive do custo da água de irrigação;**

**4) Preço do produto: valor pago ao produtor por unidade de produto (US\$/kg).**

**Com os dados de saída é possível uma análise da melhor alternativa para operação do sistema, levando em consideração o custo de produção, o preço do produto e a uniformidade de aplicação de água.**

**O modelo fornece os seguintes dados de saída:**

**1) Lâmina total de irrigação para máxima produção (mm), produção máxima da cultura (Kg/ha), lâmina total de água ótima econômica (mm), produção ótima (kg/ha) e receita líquida ótima (US\$/ha);**

**2) Condição ótima de operação: redução da receita líquida devida ao déficit e ao excesso de água aplicada (US\$/mm.ha), lâmina média ótima para aplicação pelo sistema (mm) quando a lâmina requerida é fixa (caso 1) e, lâmina ótima requerida (mm) para aplicação da lâmina média fixa do sistema (caso 2 ), considerando uma irrigação em particular;**

**3) Qualidade da irrigação: eficiência de aplicação (%), eficiência de armazenamento (%), perda por percolação (%) e área adequadamente irrigada (%).**

### **3.1.1. Sistemas de irrigação**

Os sistemas de irrigação por aspersão convencional ou pivô-central, utilizados para prever a operação ótima, são identificados pelas seguintes características: área irrigada, ha; vazão do sistema, m<sup>3</sup>/h; altura manométrica total, mca; lâmina média aplicada, mm; e, coeficiente de uniformidade de Christiansen, %.

### **3.1.2. Uniformidade de distribuição de água**

O modelo utiliza o coeficiente de uniformidade de Christiansen como medida da uniformidade de distribuição de água pelo sistema. Sua expressão é:

$$CUC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |X_i - X_m|}{X_m n} \quad [44]$$

em que,

**CUC** - coeficiente de uniformidade de Christiansen, %;

**X<sub>i</sub>** - lâmina coletada no coletor i, mm;

**X<sub>m</sub>** - lâmina média, considerando todos os coletores, mm;

**n** - número de coletores.

No caso de sistema pivô-central, para o coeficiente de uniformidade de Christiansen adota-se o procedimento sugerido por HEERMANN & HEIN (1968), que proporcionaliza as lâminas de água coletadas, ou seja:

$$CUC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N S_i |X_i - X_{mp}|}{X_{mp} \sum_{i=1}^N S_i} \quad [45]$$

em que,

**X<sub>mp</sub>** - lâmina média ponderada, considerando todos os coletores, mm;

**S<sub>i</sub>** = i, para i = 1, 2,3, ..., N, com os coletores eqüidistantes.

A lâmina média ponderada é expressa por:

$$X_{mp} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i S_i}{\sum_{i=1}^N S_i} \quad [46]$$



Considerando que as lâminas de água aplicadas apresentam uma distribuição normal, para sistemas de irrigação por aspersão, a uniformidade é medida por um coeficiente expresso em função do desvio padrão (s), segundo a equação (HART, 1961):

$$CUH = 1 - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{s}{X_m} \quad [47]$$

Como as lâminas de água aplicadas pelo sistema têm distribuição normal (HART & REYNOLDS, 1965; HART et al., 1980 e WALKER, 1979), verifica-se que CUC = CUH.

Conhecendo-se a lâmina média de água aplicada ( $X_m$ ) e o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), e com o desvio padrão (s) dado pela equação [47], os valores de lâminas de água normalmente distribuídas são estimados, utilizando-se a aproximação polinomial de ABROMOWITZ & STEGUN (1972), ou seja:

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} (b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4) \quad [48]$$

sendo,

$$b_1 = 0,31938153;$$

$$b_2 = -0,356563782;$$

$$b_3 = 1,781477937;$$

$$b_4 = -1,821255778;$$

$$b_5 = 1,330274429;$$

$$t = \frac{1}{1 + 0,2316419 z} \quad [49]$$

$Q(z)$  - área sob a curva normal padrão, ou área sob a curva normal de distribuição das lâminas de água aplicadas;

$z$  - variável reduzida da função de distribuição, ou seja,

$$z = \frac{X_i - X_m}{s} = \frac{h_i - 1}{cv} \quad [50]$$

$X_i$  - lâmina de irrigação aplicada em cada ponto  $i$ ;

$h_i$  - lâmina de irrigação adimensional em cada ponto  $i$ ;

$cv$  - coeficiente de variação.

Sendo a aproximação (equação 48) limitada para valores positivos de  $z$ , e sabendo-se que  $-\infty < z \leq 0$ , tem-se:

$$Q(z) = 1 - Q(-z) \quad [51]$$

Ajusta-se assim, uma distribuição normal com a estimativa das lâminas de água aplicadas pelo sistema, para melhor análise da irrigação, definindo as áreas de déficit ou excesso de água.

### **3.1.3. Resposta da cultura à irrigação**

Neste trabalho, a função de resposta da cultura à irrigação, utilizada no modelo, é expressa por um polinômio de segundo grau, de acordo com a equação [7].

A função de produção é determinada experimentalmente e ajustada para um intervalo de valores de lâminas de irrigação (lâminas mínima e máxima de água aplicadas), sendo possível a estimativa do rendimento da cultura em função da quantidade de água aplicada.

### **3.1.4. Custos de produção das culturas**

Os custos de produção referem-se aos custos para exploração de culturas irrigadas. Esses custos consistem do custo de produção (custo por unidade de área) não diretamente relacionado com a aplicação de água e, do custo associado à aplicação da água de irrigação. O custo total pode ser representado por uma função linear (HART et al., 1980), de acordo com a equação [10].

Quando não se conhece o custo de produção da cultura, não diretamente relacionado à irrigação ( $C_o$ ), o modelo proposto utiliza para a sua estimativa a metodologia proposta por HOFFMANN et al. (1992), que se baseia no custo diário de serviços necessários à exploração, com máquinas e

implementos, considerando o valor atual do bem, a sua vida útil, os dias de serviço anual, a depreciação, a conservação e manutenção, além dos juros anuais. A partir de registros e informações da empresa agrícola, estimam-se os custos totais, incluindo insumos, mão-de-obra e outras atividades.

Segundo os autores, o custo do dia de serviço de cada máquina (D), é determinado de maneira bastante simples e satisfatória, pela expressão:

$$D = \frac{\frac{P - p}{N} + C_m + J}{M} \quad [52]$$

em que,

**P** - valor de compra;

**p** - valor residual;

**N** - número de anos de serviço;

**C<sub>m</sub>** - conservação ou manutenção e reparos anuais;

**J** - juros anuais sobre o valor de compra;

**M** - número total de dias de serviço realizados por ano.

No custo, incluem-se ainda o combustível, os lubrificantes consumidos pelas máquinas e implementos e os insumos agrícolas, resultando na expressão que estima o custo de produção, por unidade de área irrigada, não associado à aplicação de água (C<sub>0</sub>), ou seja:

$$C_o = \frac{D}{24} T_{op} + C_b + T_{op} C_{op} + CT_{ins} \quad [53]$$

em que,

$T_{op}$  - tempo de operação, horas;

$C_b$  - custos com combustíveis e lubrificantes, US\$;

$C_{op}$  - custo do operador, US\$/h;

$CT_{ins}$  - custo total de insumos, US\$.

### 3.1.4.1. Custos da irrigação

Não sendo conhecidos os custos da irrigação, esses são estimados pelo modelo, utilizando-se a metodologia apresentada por FRIZZONE et al. (1994) para sistemas pivô-central.

A estimativa dos custos da irrigação envolvem os custos fixos e os custos variáveis. Os custos fixos são os que ocorrem independentemente do funcionamento ou operação do sistema e incluem a depreciação do equipamento e a remuneração do capital investido. Os custos variáveis abrangem os dispêndios com energia, mão-de-obra, operação e manutenção (MELO, 1993).

Nos custos variáveis, os dispêndios com energia para irrigação são obtidos em função da demanda de potência e de consumo efetivo de energia (FRIZZONE et al., 1994).

O custo do consumo efetivo de energia é dado pela equação:

$$C_{ee} = Pot \cdot T_s \cdot P_{kwh} \quad [54]$$

em que,

$C_{ee}$  - custo do consumo efetivo de energia elétrica durante o ciclo da cultura, US\$;

$Pot$  - potência necessária ao acionamento da motobomba, kw;

$T_s$  - tempo de operação do sistema durante o ciclo da cultura, h;

$P_{kwh}$  - preço do kw.h consumido, US\$.

Para sistemas de irrigação o custo do consumo efetivo de energia, dado pela equação [54], pode variar de acordo com o tempo de operação, relacionado ao período de funcionamento em que ocorre redução da tarifa estabelecida pela concessionária de energia elétrica. Portanto,

$$C_{ee} = ( Pot \cdot T_{sd} \cdot P_{kwh} ) + ( Pot \cdot T_{cd} \cdot P_{kwh} ) \cdot Fr \quad [55]$$

em que,

$T_{sd}$  - tempo de funcionamento do sistema no horário sem desconto, h;

$T_{cd}$  - tempo de funcionamento do sistema no horário com desconto, h;

$Fr$  - fator de redução da tarifa no horário com desconto, em decimal.

O tempo de funcionamento do sistema, durante todo o ciclo da cultura, é obtido em função da necessidade total de água de irrigação e da capacidade operacional do sistema.

O custo da demanda de potência elétrica é obtido em função da potência instalada, da tarifa de demanda e do número de meses do ciclo da cultura, sendo expresso por:

$$Cdp = Pot_{inst} Td_m N_m \quad [56]$$

em que,

$Cdp$  - custo da demanda de potência elétrica, US\$;

$Pot_{inst}$  - potência instalada, kw;

$Td_m$  - tarifa de demanda, US\$/kw.mês;

$N_m$  - número de meses do ciclo da cultura.

O custo total da energia elétrica, considerando 13 % de ICMS, é expresso por:

$$Cte = ( Cee + Cdp ) 1,13 \quad [57]$$

Os custos fixos (nesse caso, associados à aplicação de água, e que incluem, principalmente, a depreciação do equipamento e os juros sobre o capital), segundo Coelho (1979)<sup>1</sup> e Neves & Shirota (1986)<sup>2</sup>, citados por FRIZZONE et al. (1994), são estimados pelas expressões:

---

<sup>1</sup>COELHO, J. F. de. Matemática financeira e análise de investimento. São Paulo: Ed. Nacional:Ed.da Universidade de São Paulo, 1979. 279p.

<sup>2</sup>NEVES, E. M. & SHIROTA, R. Considerações sobre a importância, determinação e atualização dos custos agrícolas. Programa de treinamento BANESPA. Piracicaba - SP, FEALQ/ESALQ/BANESER, 1986. 23p.

$$De = \frac{(C_i - C_f)}{(1 + r)^u - 1} \quad [58]$$

$$JSC = \frac{C_i \cdot r}{2} \quad [59]$$

em que,

**De** - quota anual de depreciação, US\$;

**C<sub>i</sub>** - valor inicial do sistema, US\$;

**C<sub>f</sub>** - valor final ou residual do sistema, US\$;

**r** - taxa de juros, decimal;

**u** - vida útil do sistema, anos;

**JSC** - juros sobre o capital, US\$.

Assim, a parcela do custo de produção associado à aplicação de água pelo sistema de irrigação, é estimada por:

$$Cw = \frac{Cte + De + JSC + CMO_{ir}}{N_{ir}} \quad [60]$$

em que,

**Cw** - custo do volume de água aplicado, US\$/mm.ha;

**CMO<sub>ir</sub>** - custo da mão-de-obra de irrigação, US\$;

**N<sub>ir</sub>** - necessidade total de água de irrigação, mm.



### 3.1.5. Lâmina ótima total de irrigação e maximização da receita líquida

A estimativa e a análise do rendimento econômico da cultura, a partir da determinação da lâmina ótima econômica de irrigação, segundo a proposta de ENGLISH (1990), considera:

a) conhecida a função de resposta da cultura à irrigação, é possível estimar a quantidade de água que proporciona o máximo rendimento ou produção máxima da cultura; sendo a função um polinômio de segundo grau, a quantidade de água que proporciona o máximo rendimento é estimada pela equação [9]. Logo, o rendimento máximo da cultura é estimado por:

$$Y(W_{m\acute{a}x}) = A + B W_{m\acute{a}x} + C W_{m\acute{a}x}^2 \quad [61]$$

b) a receita líquida, dada pela diferença entre a receita bruta e os custos de produção, é maximizada quando o custo marginal é igual à receita marginal obtida pela venda do produto. A função de receita líquida obtida com a cultura é estimada pela equação [11].

De acordo com as estratégias de maximização da receita líquida, propostas por ENGLISH (1990), e baseadas na resposta da cultura à irrigação e nos custos de produção, e considerando a limitação ou restrição

**Assim, a maximização da receita líquida é alcançada com a aplicação da lâmina ótima total econômica, que proporciona uma receita superior àquela quando se aplica a lâmina total para máxima produção.**

### **3.1.5.1. Preços do produto**

**Os preços do produto, que correspondem aos preços pagos ao produtor e formam a receita da atividade, são valores médios obtidos pelo Centro de Pesquisa em Economia Agrícola da Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz - CEPEA/FEALQ (PREÇOS AGRÍCOLAS, 1994). Os valores utilizados correspondem à variação de preços ocorrida de junho de 1993 a julho de 1994, permitindo uma análise da receita líquida, em função do preço do produto, numa condição de operação do sistema de irrigação.**

### **3.1.6. Otimização da irrigação e operação do sistema**

**A otimização da irrigação ocorre, necessariamente, com a aplicação da lâmina de água que maximiza a receita líquida e, segundo NORUM et al. (1979) e PERI et al. (1979), de forma a minimizar a redução da receita líquida devida ao déficit e ao excesso de água aplicada. Com isso, o sistema de irrigação opera em condições ótimas.**

Conhecendo-se a quantidade de água que proporciona o máximo retorno econômico da cultura e a distribuição de água pelo sistema, estimam-se as reduções da receita líquida decorrentes do déficit e do excesso de água aplicada.

### **3.1.6.1. Análise da perda econômica**

No modelo proposto, para estimativa e análise da perda econômica devida ao déficit e ao excesso de água aplicada considera-se que:

a) o sistema aplica a lâmina total de água em cada ponto ao longo da área irrigada, tendo-se, assim, uma distribuição dessas lâminas (cada ponto representa uma parcela da área total irrigada pelo sistema);

b) em cada ponto da área irrigada pelo sistema, conhecida a quantidade total de água aplicada no ciclo da cultura, estima-se uma receita líquida;

c) supondo uniforme a distribuição de água em toda a área, sob o sistema, tem-se uma receita líquida total ótima, proporcionada por uma lâmina total ótima econômica de irrigação ( $W^*$ );

d) a perda econômica em cada ponto  $i$  da área, sob o sistema, é estimada pela diferença entre receita líquida total obtida com a aplicação da lâmina total ótima econômica,  $W^*$ , e a receita líquida total no ponto, obtida com a correspondente lâmina total aplicada ( $W_i$ ), ou seja:

$$\Delta EC_i = IL^* - IL_i \quad [62]$$

em que,

$\Delta EC_i$  - perda econômica no ponto i ao longo da área irrigada, US\$;

$IL^*$  - receita líquida ótima obtida com a lâmina total ótima  $W^*$ , US\$;

$IL_i$  - receita líquida no ponto i, obtida com a lâmina  $W_i$ , US\$.

Verifica-se que a perda econômica em cada ponto pode ocorrer devida ao excesso ou ao déficit de água. Há déficit quando a lâmina total de água aplicada ( $W_i$ ) no ponto é menor que a lâmina ótima ( $W^*$ ) e, há excesso quando a lâmina total de água aplicada no ponto é maior que a lâmina total ótima de irrigação ( $W^*$ ).

Considerando que as lâminas de água aplicadas têm distribuição normal, a redução da receita líquida total devida ao excesso e devida ao déficit de água, podem ser estimadas pelas expressões:

$$\alpha = \frac{\int_0^{a_r} (IL_i - IL^*) da}{\int_0^{a_r} (W_i - W^*) da} \quad [63]$$

$$\beta = \frac{\int_1^a (IL^* - IL_i) da}{\int_{a_r}^1 (W^* - W_i) da} \quad [64]$$

em que,

$\alpha$  - redução da receita líquida devida ao excesso de água aplicada, US\$/mm.ha;

$\beta$  - redução da receita líquida devida ao déficit de água aplicada, US\$/mm.ha;

As soluções das integrais contidas nas equações [63] e [64] foram obtidas por aproximação de variações finitas.

### 3.1.6.2. Operação ótima do sistema

Conhecida a redução da receita líquida devida ao déficit ( $\beta$ ) e devida ao excesso de água ( $\alpha$ ), que correspondem às respectivas perdas econômicas estimadas pelo modelo (item 3.1.6.1), a operação ótima do sistema de irrigação é assegurada com a utilização da proposta de PERI et al. (1979) e NORUM et al. (1979) para os dois casos de estudo, descritos anteriormente (item 2.5).

No primeiro caso, para uma dada lâmina requerida ( $X_r$ ), a distribuição final da água, com média  $X_m^*$ , é estimada a partir da equação [36].

Conhecida a lâmina requerida adimensional,  $h_r$ , a lâmina média ótima de água ( $X_m^*$ ) que o sistema deve aplicar é obtida pela equação [37].

A lâmina média de água, nesse caso de estudo, proporcionará uma condição ótima de operação do sistema, resultando na mínima redução da receita líquida devida ao déficit e ao excesso de água aplicada.

No segundo caso, conhecida a distribuição de água, com média  $X_m$ , o requerimento ótimo ( $X_r^*$ ) é estimado a partir da equação [39].

Da mesma forma, conhecida a lâmina adimensional,  $h_r$ , e a lâmina média aplicada pelo sistema ( $X_m$ ), o requerimento ótimo ( $X_r^*$ ) é obtido pela equação [40].

Igualmente, o requerimento ótimo de água, nesse caso de estudo, proporcionará uma condição ótima de operação do sistema, resultando na mínima redução da receita líquida devida ao déficit e ao excesso de água aplicada.

### 3.1.7. Qualidade da irrigação

A qualidade da irrigação é avaliada para as diferentes condições ótimas de operação do sistema. Para um dado nível de exploração econômica da cultura, o modelo estima os parâmetros que expressam a qualidade da irrigação.

Os parâmetros de área adequadamente irrigada e de eficiências que expressam a qualidade da irrigação são estimados pelas equações [2], [3], [4] e [5], de acordo com WALKER (1979).

### **3.2. Aplicação do modelo**

O modelo desenvolvido para prever as condições de operação, foi aplicado utilizando-se dados de sistemas de irrigação pivô-central. Devido à dificuldade de informações de sistemas funcionando em diferentes condições de uniformidade e lâmina média aplicada, optou-se pela simulação das lâminas de água com distribuição normal, a partir de valores arbitrários de uniformidade e lâmina média. Assim, foi possível o estudo e as análises dos objetivos propostos no trabalho. Os dados relativos à custos de produção, para aplicação do modelo, são para a cultura de feijão, irrigado com sistemas pivô-central no município de Guaira - SP (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1994).

De acordo com as hipóteses formuladas para o manejo eficiente da água de irrigação, o modelo é aplicado para os seguintes casos: no primeiro, relacionado à primeira hipótese, o modelo estima a lâmina média que o sistema deverá aplicar para atender a um dado requerimento da cultura, distribuída de forma a proporcionar a máxima receita líquida; no segundo, correspondente à segunda hipótese, o modelo estima o requerimento para o qual o sistema deverá aplicar uma lâmina média de água, com distribuição conhecida e que proporciona a máxima receita líquida.

Para os casos estudados, procedeu-se à análise dos preços pagos pelo produto, dos custos da água e da uniformidade de distribuição de

água, verificando-se a melhor alternativa para a operação e manejo do sistema, para uma irrigação em particular.

### 3.2.1. Sistemas de irrigação

Os sistemas de irrigação, cujas lâminas de água simuladas têm distribuição normal, apresentam uniformidade de aplicação (CUC) que variam de 70% a 90%. Para cada uniformidade simularam-se distribuições com lâminas médias de 8 a 16 mm.

Os valores de uniformidade e lâminas médias, apesar de arbitrários, estão coerentes com os valores médios freqüentemente observados de acordo com a capacidade operacional de sistemas pivô-central.

### 3.2.2. Cultura e função de resposta à irrigação: $Y(W)$

Para análise econômica e otimização da operação do sistema de irrigação pelo modelo, utilizou-se a cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris*, L). A função de resposta da cultura, determinada por FRIZZONE (1986) num experimento realizado em Ilha Solteira, SP, tem a seguinte forma:

$$Y(W) = 63,9656 + 8,9745 W - 0,008503 W^2$$



A função foi ajustada para valores de 33,0 mm a 549,0 mm ( lâminas mínima e máxima de água de irrigação aplicada durante o ciclo da cultura) considerando um nível ótimo de adubação. A máxima produção obtida foi de 2432 kg/ha para uma lâmina total de irrigação correspondente a 527,7 mm.

### **3.2.3. Custos de produção da cultura: Ci**

Os custos de produção, que consistem no custo da produção da cultura irrigada sem considerar os custos associados à irrigação e no custo relacionado à aplicação da água, foram obtidos de informações apresentadas em trabalhos realizados com a cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris*, L), pelo INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (1994), no período de fevereiro a outubro de 1993.

#### **3.2.3.1. Custo não associado à irrigação: Co**

Este custo considera as operações motomecanizadas, insumos, mão-de-obra e outras atividades necessárias para a exploração da cultura irrigada. O custo de produção (Co) apresentou um valor médio de US\$ 410,88/ha, na região de Guaira-SP, segundo o INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (1994), no período de fevereiro a outubro de 1993.

### **3.2.3.2. Custo associado à irrigação: $C_w$**

O custo associado à irrigação ( $C_w$ ), para a cultura de feijão sob pivô-central, na região de Guaira-SP, apresentou uma variação de US\$ 0,32/mm.ha a US\$ 0,75/mm.ha, de acordo com o INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (1994), no período de fevereiro a outubro de 1993.

### **3.2.4. Preço do produto: $P_i$**

O preço do produto ( $P_i$ ), ou valor pago ao produtor, no período de julho de 1993 a julho de 1994, variou de US\$ 0,44/Kg a US\$ 1,62/kg (PREÇOS AGRÍCOLAS, 1994). Para análise, utilizou-se valores neste intervalo, representativos do mercado de produtos agrícolas no período.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1. RECEITA LÍQUIDA PARA MÁXIMA PRODUÇÃO**

Na Figura 6 os valores de receita líquida são representados para diferentes custos da água e preços do produto.

A receita líquida para máxima produção não considera as estratégias de maximização apresentadas, em que a disponibilidade de água e terra pode ou não ser restritiva à produção. A receita líquida eleva-se quando o valor do produto aumenta, para todos os custos dos serviços relacionados à irrigação.

Em muitas situações, a receita líquida máxima, para o agricultor, ocorre quando a água aplicada está próxima da quantidade para a produção máxima, principalmente se os custos da água são baixos em relação aos outros custos e não há restrições de disponibilidade de terra e água. Segundo HARGREAVES & SAMANI (1984), nesse caso, a irrigação com déficit é pouco desejável.

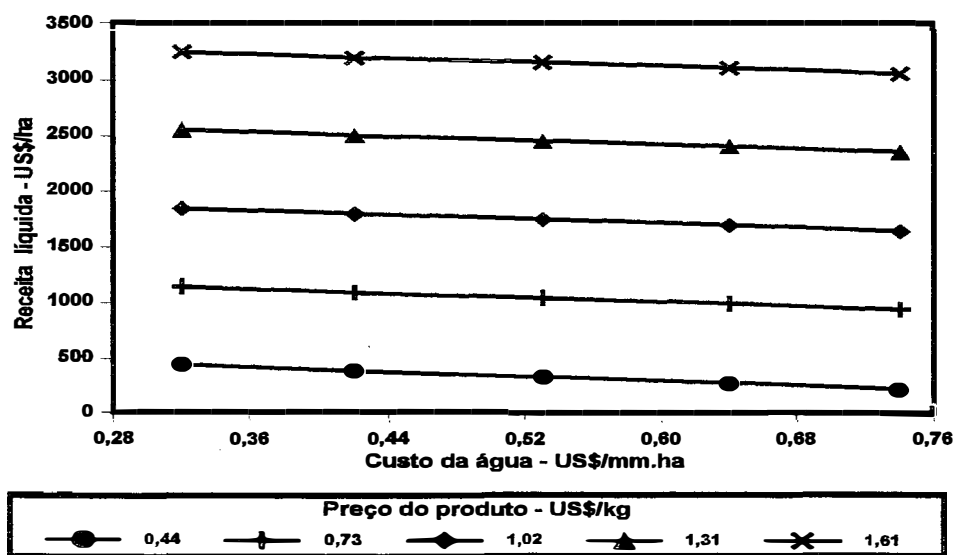


Figura 6. Receita líquida para máxima produção em função do custo da água e do preço do produto.

## 4.2. LÂMINA DE ÁGUA ÓTIMA ECONÔMICA

A otimização da atividade agrícola ocorre com a maximização da receita líquida total. Isso é possível com a alocação eficiente dos recursos disponíveis. Tratando-se de culturas irrigadas, existe uma quantidade ótima de água a ser aplicada capaz de proporcionar a melhor resposta econômica da cultura.

Na Figura 7, estão representadas as quantidades de água que devem ser fornecidas a cultura ( $W^*$ ), para que se obtenha a produção ótima

econômica, em função do preço do produto e do custo da água. A lâmina de água ótima econômica ( $W^*$ ) eleva-se quando o valor pago pelo produto aumenta. Maiores lâminas estão relacionados a baixos custos da água, para diferentes preços do produto. Portanto, a quantidade de água necessária para maximização da receita líquida diminui quando o seu custo é elevado.

Quando a cultura tem elevado valor econômico a lâmina ótima econômica de irrigação é pouco influenciada pelo custo da água. Ocorre um efeito acentuado do custo da água sobre a lâmina ótima quando o preço do produto é baixo (Figura 7).

A lâmina de água ótima econômica ( $W^*$ ) aproxima-se da quantidade de água necessária para máxima produção ( $W_{\text{máx}} = 527,7$  mm) a medida que o seu custo é reduzido e o valor pago pelo produto aumenta.

A lâmina ótima pode ser reduzida em até 18,64%, em relação a quantidade de água para máxima produção da cultura (527,7 mm), quando o preço do produto é de US\$ 0,44/Kg e o custo da água é US\$ 0,74/mm.ha, correspondendo a uma lâmina ótima econômica de 429,3 mm. Se o custo da água é elevado, a lâmina que proporciona o rendimento ótimo diminui. No caso contrário, em que a cultura é de grande valor econômico e a água tem baixo custo, a lâmina ótima é 2,20% inferior àquela para irrigação completa (máxima produção). Isso pode ser verificado com o custo da água de US\$ 0,32/mm.ha e um preço do produto de US\$ 1,61/kg, que correspondem a uma lâmina ótima de 516,1 mm (Figura 7; Apêndice 1, Quadro 2).

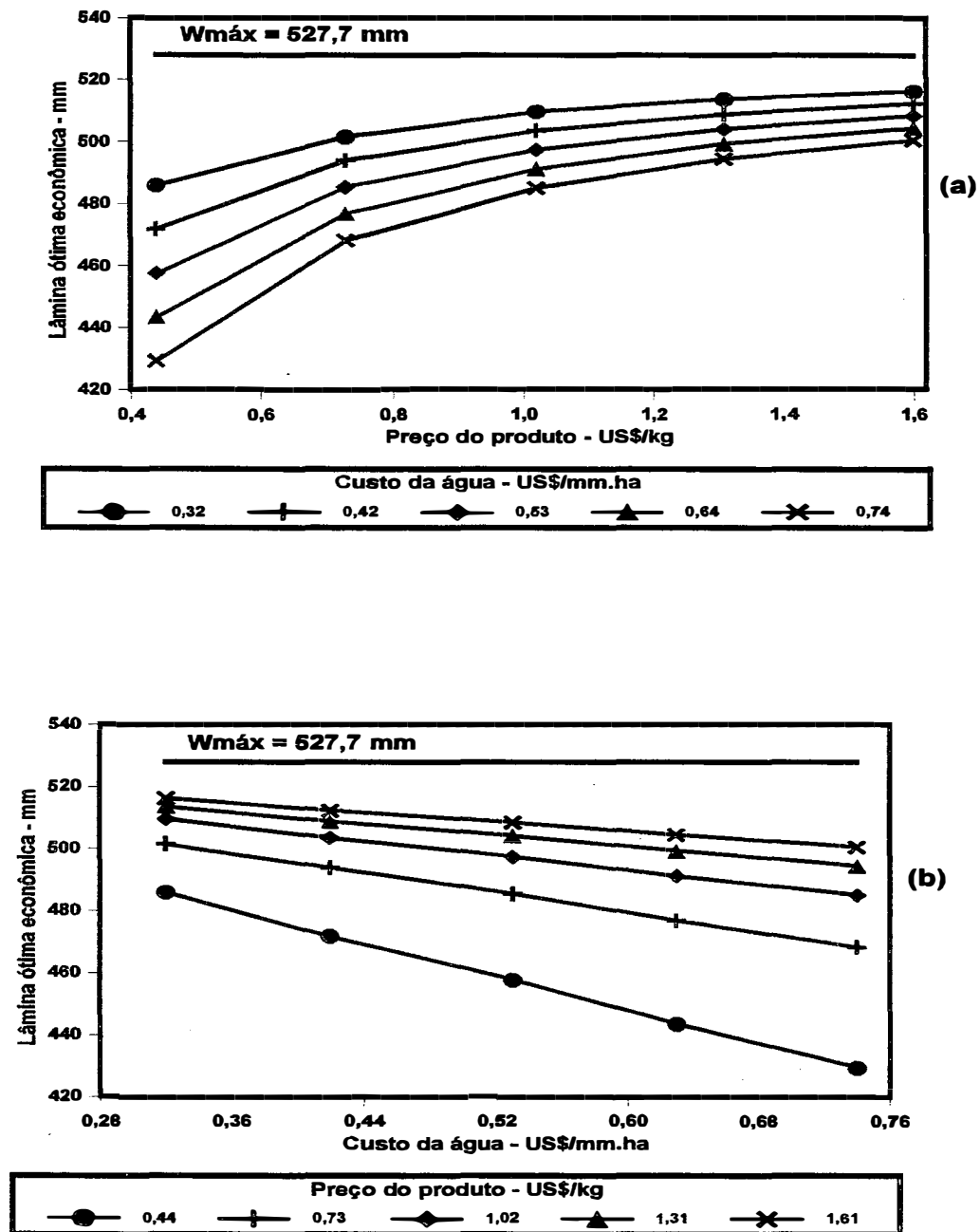


Figura 7. Lâmina de água ótima econômica em função (a) do preço do produto e (b) do custo da água.

### 4.3. PRODUÇÃO ÓTIMA ECONÔMICA

A produção ótima econômica apresenta comportamento semelhante em relação ao custo da água e ao preço do produto, quando analisa-se a lâmina ótima de água econômica. Observando a Figura 8, verifica-se que a produção ótima será maior quanto menor for o custo da água e maior o preço do produto.

A produção máxima esperada, para a cultura estudada, é de 2432 kg/ha, para uma lâmina de 527,7 mm. No entanto, a produção ótima econômica, inferior à máxima, resulta numa receita líquida superior à obtida com a máxima produção.

A produção ótima econômica aproxima-se da máxima obtida com a irrigação completa (produção máxima) quando o custo da água é baixo e o preço do produto é elevado (Figura 8). Por exemplo, se o valor do produto é de US\$ 1,61/kg e a água custa US\$ 0,32/mm.ha, a produção ótima alcança 2430,9 kg/ha, apenas 0,045% abaixo do valor máximo de 2432 kg/ha. Para tanto, a lâmina ótima é de 516,1 mm, ou seja, 2,20% menor que a lâmina para irrigação completa (527,7 mm).

O menor valor observado de produção ótima econômica é de 2349,6 kg/ha, 3,39% abaixo do máximo para irrigação completa (2432 kg/ha), sendo que a lâmina ótima é 18,64% menor àquela quando a irrigação é completa (Figura 8; Apêndice 1, Quadros 3 e 2).

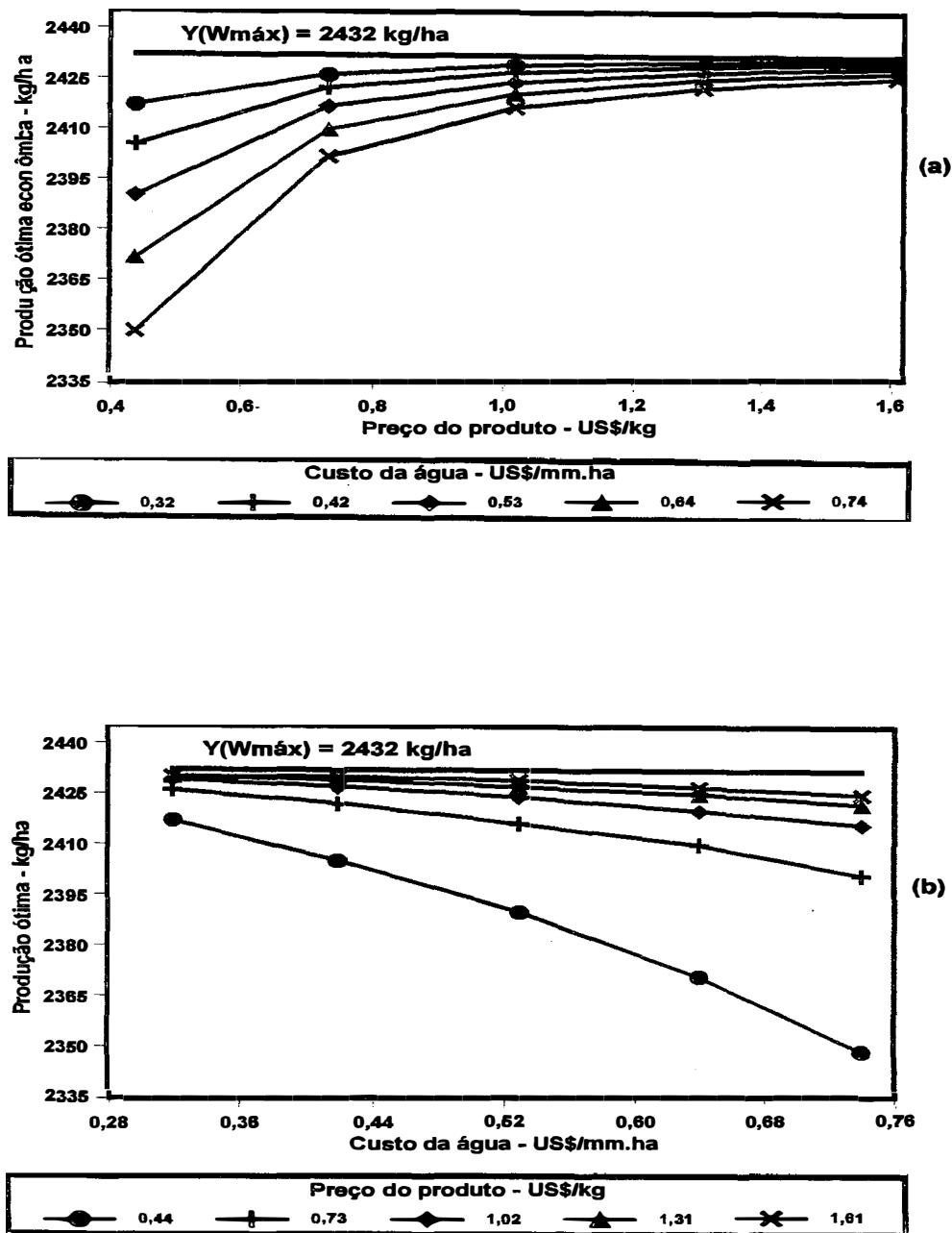


Figura 8. Produção ótima econômica em função (a) do preço do produto e (b) do custo da água.



Observa-se uma relação linear entre a produção ótima e o custo da água (Figura 8b). Quando a água tem custo elevado, a produção ótima esperada e o conseqüente retorno econômico, são influenciados pelo valor pago pelo produto. Isso não é observado quando a água é de baixo custo (Figura 8b). Para um elevado preço do produto, a produção ótima econômica é pouco influenciada pelo custo da água.

#### 4.4. RECEITA LÍQUIDA ÓTIMA

Na Figura 9 estão representados os valores estimados de receita líquida ótima. Observa-se que, reduzindo o custo da água e, portanto, o custo total de produção, o aumento da receita líquida se dá com o aumento do valor pago pelo produto.

A lâmina de água ótima econômica é sempre menor que a lâmina para máxima produção. Supondo que o produtor dispõe de um sistema de irrigação e os custos da água pouco variam, a receita líquida ótima é maximizada quando o valor do produto aumenta (Figura 9). Nesse caso, a quantidade de água aplicada pode ser próxima àquela para produção máxima.

Se o produto tem um valor de US\$ 1,61/kg e sendo baixo o custo da água (US\$ 0,32/mm.ha), a receita líquida será de US\$ 3257,2 /ha, ou seja, 0,15 % superior à receita obtida com a irrigação completa.

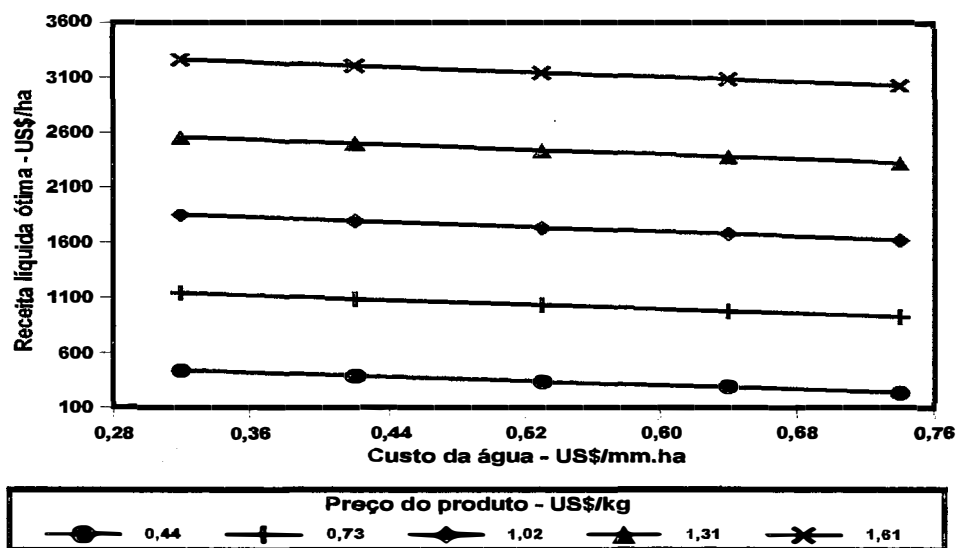


Figura 9. Receita líquida ótima em função do custo da água e do preço do produto.

Com o custo da água igual a US\$ 0,32/mm.ha e com o preço do produto baixo ( $P_i = \text{US\$ } 0,44/\text{kg}$ ), a receita líquida, para uma lâmina ótima de 485,8 mm, alcança US\$ 399,9/ha, 4,6% superior ao valor da receita quando a irrigação é para máxima produção (US\$ 382,3/ha). O percentual aumenta para 18,19% quando  $C_w = \text{US\$ } 0,74/\text{mm.ha}$  e  $P_i = \text{US\$ } 0,44/\text{kg}$ , correspondente a uma lâmina ótima de 429,3 mm (Apêndice 1, Quadros 4 e 1).

A medida que diminui o custo da água e aumenta o preço do produto, menor será a diferença entre a receita líquida ótima e a receita líquida para produção máxima da cultura (Figuras 6 e 9). A justificativa para isso é

que a lâmina ótima aproxima-se da quantidade de água necessária para produção máxima.

Se  $P_i = \text{US\$ } 0,44/\text{kg}$  e  $C_w = \text{US\$ } 0,64/\text{mm.ha}$ , a receita líquida ótima alcança  $\text{US\$ } 290,9/\text{ha}$ , 10,52% superior quando a irrigação é para produção máxima ( $\text{US\$ } 263,2/\text{kg}$ ). Para  $P_i = \text{US\$ } 1,61/\text{kg}$  e o mesmo custo da água, a receita líquida é de  $\text{US\$ } 3039,6/\text{ha}$ , 0,35% superior àquela com irrigação para produção máxima (Figura 9, Apêndice 1, Quadros 4 e 1).

ENGLISH & NUSS (1982) e ENGLISH (1990), verificaram em estudos de irrigação com déficit, um aumento significativo da receita líquida, pois, quanto menor a quantidade aplicada menor o custo total de produção.

#### 4.4.1. REDUÇÃO DA RECEITA LÍQUIDA DEVIDA AO DÉFICIT DE ÁGUA APLICADA

Pelo modelo apresentado, quando a quantidade de água aplicada em uma fração da área irrigada é inferior àquela que proporciona a receita líquida ótima, ocorrerá redução da receita líquida total devida ao déficit, estimada pela diferença entre a receita líquida ótima e a receita líquida obtida com a quantidade de água aplicada.

Na Figura 10 estão representados os valores da redução da receita líquida devida ao déficit ( $\beta$ ), em função do preço do produto ( $P_i$ ) e do

custo da água ( $C_w$ ), para diferentes uniformidades de distribuição de água do sistema (CUC).

Quando o preço do produto aumenta, verifica-se a necessidade de maior uniformidade de distribuição de água para que se possa diminuir o efeito do déficit na redução da receita líquida (Figura 10a e 10b).

Para alta uniformidade (CUC), a redução da receita líquida devida ao déficit ( $\beta$ ) é baixa e pouco influenciada pelo custo da água. Mantendo-se o preço do produto, o efeito do déficit sobre a redução da receita líquida ( $\beta$ ) aumenta a medida que diminui a uniformidade, para qualquer custo da água (Figura 10c e 10d).

Se o preço do produto é alto, em qualquer nível de uniformidade o custo da água exerce pouca influência na redução da receita líquida (Figura 10d).

Quando o preço do produto é baixo e o custo da água é alto, menor é a lâmina ótima total de irrigação (Figura 7a) e menor é a receita líquida (Figura 9). Nesta condição, para qualquer uniformidade, menor é o efeito do déficit na receita líquida. Entretanto, o valor de  $\beta$  aumenta com decréscimo da uniformidade (Figura 10c). Por outro lado, quando a receita líquida é alta (baixo custo da água), necessitando maiores lâminas de água (Figuras 7 e 10), o valor de  $\beta$  aumenta para qualquer uniformidade, sendo maior para menores valores de CUC. Estes aspectos demonstram a importância de elevados valores de uniformidade.

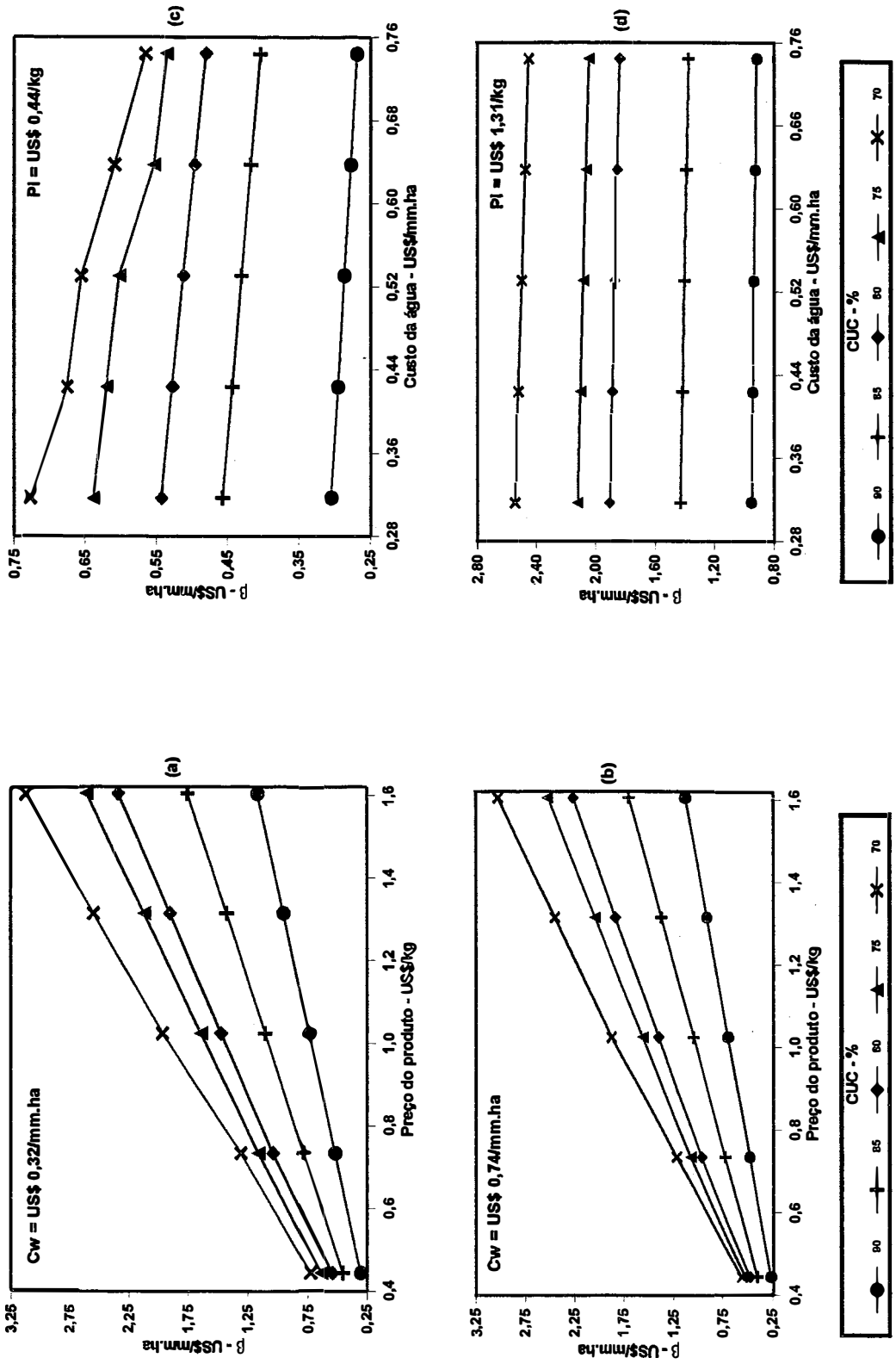


Figura 10. Redução da receita líquida devida ao déficit de água aplicada ( $\beta$ ), em função do preço do produto (Pi) e do custo da água (Cw), para diferentes uniformidades de distribuição de água (CUC).

Seja um sistema de irrigação com uniformidade de 90% e custo da água de US\$ 0,32/mm.ha (Figura 10a). A redução da receita líquida devida ao déficit ( $\beta$ ) aumenta a medida que preço do produto também aumenta. Para um valor de  $P_i = \text{US\$ } 0,44/\text{kg}$  a redução é de US\$ 0,30/mm.ha, atingindo US\$ 0,95/mm.ha se  $P_i = \text{US\$ } 1,31/\text{kg}$  (Figuras 10c e 10d).

Para os mesmos valores de custo da água e preço do produto ( $C_w = \text{US\$ } 0,32/\text{mm.ha}$  e  $P_i = \text{US\$ } 1,31/\text{kg}$ ), a redução da receita líquida devida ao déficit, alcança US\$ 2,55/mm.ha quando o sistema apresenta uma uniformidade de 70%, considerada inadequada para sistemas de irrigação por aspersão (Figura 10d). Isso demonstra a importância da uniformidade no valor de  $\beta$ , em que menor efeito do déficit na redução da receita líquida está associada à maior uniformidade de distribuição de água.

A maior redução da receita líquida devida ao déficit foi de US\$ 3,12/mm.ha para CUC = 70% e  $P_i = \text{US\$ } 1,61/\text{kg}$ , para um custo da água de US\$ 0,32/mm.ha.

Se o sistema não apresenta boa uniformidade, mesmo para baixos custos da água, não recomenda-se a exploração de culturas de elevado valor econômico, pois, maior será o efeito do déficit na redução da receita líquida total.

#### 4.4.2. REDUÇÃO DA RECEITA LÍQUIDA DEVIDA AO EXCESSO DE ÁGUA APLICADA

Pelo modelo apresentado, se a quantidade de água aplicada em uma fração da área irrigada é superior àquela que proporciona a receita líquida ótima econômica, tem-se redução da receita líquida devida ao excesso de água, estimada pela diferença entre a receita líquida obtida com a quantidade total de água aplicada e a receita líquida ótima.

Na Figura 11 estão representados os valores da redução da receita líquida devida ao excesso ( $\alpha$ ), em função do preço do produto ( $P_i$ ) e do custo da água ( $C_w$ ), para diferentes uniformidades de distribuição de água do sistema (CUC).

A medida que aumenta o custo da água, verifica-se a necessidade de maior uniformidade de distribuição, para que se possa diminuir o efeito do excesso de água na redução da receita líquida ( $\alpha$ ), principalmente, se a cultura tem elevado valor econômico (Figura 11a e 11b).

Quanto menor a uniformidade, maior o efeito do excesso de água na redução da receita líquida. Se o preço do produto é alto, maior a lâmina ótima total de irrigação (Figura 7). Nesta condição, o valor  $\alpha$  é maior se o sistema apresenta baixa uniformidade e o custo da água é elevado (Figura 11c e 11d).

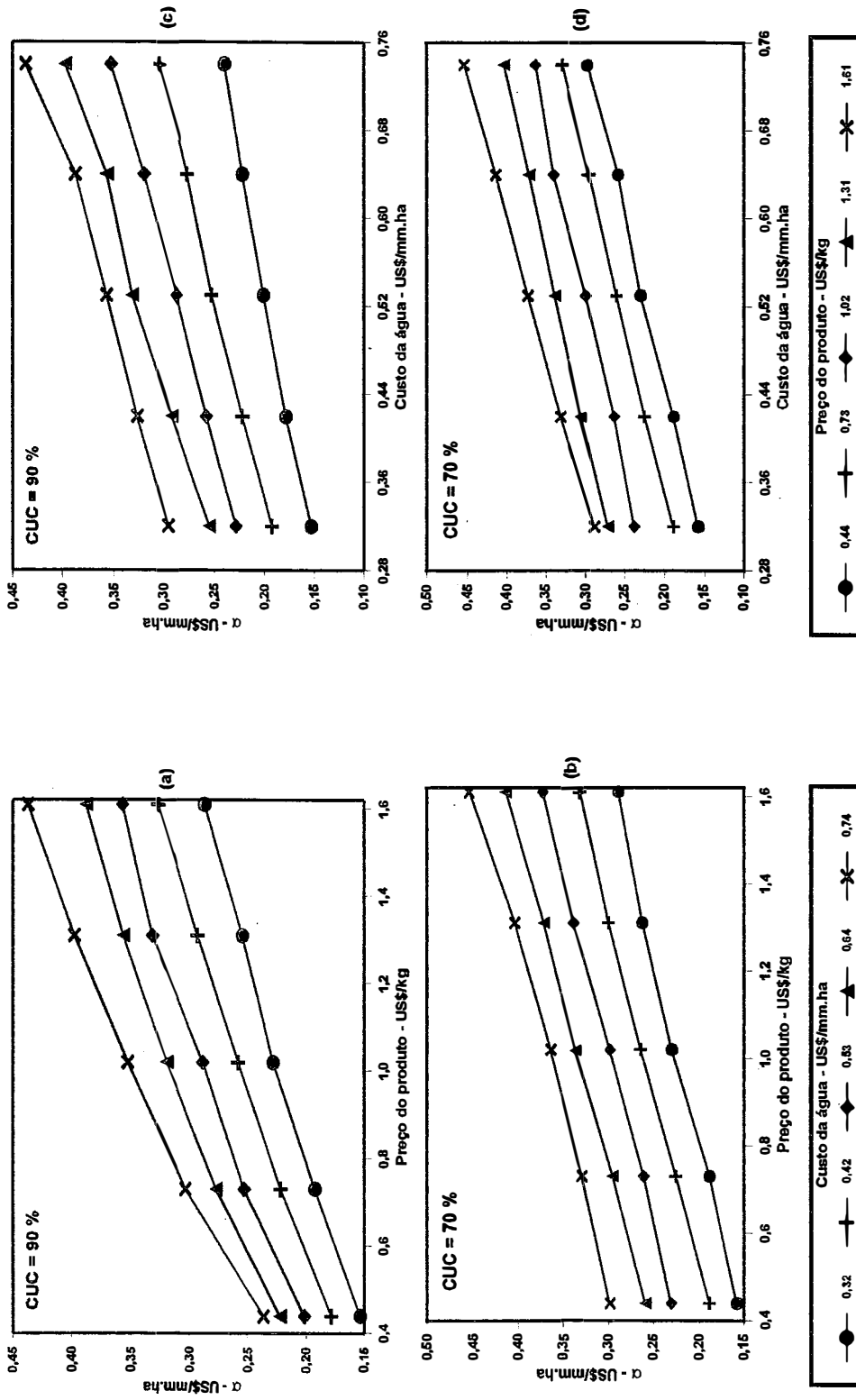


Figura 11. Redução da receita líquida devida ao excesso de água aplicada ( $\alpha$ ), em função do preço do produto ( $P_i$ ) e do custo da água ( $C_w$ ), para diferentes uniformidades de distribuição de água (CUC).



Mantendo-se o preço do produto o efeito do excesso de água na redução da receita líquida é maior a medida que aumenta o custo da água (Figura 11c) e diminui a uniformidade de distribuição (Figura 11d).

Seja um sistema com uniformidade de 90%. Com o preço do produto igual a US\$ 0,44/kg e a água custando US\$ 0,74/mm.ha, a redução da receita líquida devida ao excesso é US\$ 0,23/mm.ha. Num outro sistema com uniformidade de 70%, a redução é US\$ 0,30/mm.ha.

De acordo com a estratégia de maximização da receita líquida, em que a disponibilidade de água não é restritiva à produção, o preço do produto tem maior influência na redução da receita líquida total, em relação ao custo da água.

Um menor efeito do excesso de água na redução da receita líquida está associada ao menor preço do produto e à maior uniformidade de distribuição de água do sistema (Figura 11).

Sistemas que não apresentam uma boa uniformidade de distribuição, de uma forma geral, não devem ser utilizados quando o objetivo é máximo retorno econômico, mesmo para baixos custos da água e, principalmente, se a cultura é de elevado valor econômico. Uma análise criteriosa do custo da água e do preço pago pelo produto, deve ser feita para auxiliar na decisão da melhor alternativa para operação ótima do sistema de irrigação.

#### 4.4.3. EFEITO RELATIVO DO DÉFICIT SOBRE O EXCESSO DE ÁGUA NA RECEITA LÍQUIDA.

O planejamento e o manejo da irrigação podem ser estabelecidos de forma a resultar na mínima perda econômica decorrente da aplicação não uniforme de água. A análise do efeito relativo do déficit sobre o excesso determina a operação ótima do sistema de irrigação.

Nas Figuras 12 e 13 estão representados os valores de  $\beta/\alpha$  em função dos custos da água ( $C_w$ ) e dos preços do produto ( $P_i$ ), para diferentes uniformidades de distribuição do sistema (CUC).

O valor  $\beta/\alpha$  expressa a importância do déficit em relação ao excesso de água aplicada. Para  $\beta/\alpha > 1$ , a redução da receita líquida por unidade de volume de déficit é maior que a redução da receita líquida por unidade de volume de excesso. Isto ocorre quando a cultura é relativamente sensível ao déficit hídrico e o excesso de água não provoca problemas significativos. Quando  $\beta/\alpha < 1$ , significa que a redução da receita líquida devida ao excesso é maior que a redução devida ao déficit. Neste caso, o excesso pode resultar em problemas de drenagem.

No presente estudo, para a função de resposta da cultura à irrigação e para os valores de custo da água e preço do produto analisados, o efeito do déficit foi sempre superior ao efeito do excesso na redução da receita líquida total ( $\beta/\alpha > 1$ ).

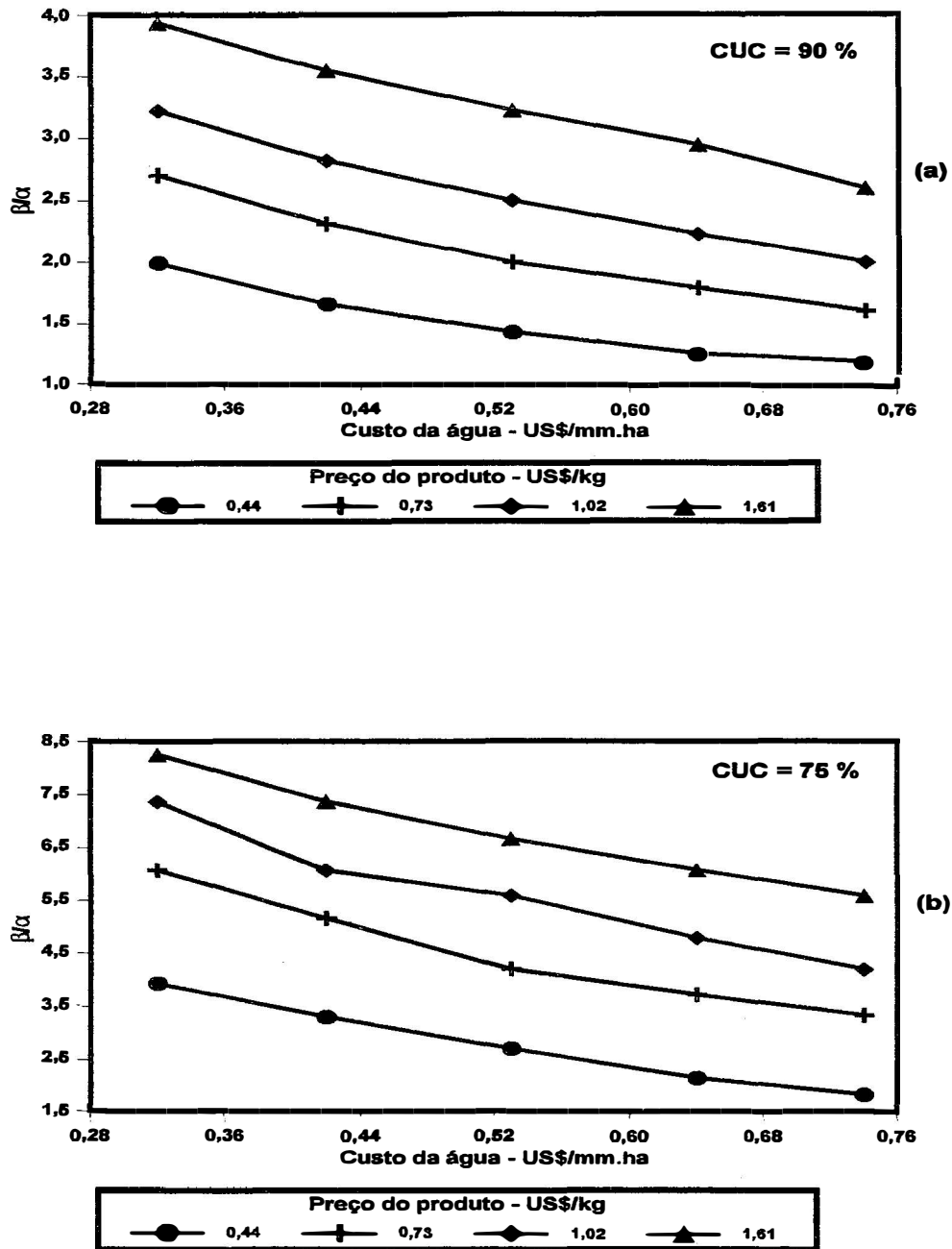


Figura 12. Efeito relativo do déficit sobre o excesso de água aplicada ( $\beta/\alpha$ ) em função do custo da água e do preço do produto, para (a) CUC = 90 % e (b) CUC = 75%.

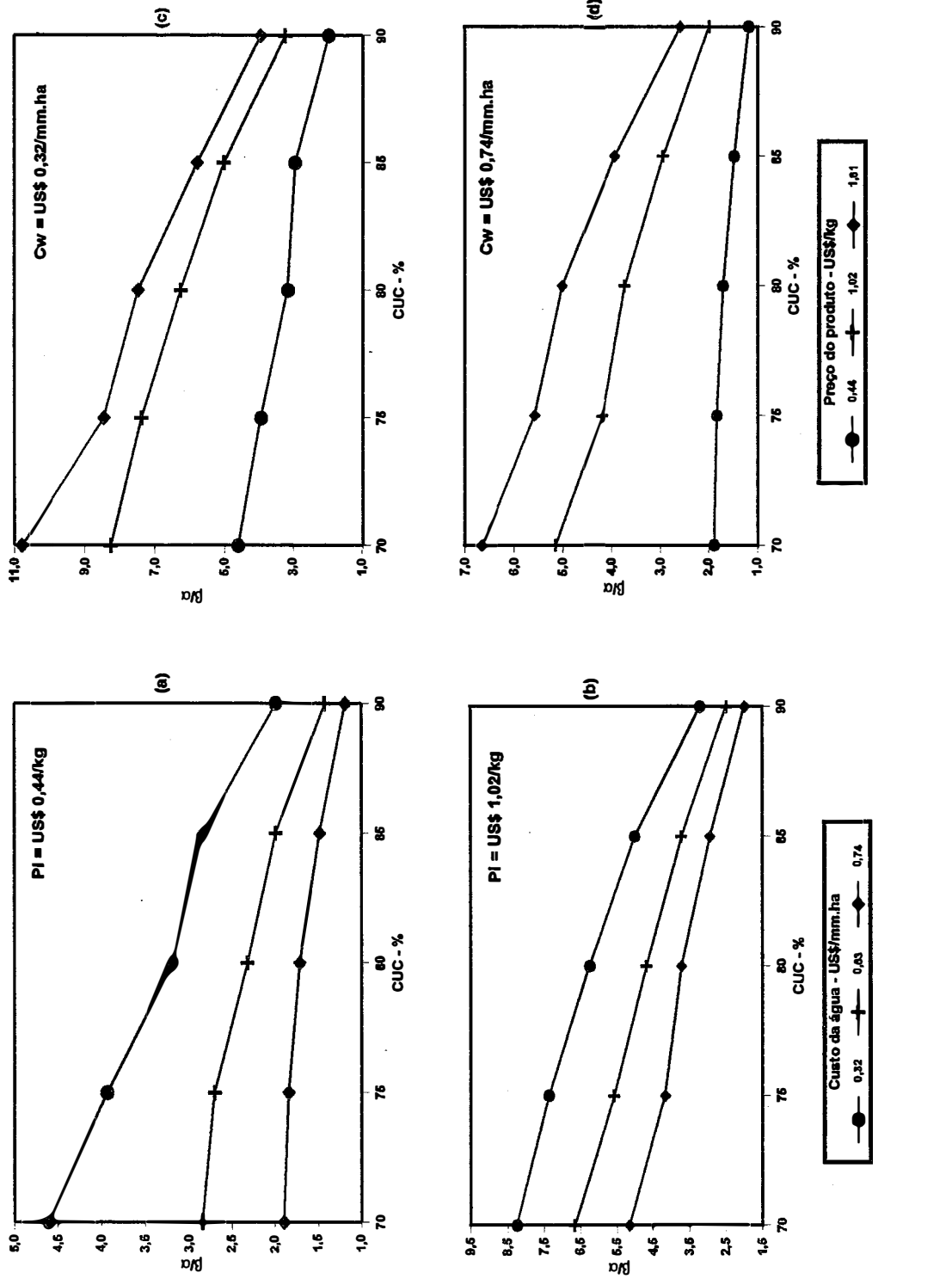


Figura 13. Efeito relativo do déficit sobre o excesso de água aplicada ( $\beta/\alpha$ ), em função da uniformidade de distribuição de água (CUC), para diferentes custos da água (Cw) e preços do produto (Pi).

O efeito relativo do déficit sobre o excesso ( $\beta/\alpha$ ) diminui com o aumento do custo da água (Figura 12a). Comportamento semelhante ao observado na análise do efeito do déficit na redução da receita líquida,  $\beta$  (Figura 10).

Para uma determinada uniformidade, observa-se que o valor de  $\beta/\alpha$  aumenta a medida que o custo da água diminui, mesmo que a cultura apresente elevado valor econômico (Figura 13b). Ilustrando o comportamento de  $\beta/\alpha$ , tem-se pela Figura 12a que quando  $C_w = 0,32$  US\$/mm.ha e  $P_i = 1,61$  US\$/Kg, para a uniformidade de 90%, o valor de  $\beta/\alpha$  é 3,94, ou seja, a redução da receita líquida por unidade de volume de déficit é 3,94 vezes à redução devida ao excesso de água. Como o valor do produto é alto, a lâmina ótima de irrigação aumenta e, conseqüentemente, mantida a uniformidade, o efeito do déficit na redução da receita líquida também aumenta. Se a uniformidade é menor (75%), o valor de  $\beta/\alpha$  passa para 8,25 considerando os mesmos dados de custo da água e preço do produto (Figura 12b).

Para qualquer combinação de custo da água e preço do produto, o efeito relativo do déficit sobre o excesso aumenta quando o sistema apresenta baixa uniformidade (Figura 13).

Se a cultura tem baixo valor econômico, o efeito relativo é pouco influenciado pela forma como a água é aplicada (Figuras 13c e 13d). A uniformidade de distribuição de água de um sistema deverá ser melhorada se a cultura tem elevado valor econômico, mesmo para baixo custo da água.

O valor máximo do efeito relativo do déficit sobre o excesso,  $\beta/\alpha$ , foi de 10,8 para uniformidade de 70%, preço do produto de US\$1,61/Kg e custo da água de US\$ 0,32/mm.ha (Figura 13c). Com os mesmos valores de  $P_i$  e  $C_w$ ,  $\beta/\alpha$  foi de 3,94 para uma uniformidade de 90%.

## 4.5. OPERAÇÃO ÓTIMA DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

### 4.5.1. LÂMINA MÉDIA ÓTIMA ECONÔMICA (CASO 1)

A determinação da quantidade de água a aplicar é de fundamental importância para o planejamento e a operação de sistemas de irrigação. De acordo com a estratégia de irrigação para obtenção da máxima receita líquida, baseada na resposta da cultura e nos custos de produção, de forma a tornar mínima a redução da receita líquida devida ao déficit ou excesso de água aplicada, tem-se pelo modelo proposto, a estimativa da lâmina média ótima ( $X_m^*$ ) que deve ser aplicada pelo sistema para atender um dado requerimento total fixo de água ( $X_r$ ), numa irrigação em particular.

O custo da água, o preço pago pelo produto e a uniformidade de distribuição influenciam a lâmina média ótima econômica a ser aplicada ( $X_m^*$ ), conhecido o requerimento de água ( $X_r$ ), uma vez que esses parâmetros definem o efeito relativo do déficit sobre o excesso de água aplicada, conforme apresentado no item 4.4.3.

Na Figura 14 estão representadas as lâminas médias ótimas econômicas em função da uniformidade e do requerimento de água. Verifica-se que a lâmina média ótima aumenta com o aumento do efeito relativo do déficit sobre o excesso, aproximando-se da lâmina requerida quanto menor for o valor de  $\beta/\alpha$  e maior a uniformidade de distribuição do sistema. Para um valor de  $\beta/\alpha$  igual a 3,22, a lâmina média ótima que um sistema deve aplicar para atender um requerimento de 16 mm é 17,5 mm, com uma uniformidade de 90% (Figura 14a). Se o efeito relativo,  $\beta/\alpha$ , é 1,18 e o sistema apresenta a mesma uniformidade, a lâmina média ótima deve ser de 16,1 mm, para igual requerimento (Figura 14b).

O aumento de  $\beta/\alpha$  está associado ao decréscimo da uniformidade, visto que esta proporciona maiores áreas de déficit e excesso, acarretando num aumento da lâmina ótima para atender um dado requerimento (Figuras 14c e 14d).

Verifica-se nas Figuras 14b e 14d que, para CUC = 90% o valor de  $\beta/\alpha$  para o qual  $X_m^* = X_r$  é, aproximadamente 1,18 e, para  $\beta/\alpha > 1,18$  tem-se  $X_m^* > X_r$ . Para CUC = 75%, tem-se que  $X_m^* = X_r$  para  $\beta/\alpha$  um pouco inferior a 1,7. PERI et al. (1979) propõem que, para CUC  $\geq$  50%,  $\beta/\alpha$  deve ser maior que aproximadamente  $(2/CUC) - 1$ , para que a lâmina média ótima ( $X_m^*$ ) seja maior que a lâmina requerida ( $X_r$ ); neste caso, para CUC = 0,90 resulta  $\beta/\alpha = 1,22$  e, para CUC = 0,75,  $\beta/\alpha = 1,67$ , onde se verifica  $X_m^* = X_r$ . Tais valores estão próximos daqueles observados nas Figuras 14b e 14d.

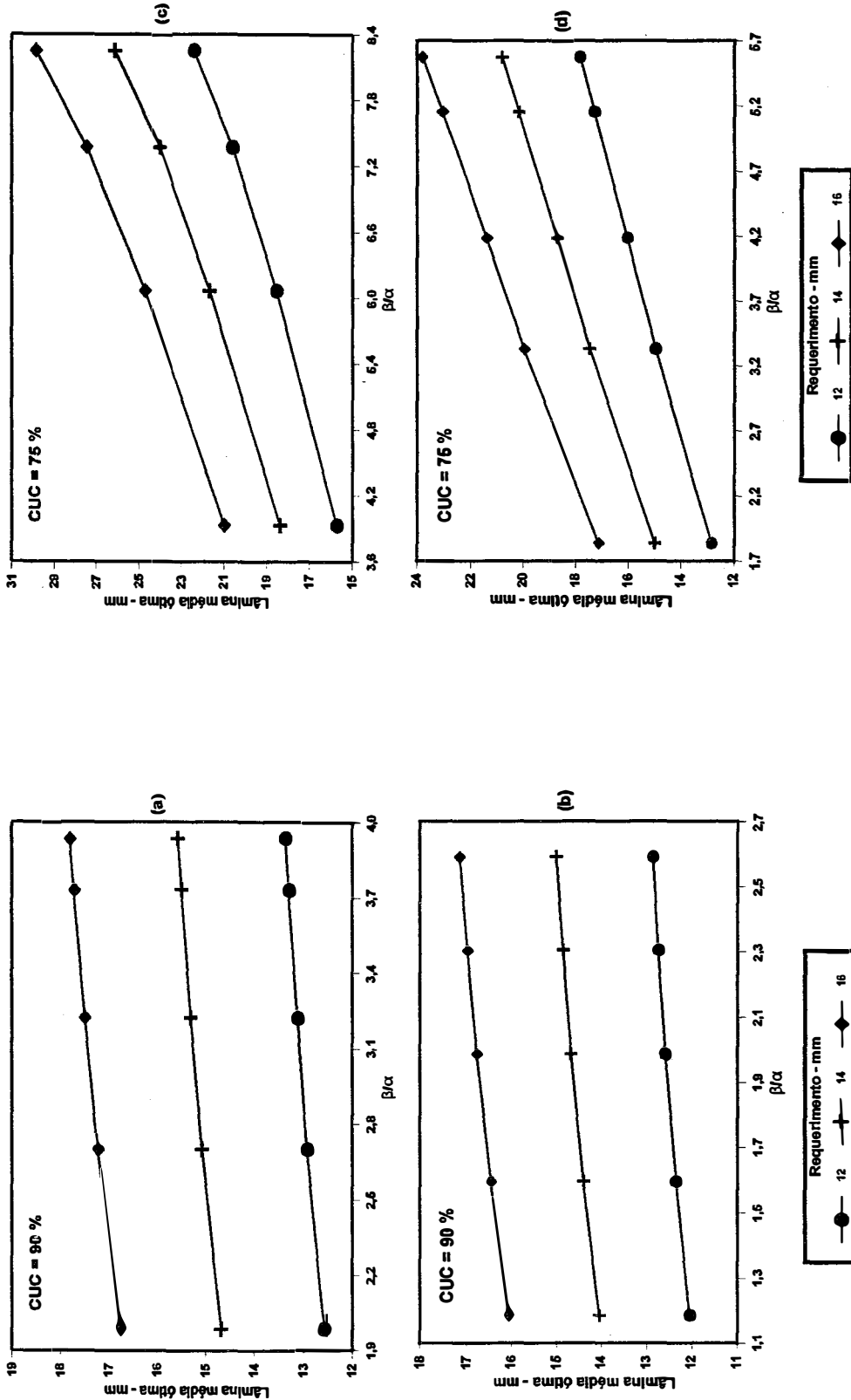


Figura 14. Lâmina média ótima em função de  $\beta/\alpha$ , para diferentes requerimentos e uniformidades de distribuição de água (CUC).



Os sistemas que aplicam água uniformemente mostram-se mais apropriados para atender o requerimento, resultando na aplicação de uma menor lâmina média ótima econômica. Seja  $\beta/\alpha$  igual a 3,93 e um sistema com CUC igual a 90%. Para atender um requerimento de 12 mm, o sistema com uniformidade de 90% deve aplicar uma lâmina média ótima de 13,3 mm (Figura 14a), ou seja, 10,8% superior ao requerimento. PERI et al. (1979), para  $\beta/\alpha = 4$ , encontrou uma lâmina média ótima 10% superior ao requerimento.

Para um sistema com uniformidade igual a 75% e, para  $\beta/\alpha = 3,93$ , uma lâmina média de 15,7 mm deverá ser aplicada para um mesmo requerimento de 12 mm (Figura 14d). Portanto, quanto menor a uniformidade, maior deve ser a lâmina aplicada para atender determinado requerimento.

Supondo que o sistema aplica água com uma determinada uniformidade e conhecendo-se o efeito relativo do déficit sobre o excesso ( $\beta/\alpha$ ), a relação entre a lâmina média ótima e o requerimento ( $X_m^*/X_r$ ) mantém-se constante, independentemente do valor do requerimento. Por exemplo, para atender um requerimento de 16 mm ou 12 mm, cujo efeito relativo do déficit sobre o excesso,  $\beta/\alpha$ , é 2,70, um sistema com CUC = 90% deve aplicar as lâminas médias ótimas de 17,2 mm e 12,9 mm, respectivamente, que correspondem a 1,076 vezes o requerimento estabelecido (Figura 15a).

Com  $\beta/\alpha$  e CUC pode-se estimar quanto, em relação ao requerimento estabelecido, deverá ser aplicado pelo sistema (lâmina média

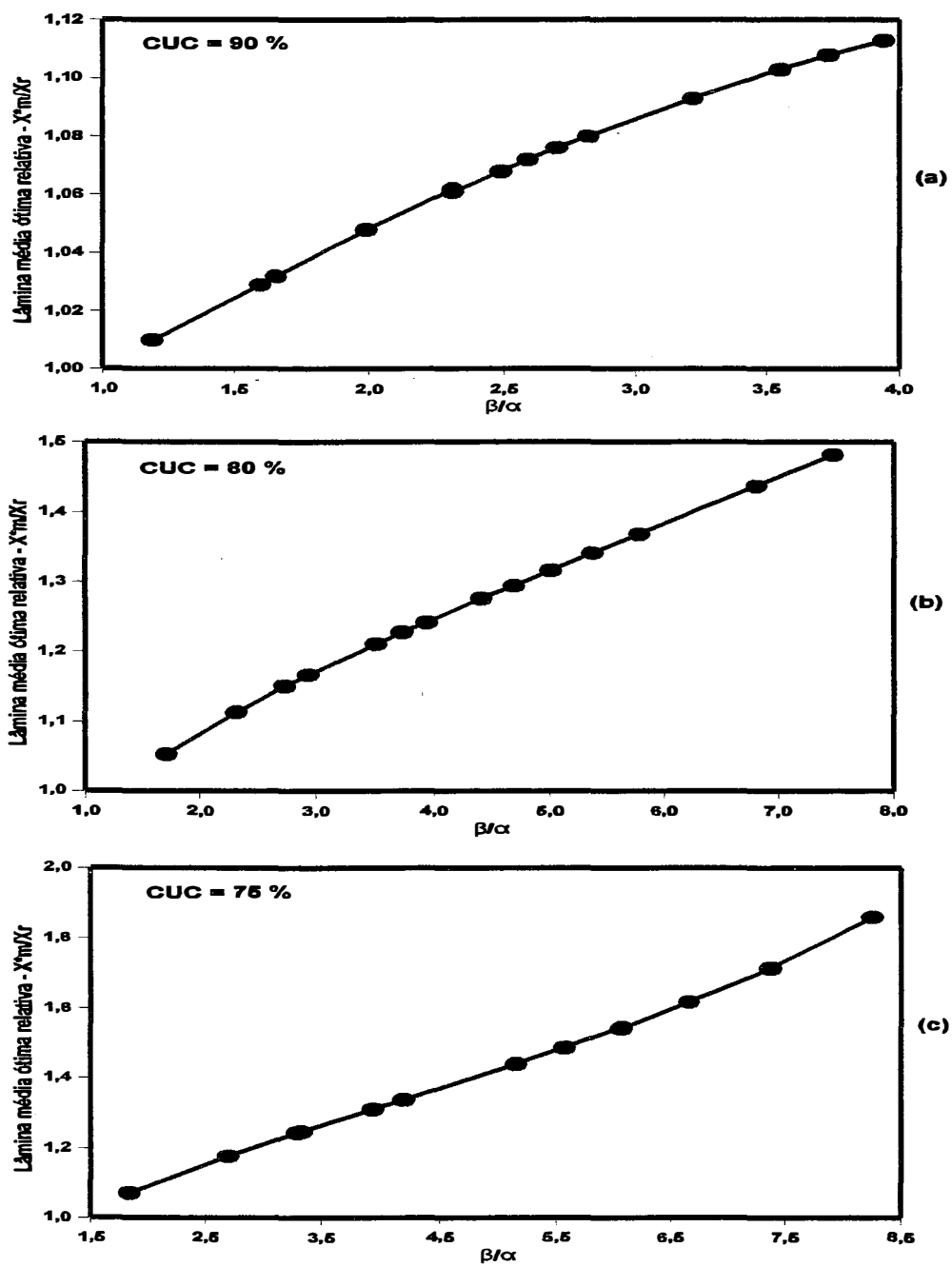


Figura 15. Lâmina média ótima relativa ( $X_m^*/X_r$ ) em função de  $\beta/\alpha$ , para (a) CUC = 90%, (b) CUC = 80% e (c) CUC = 75%.

ótima), conforme ilustrado pela Figura 15 (a, b e c). Seja um sistema que apresenta uma uniformidade de 90% e, a partir do custo da água e do preço do produto o efeito relativo do déficit sobre o excesso é conhecido, por exemplo,  $\beta/\alpha$  é igual a 3,55. Tem-se pela Figura 15a que a lâmina média ótima relativa é 1,10, ou seja, a lâmina média a ser aplicada pelo sistema deve ser 1,10 vezes o requerimento.

A lâmina ótima média relativa ( $X_m^*/X_r$ ) aumenta a medida que o efeito relativo do déficit sobre o excesso aumenta e a uniformidade de distribuição de água do sistema diminui. Segundo PERI et al. (1975), a lâmina média aumenta muito para valor de  $\beta/\alpha > 7$  e baixa uniformidade. Este comportamento é observado com os valores de  $\beta/\alpha$  na Figura 15c, plotados para uma uniformidade de distribuição de 75%.

A operação ótima de sistemas de irrigação pode ser determinada, pelo modelo proposto, conhecendo-se a uniformidade (CUC) e o valor de  $\beta/\alpha$ . Para qualquer requerimento de água, estima-se a lâmina média que o sistema deve aplicar para proporcionar um nível ótimo de rendimento da cultura, tornando mínima a redução da receita líquida devido ao déficit e ao excesso. Determinada a lâmina média ótima, o tempo de funcionamento do sistema é definido em função da intensidade média de aplicação de água, no caso de sistemas de aspersão convencionais.

#### 4.5.2. REQUERIMENTO ÓTIMO ECONÔMICO (CASO 2)

A determinação de quando irrigar, tem também fundamental importância para o manejo da irrigação e a operação ótima dos sistemas. De acordo com a estratégia de irrigação para obtenção da máxima receita líquida, baseada na resposta da culturas à irrigação e nos custos de produção, de forma a minimizarem as perdas econômicas pelo déficit ou excesso de água aplicada, tem-se pelo modelo proposto, a estimativa do requerimento ótimo ( $X_r^*$ ) para o qual o sistema deve aplicar uma lâmina média de água ( $X_m$ ).

Como no caso 1, o custo associado à irrigação, o preço pago pelo produto e a uniformidade de distribuição influenciam o requerimento ótimo, para o qual o sistema deve aplicar uma lâmina média conhecida.

Na Figura 16 estão representados os requerimentos ótimos em função da uniformidade de distribuição e da lâmina média de água aplicada pelo sistema.

Para  $\beta/\alpha > 1$ ,  $X_r^*$  é menor que  $X_m$  para qualquer uniformidade de distribuição de água (Figura 16). Com o aumento de  $\beta/\alpha$ ,  $X_r^*$  diminui, reduzindo o déficit hídrico. Como  $X_r^*$  diminui com a redução da uniformidade, para uma determinada lâmina média, quanto menor o valor de CUC, mais freqüentes deverão ser as irrigações.

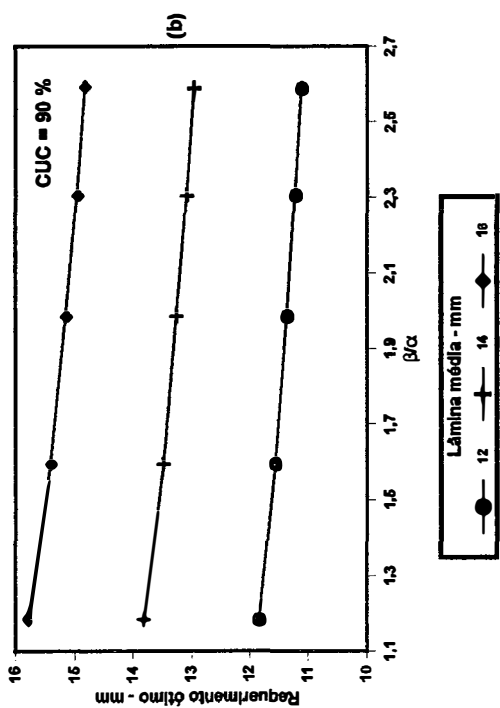
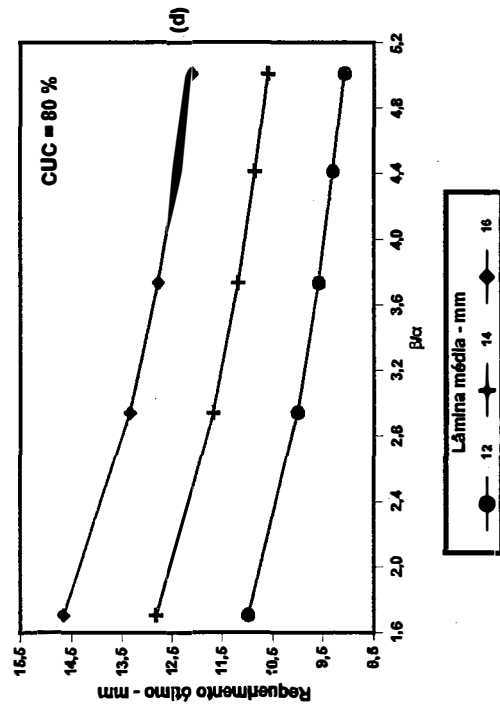
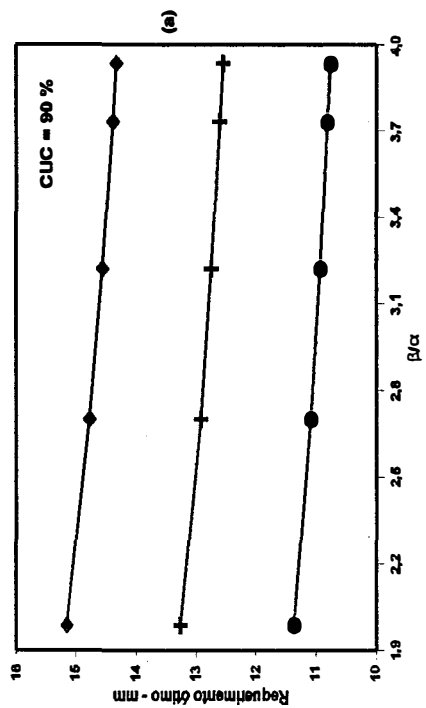
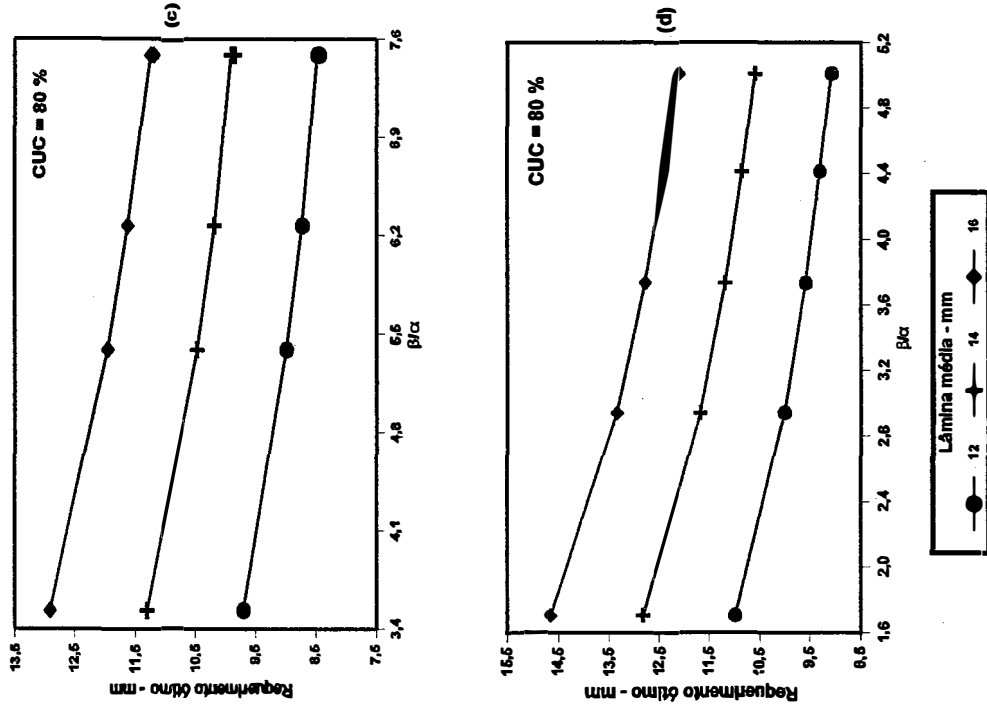


Figura 16. Requerimento ótimo em função de  $\beta/\alpha$ , para diferentes lâminas médias e uniformidades de distribuição de água (CUC).

O requerimento ótimo diminui com o aumento do valor de  $\beta/\alpha$ , aproximando-se da lâmina média aplicada pelo sistema quanto maior for a uniformidade. Seja um sistema com CUC = 90% e que aplica uma lâmina média de 12 mm. Se o efeito relativo  $\beta/\alpha$  é igual a 1,18, esta lâmina aplicada deverá atender um requerimento de 11,8 mm (Figura 16b), sob condições ótimas de operação. Aplicando a mesma lâmina média, deverá atender um requerimento de 10,8 mm quando  $\beta/\alpha$  for igual a 3,73 (Figura 16a).

Com alta uniformidade, a lâmina média aplicada pelo sistema atenderá um maior requerimento de água, para um nível ótimo de exploração econômica da cultura. Por exemplo, sendo  $\beta/\alpha = 2,30$  e a lâmina média aplicada igual a 12 mm, um requerimento de 10,5 mm poderá ser atendido se CUC = 80% (Figura 16b). Caso CUC = 90% (Figura 16d), essa lâmina média atenderá um requerimento de 11,2 mm.

Considerando que o sistema aplica água com determinada uniformidade e conhecendo-se o efeito relativo do déficit sobre o excesso ( $\beta/\alpha$ ), a relação entre o requerimento ótimo e a lâmina média aplicada pelo sistema ( $X_r^*/X_m$ ) mantém-se constante, independentemente do valor da lâmina média (Figura 16). Por exemplo, se um sistema tem capacidade de aplicar uma lâmina de 12 mm ou 16 mm com uma uniformidade de 80% e, supondo  $\beta/\alpha$  igual a 6,25, este atenderá aos requerimentos de 8,7 mm e 11,6, respectivamente, que correspondem a 0,727 vezes a lâmina média aplicada.

Conhecendo-se  $\beta/\alpha$  e CUC, é possível estimar quanto, em relação a lâmina média aplicada pelo sistema, deverá ser o requerimento ótimo para que se realize a irrigação (Figuras 17a e 17b). Numa análise econômica a partir do custo da água e do preço do produto, tem-se  $\beta/\alpha = 5,0$  e, dispondo de um sistema com CUC = 80% (Figura 17b), o requerimento ótimo relativo ( $X_r^*/X_m$ ) deve ser de 0,757, ou seja, o sistema atende a um requerimento de 0,757 vezes a lâmina média aplicada.

Nesse caso de estudo, em que a lâmina média aplicada pelo sistema é fixa, a operação ótima pode ser determinada, pelo modelo proposto, da seguinte forma: conhecendo-se a uniformidade (CUC) e o valor de  $\beta/\alpha$ , estima-se o requerimento ótimo que deve ser atendido pela lâmina que o sistema aplica. Com o requerimento ótimo e a evapotranspiração da cultura, no período, determina-se a frequência de irrigação, se necessário.

#### 4.5.3. QUALIDADE DA IRRIGAÇÃO

A qualidade da irrigação é analisada, no modelo, para os dois casos de estudo apresentados como estratégias para operação ótima de sistemas de irrigação.

No primeiro caso, tem-se a estimativa da lâmina média que um sistema deve aplicar para atender um certo requerimento. A partir da otimização econômica proposta e conhecendo-se a uniformidade de distribuição,

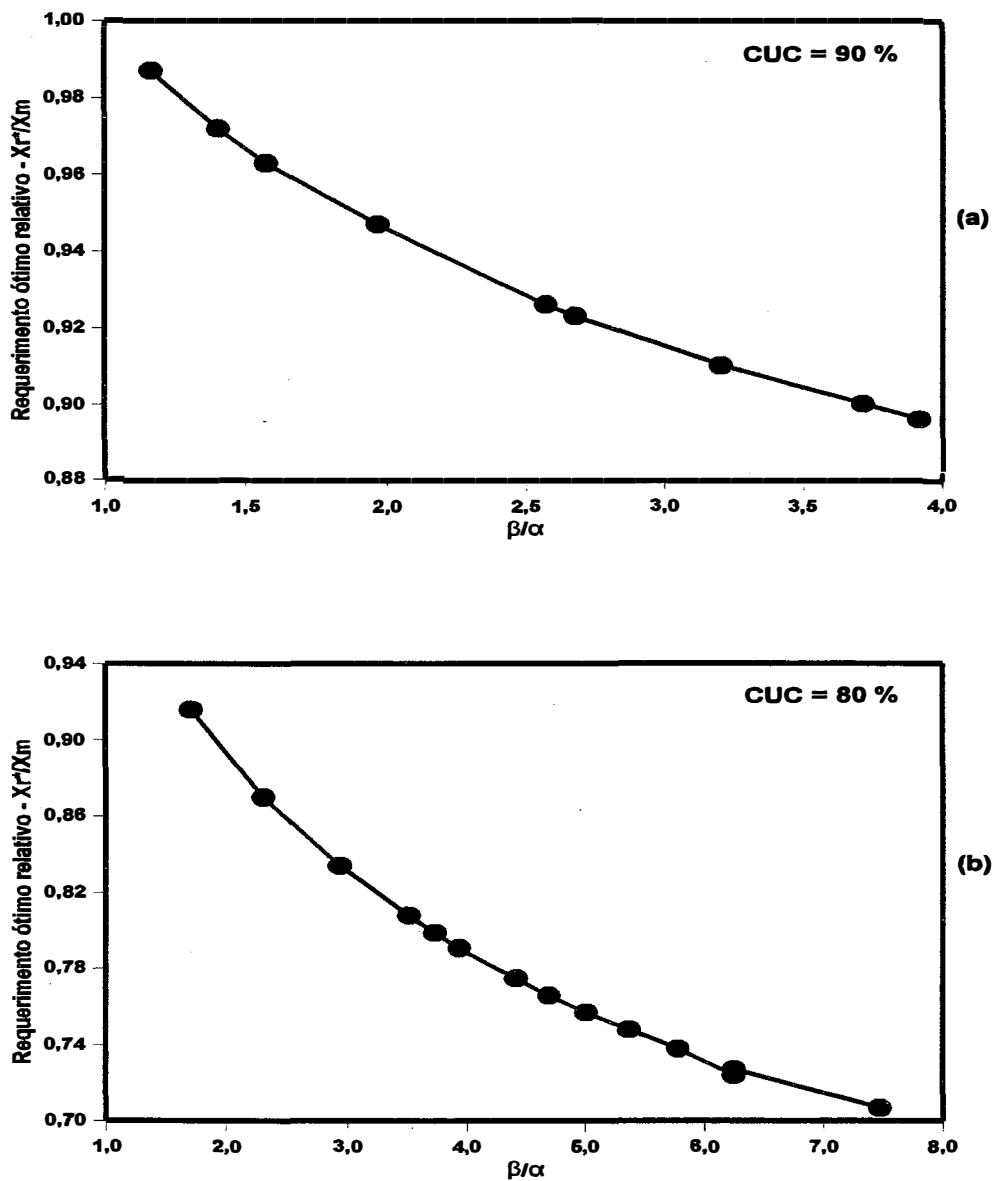


Figura 17. Requerimento ótimo relativo ( $X_r^*/X_m$ ) em função de  $\beta/\alpha$ , (a) para  $CUC = 90\%$  e (b) para  $CUC = 80\%$ .



é estabelecida uma operação ótima do sistema de irrigação, de forma a tornar mínima a redução da receita líquida total devida ao déficit e ao excesso de água aplicada. Para esse caso, a lâmina média a ser aplicada é função do efeito relativo do déficit sobre o excesso ( $\beta/\alpha$ ) e do requerimento ótimo de água ( $X_r^*$ ).

Na seção 4.5.1, é definida a lâmina ótima relativa, ou seja, quanto em relação a um dado requerimento, deve ser a lâmina média a ser aplicada pelo sistema para atender a esse requerimento, considerando um nível ótimo econômico de exploração da cultura.

Conhecendo-se a lâmina média ótima relativa ( $X_m^*/X_r$ ) e a uniformidade de distribuição do sistema (CUC), a qualidade da irrigação pode ser avaliada pelos parâmetros de eficiência e área adequadamente irrigada, para o primeiro caso (Figuras 18 e 19).

Supondo que um sistema apresenta uma uniformidade de 90% e, para um dado cenário de exploração econômica da cultura em que o efeito relativo do déficit sobre o excesso é conhecido, a lâmina média ótima relativa é igual a 1,06. Para essa condição, a operação ótima do sistema proporciona uma eficiência de aplicação de 91,6% (Figura 18a), uma eficiência de armazenamento de 97,2% (Figura 18c), uma perda por percolação de 8,4% (Figura 18b) e uma área adequadamente irrigada de 68,5 % (Figura 18d).

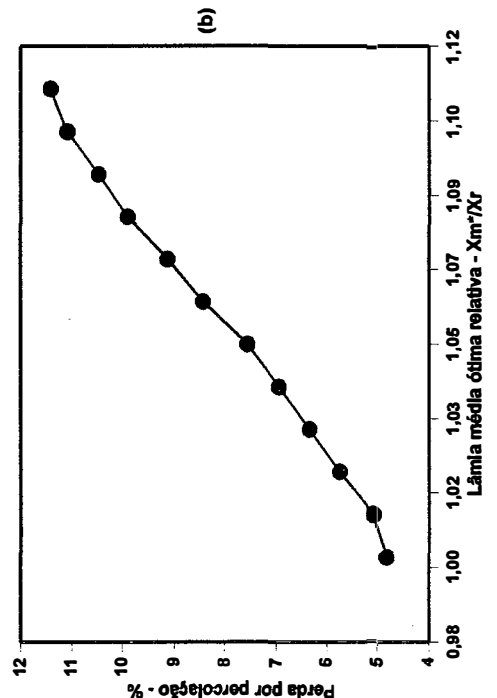
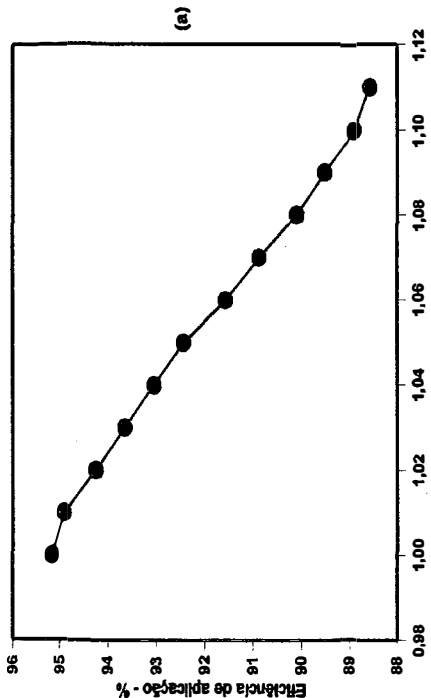
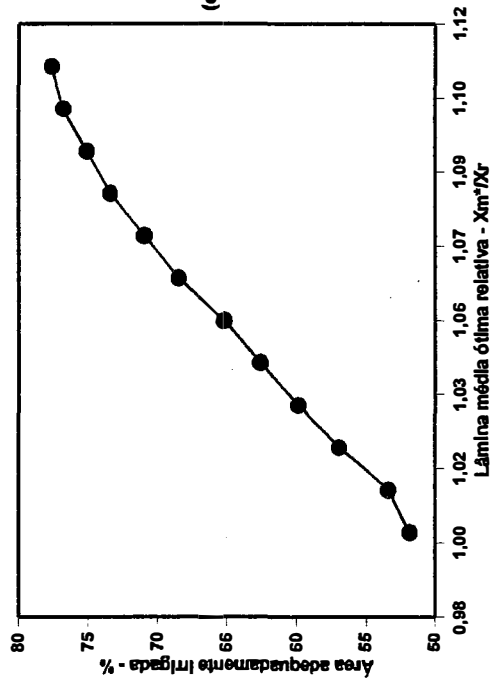
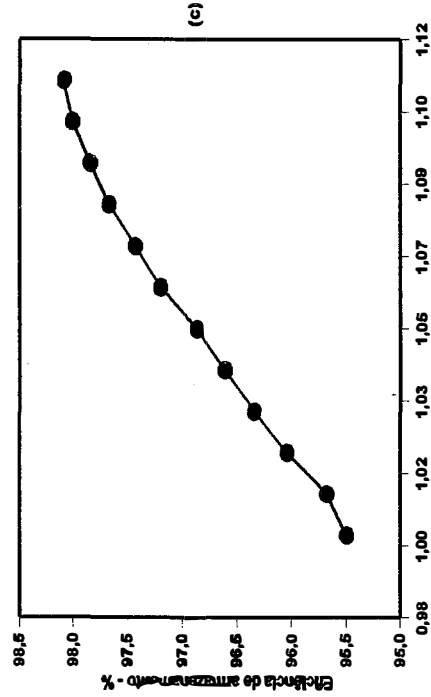


Figura 18. Qualidade da irrigação, para a condição ótima de operação do sistema, quando o requerimento é fixo e a uniformidade de distribuição de água é 90%.

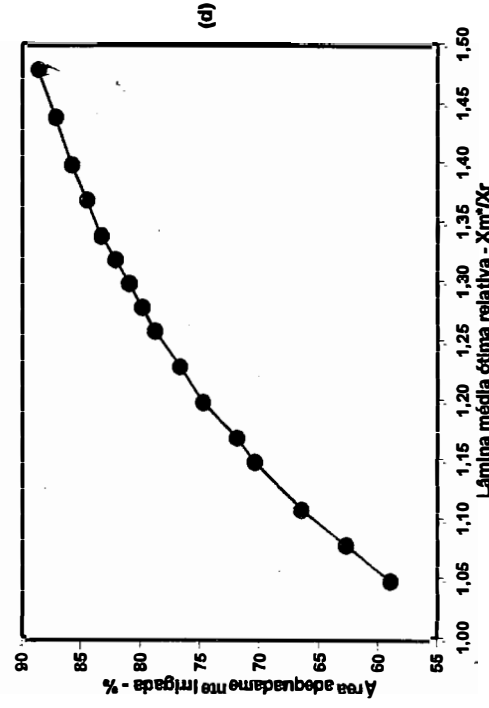
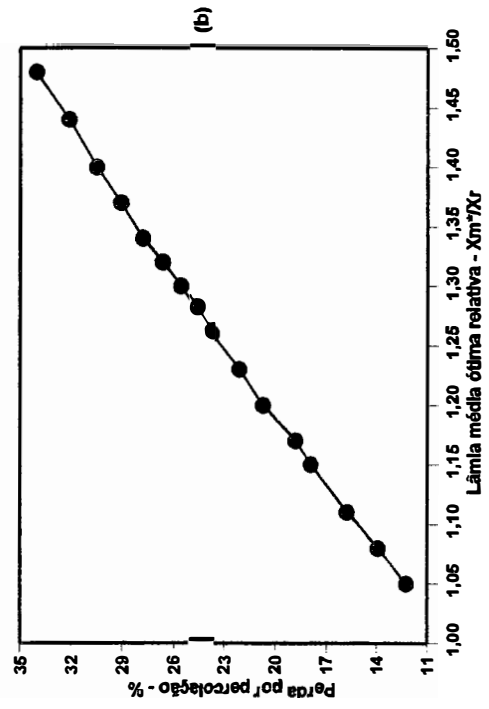
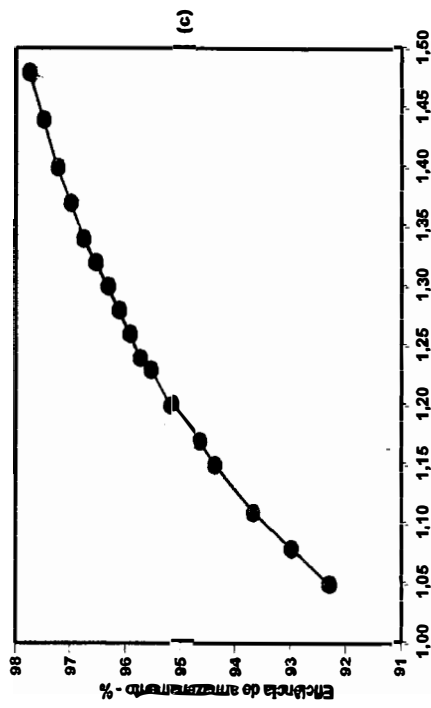
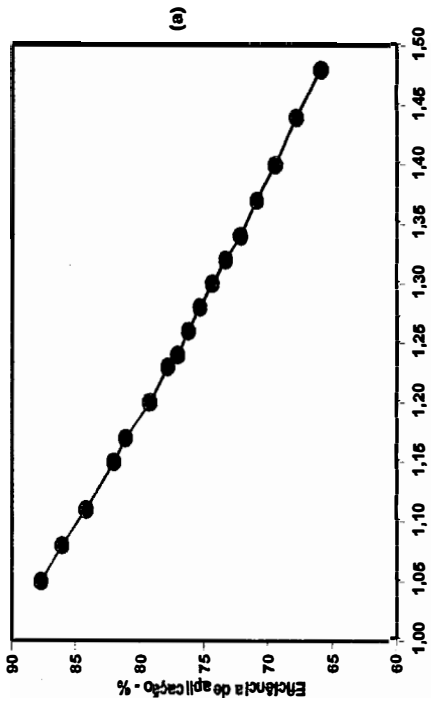


Figura 19. Qualidade da irrigação, para a condição ótima de operação do sistema, quando o requerimento é fixo e a uniformidade de distribuição de água é 80%.

A qualidade da irrigação avaliada pelos parâmetros acima, reduz-se a medida que a uniformidade de distribuição de água do sistema diminui. Isso é verificado quando se considera o mesmo cenário ótimo econômico de exploração da cultura, para uma condição de operação do sistema em que a uniformidade é 80% (Figura 19).

Quanto menor a lâmina média ótima relativa ( $X_m/X_r^*$ ), indicando que o sistema atende a um requerimento próximo da lâmina média aplicada, maior será a eficiência de aplicação. No entanto, a qualidade da irrigação fica comprometida pela diminuição da eficiência de armazenamento e conseqüente redução da área adequadamente irrigada. Esse fato torna-se mais acentuado se o sistema apresenta baixa uniformidade de distribuição de água (Figura 19).

No segundo caso, tem-se a estimativa do requerimento, o qual o sistema deve atender, aplicando uma lâmina média fixa de água. Pela proposta de otimização, o requerimento ótimo é função do efeito relativo do déficit sobre o excesso ( $\beta/\alpha$ ) e da lâmina média ótima ( $X_m^*$ ).

Na seção 4.5.2, é definido o requerimento ótimo relativo ( $X_r^*/X_m$ ), ou seja, quanto em relação a uma lâmina média aplicada pelo sistema, deve ser o requerimento atendido com a aplicação da lâmina média, considerando um nível ótimo econômico de exploração da cultura.

Com o requerimento ótimo relativo ( $X_r^*/X_m$ ) e a uniformidade de distribuição do sistema (CUC), a qualidade da irrigação pode ser avaliada pelos parâmetros de eficiência e área adequadamente irrigada, para o segundo caso de estudo (Figuras 20 e 21).

Supondo que um sistema apresenta uma uniformidade de 90% e, para um dado cenário de exploração econômica da cultura em que o efeito relativo do déficit sobre o excesso é conhecido, o requerimento ótimo relativo é igual a 0,92. Para essa condição, a operação ótima do sistema proporciona uma eficiência de aplicação de 89,9% (Figura 20a), uma eficiência de armazenamento de 97,7% (Figura 20c), uma perda por percolação de 10,1% (Figura 20b) e uma área adequadamente irrigada de 73,9% (Figura 20d).

A qualidade da irrigação reduz-se a medida que a uniformidade de distribuição de água do sistema diminui. Isso é verificado quando se considera o mesmo cenário ótimo econômico de exploração da cultura, para uma condição de operação do sistema em que a uniformidade é de 80% (Figura 21). Quanto maior o requerimento ótimo relativo, indicando que a lâmina média aplicada pelo sistema é próxima do requerimento, maior será a eficiência de aplicação. Porém, a qualidade da irrigação fica comprometida pela diminuição da eficiência de armazenamento e conseqüente redução da área adequadamente irrigada.

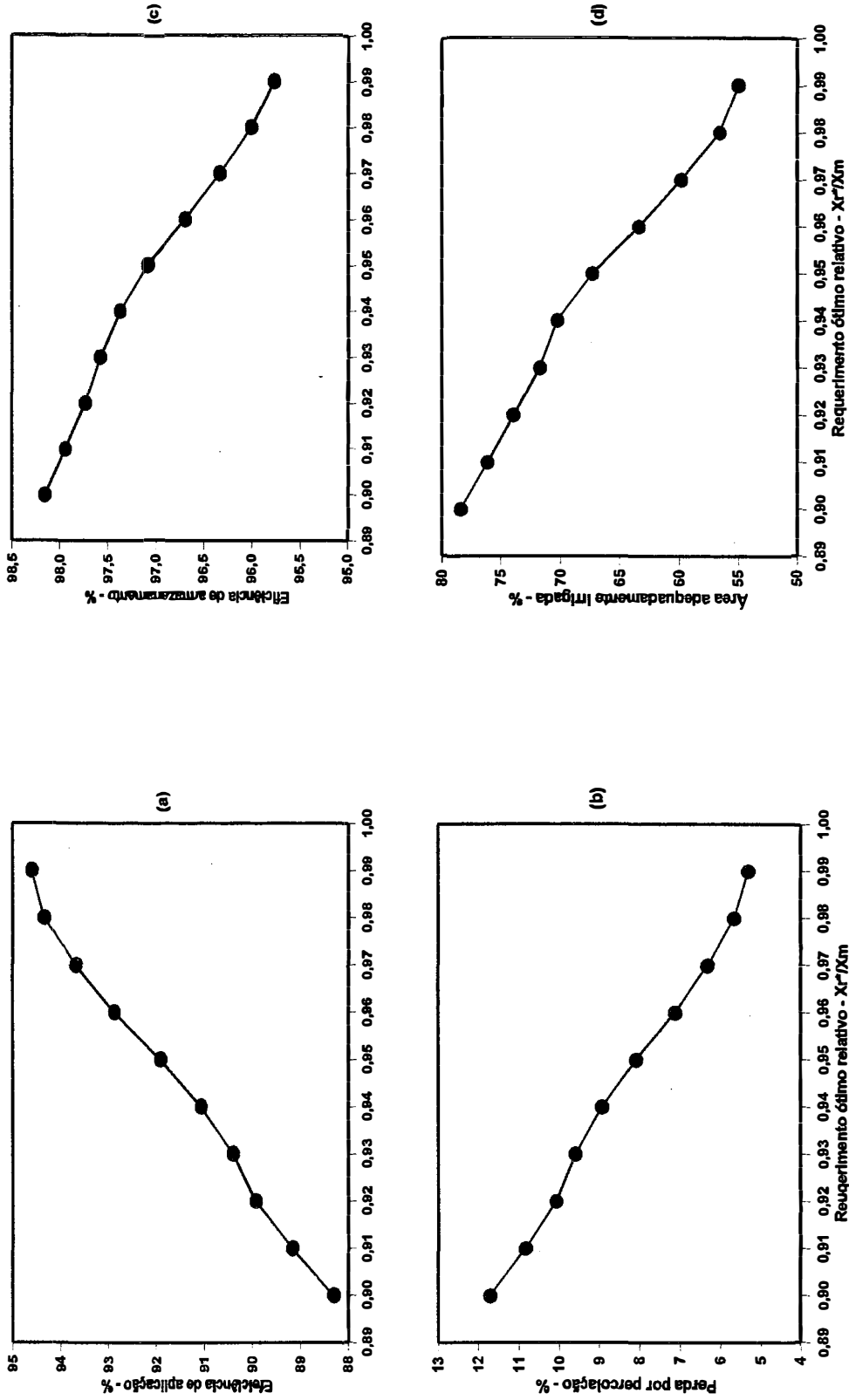


Figura 20. Qualidade da irrigação, para a condição ótima de operação do sistema, quando a lâmina média aplicada é fixa e a uniformidade de distribuição de água é 90%.

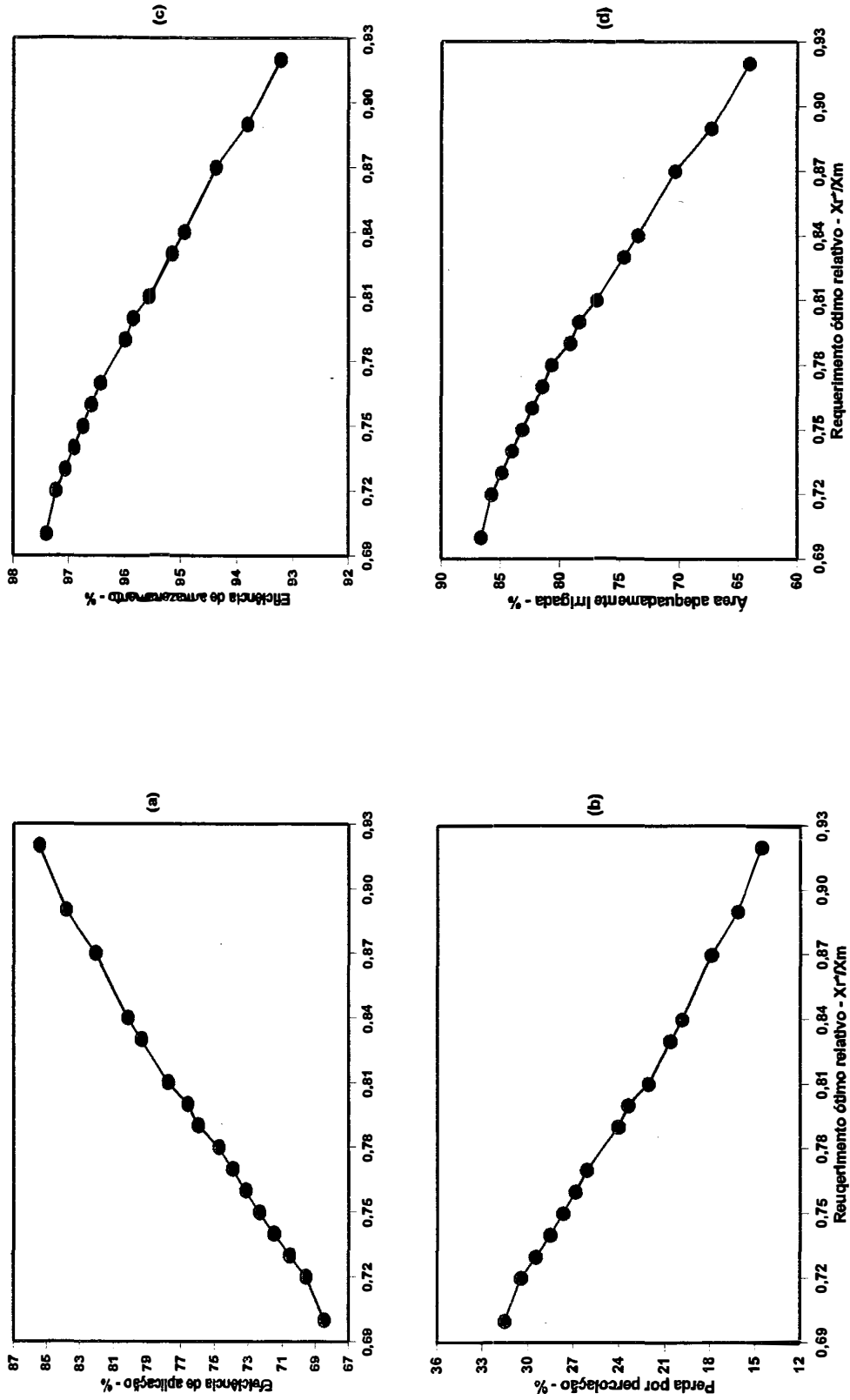


Figura 21. Qualidade da irrigação, para a condição ótima de operação do sistema, quando a lâmina média aplicada é fixa e a uniformidade de distribuição de água é 80%.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, as análises e discussões apresentadas permitiram as seguintes conclusões:

- 1) O modelo proposto possibilita ao produtor decidir sobre a melhor alternativa de manejo da cultura irrigada, se o valor pago pelo produto e o custo total de produção são conhecidos ou são previsíveis no período;
- 2) A uniformidade de distribuição de água e o valor pago pelo produto são elementos determinantes para o manejo e a operação de sistemas de irrigação, principalmente quando se trata de culturas de elevado valor econômico e não há restrição de disponibilidade de terra à produção; nos casos estudados, os sistemas com uniformidade de 90% promoveram menores reduções da receita líquida total;
- 3) A otimização da irrigação baseada no conceito de irrigação com déficit pode ser sugerida mesmo nos casos em que a água não é fator limitante; a redução de 18,64% da lâmina total de água aplicada e o aumento da receita líquida num dado cenário de exploração econômica da cultura,



comparado à situação em que a irrigação é completa, indicam a viabilidade dessa estratégia para maximização da receita líquida.

- 4) A operação dos sistemas de irrigação, com base no requerimento ótimo ou na lâmina ótima de água aplicada pelo sistema, permite um manejo da irrigação com níveis adequados de eficiência de aplicação, eficiência de armazenamento, perda por percolação e grau de adequação; para que isso ocorra, de acordo com as análises, é necessário que o sistema não apresente uniformidade de distribuição de água inferior a 80%;
- 5) Para a estratégia de irrigação que considera a disponibilidade de terra como fator limitante à produção, os resultados analisados indicam que o preço do produto exerce maior influência na redução da receita líquida do que o custo da água;
- 6) A irrigação com alta uniformidade proporciona melhores resultados econômicos para qualquer combinação de custo da água e preço do produto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMOWITZ, M. & STEGUN, I.A. In: **Handbook of mathematical functions with formulas, graphs and mathematical tables**, 3. ed. US Department Of Commerce, National Bureau of Standards. 1972. 1046p (Applied Mathematic Series 55.).
- AGUIAR, J. V. Produção de caupi irrigado em Bragança, Pará. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, **30(3)**:239-52, jul/set, 1992.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 5. ed. Viçosa, U.F.V. Imprensa Universitária, 1989. 596p.
- BERNUTH, R. D. von . Uniformity design criteria under limited water. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, **26(5)**:1418-21, 1983.
- CHRISTIANSEN, E. J. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley, University of California Experiment Station, 1942, 124p. (Bulletin 670).
- CHEN, D. & WALLENDER, W.W. Economic sprinkler selection, spacing and orientation. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, **27(3)**:737-43, 1984.

- DUKE, H. R.; HEERMANN, L.; L. J. DAWSON. Appropriate depths of application for scheduling center pivot irrigations. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, **35(5):1457-67**, 1992.
- ENGLISH, M. J. & NUSS, G. S. Designing for deficit irrigation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE**, New York, **108(2):91-106**, 1982.
- ENGLISH, M. J. Deficit irrigation. I: Analytical framework. **Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE**, New York, **116(3):399-412**, 1990.
- ENGLISH, M. J.; JAMES, L.; CHEN, C. Deficit irrigation. II: Observations in Colombia Basin. **Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE**, New York, **116(3):413-26**, 1990.
- FERGUSON, C. E. **Teoria micro-econômica**. 11. ed. Rio de Janeiro, Florence-Universitária, 1988. 609p.
- FRIZZONE, J. A. Funções de resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*, L.) ao uso de nitrogênio e lâminas de irrigação. Piracicaba, 1986. 133p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- FRIZZONE, J. A. **Irrigação por aspersão: uniformidade e eficiência**. Piracicaba, ESALQ, 1992. 53p. (Didática 003).
- FRIZZONE, J. A. **Funções de resposta das culturas à irrigação**. Piracicaba, ESALQ. 1993. 42p (Didática 006).
- FRIZZONE, J. A.; BOTREL, T. A.; FREITAS, H.A.C. Análise comparativa dos custos de irrigação por pivô-central, em cultura de feijão, utilizando energia elétrica e óleo diesel. **Engenharia Rural**, Piracicaba, **5(1):34-47**, 1994.

- GOHRING, R. T. & WALLENDER, W. W. Economics of sprinkler irrigation systems. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, **30(4)**:1083-9, 1987.
- HEERMANN, D. F. & HEIN, P. R. Performance characteristics of self-propelled center-pivot sprinkler irrigation systems. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, **11(1)**:11-15, 1968.
- HARGREAVES, G. H. & SAMANI, Z. A. Economics considerations of deficit irrigation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE**, New York, **110(4)**:343-58, 1984.
- HART, W. E. Overhead irrigation pattern parameters. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, **42(7)**:354-5. 1961.
- HART, W. E. & REYNOLDS, W. N. Analytical desing of sprinkler systems. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, **9(1)**:83-5, 89, 1965.
- HART,W.E.; NORUM,D.I.;PERI,G.Optimal seasonal irrigation application analysis. **Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE**, New York, **106(3)**:221-35, 1980.
- HEXEM, R. W. & HEADY, E. O. **Water production function for irrigation agriculture**. Ames, The Iowa State University Press, 1978. 215p.
- HOWELL, D. T. Sprinkler nonuniformity characteristics and yield. **Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE**, New York, **90(3)**:55-67, 1964.
- HOWELL,T. & PHENE, C. J. Distributions of irrigation water from low pressure lateral-moving irrigation system. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, **26(5)**:1422-9, 1983.

HOFFMANN, R.; SERRANO, O.; NEVES, E. M.; THAME, A.C.M.; ENGLER, J. J. C.

**Administração da empresa agrícola.** São Paulo, Pioneira, 1992. 325p.

INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA DO ESTADO DE SÃO PAULO:

**Relatórios técnicos.** São Paulo, 1994. 27p.

JAMES, L. G. **Principies of irrigation systems design.** New York, Jonh Wiley, 1988. 542p.

KARMELI, D. Estimating sprinkler distribution patterns using linear regression. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, **21(4):682-6**, 1978.

KELLER, J. & BLIESNER, R. D. **Sprinkler and trickler irrigation.** New York, Van Nostrand Reinhold, 1990. 651p.

KRUSE, E. G. Describing irrigation efficiency and uniformity. **Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE**, New York, **104(IR1):35-41**, 1978.

LANZER, E. A. & PARIS, Q. A especificação de modelos para análise econômica de uso de fertilizantes: Um caso encerrado?. **Revista de Economia Rural**, Brasília, **18 (18):23-36,1980**.

MANTOVANI, E. C. Desarrollo y evaluacion de modelos para el manejo del riego: estimation de la evapotranspiracion y efectos de la uniformidad de aplicacion del riego sobre a produccion de los cultivos. Córdoba, 1993. 183p. (Doctor - Escuela Tecnica Superior de Ingenieros Agronomos, Universidad de Córdoba).

MARTIN, D. L.; WATTS, D. G.; GILLEY, J. R. Model and production function for irrigation management. **Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE**, New York, **110(2):149-164**, 1984.

- MELO, J. F.de. Custos da irrigação por aspersão em Minas Gerais. Viçosa, 1993. 147p. (M. S. - Universidade Federal de Viçosa).
- NORUM, D. I. A method of evaluating adequacy an efficiency of overhead irrigation systems. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, **9**(2):218-20, 1966.
- NORUM, D. I.; PERI, G.;HART, W. E. Application of systems optimal depth concert. **Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE**, New York, **105**(4):357-67, 1979.
- OLIVEIRA, S. L. Funções de resposta do milho doce ao uso de irrigação e nitrogênio. Viçosa, 1993. 91p (D. S. - Universidade Federal de Viçosa).
- PAIR, C. H. Water distribution under sprinkler irrigation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, **14**(5):648-51, 1968.
- PERI, G.;HART, W. E.;NORUM, D. I. Optimal irrigation depths - A method of analysis. **Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE**, New York , **105**(4):341-54, 1979.
- PREÇOS AGRÍCOLAS - CEPEA/FEALQ. Piracicaba, (8):10-52, jul. 1994.
- SILVA, E. M.; HART, W. E. Modelo estatístico de distribuição de água infiltrada aplicado à irrigação com deficit. In: Congresso Nacional e Irrigação e Drenagem, 9.; Natal, 1992. **Anais**. Brasília, Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 1992. p.469-92.
- SOLOMON, K. H. Yield related interpretations of irrigation uniformity efficiency measurements. **Irrigation Science**, New York, **5**:161-72, 1984.

- STEFANELO, E. L. **Análise econômica e relação técnica entre o rendimento de soja e o emprego de fertilizantes e calcário em dez locais do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre, 1975. 149p. (Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul).
- STEGMAN, E. C.; MUSICK, J. T.; STWART, J. I. Irrigation water management. In: JENSEN, M. E.; **Design and operation of farm irrigation systems.** St. Joseph, ASAE, 1980.
- STEWART, J. I. & HAGAN, R. N. Functions to predict effects of crop water deficits. **Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE, New York** , **99(4):421-39**, 1973.
- VELEZ, E. P. & GARZA, A. M. **Respuesta de los cultivos a diferentes niveles de humedad del suelo** - Un enfoque metodológico de investigación. Chapingo Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1978. 149p.
- VELEZ, P. V. Response functions of crops to soil moisture stress. **Water Resources Bulletin, Minneapolis.** **17(4):699-703**, 1981.
- VARLEY, I. Evaluation of nonuniformity in irrigation and yield. **Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE, New York**, **102(1):149-64**, 1976.
- WALKER, W. R. Explicit sprinkler irrigation uniformity: efficiency model. **Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE**, **105(2):129-37**, 1979.
- WARRICK, A. W. Interrelationships of irrigation uniformity terms. **Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE, New York**, **109(3):317-32**, 1983.

WARRICK, A. W.; HART, W. E.; YITAYEW, M. Calculation of distribution and efficiency for nonuniform irrigation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE**, New York, **115**(4):674-86, 1989.

WILCOX, J. C. & SWAILES, G. E. Uniformity of water distribution by some undertree orchard sprinklers. **Scientific Agriculture**, Ottawa, **27**(11): 565-83, 1947.



## APÊNDICE

**QUADRO 1. Receita líquida para máxima produção, em US\$/ha, para diferentes custos da água e preços do produto.**

Preços do produto (US\$/kg)	Custos da água (US\$/mm.ha)				
	0,32	0,42	0,53	0,64	0,74
0,44	382,3	374,3	319,6	263,2	206,7
0,73	1137,4	1080,9	1024,5	968,1	911,7
1,02	1842,3	1789,9	1729,5	1673,0	1616,6
1,31	2547,2	2490,8	2434,4	2378,0	2321,6
1,61	3252,2	3195,8	3139,3	3082,9	3026,5

**QUADRO 2. Lâmina de água ótima econômica, em mm, para diferentes custos da água e preços do produto.**

Preços do produto (US\$/kg)	Custos da água (US\$/mm.ha)				
	0,32	0,42	0,53	0,64	0,74
0,44	485,8	471,7	457,6	432,4	429,3
0,73	501,4	493,8	485,3	476,7	468,2
1,02	509,5	503,4	497,3	491,1	485,0
1,31	513,5	508,8	504,0	499,2	485,0
1,61	516,1	512,2	508,3	504,4	500,5

**QUADRO 3. Produção ótima econômica, em kg/ha, para diferentes custos da água e preços do produto.**

Preços do produto (US\$/kg)	Custos da água (US\$/mm.ha)				
	0,32	0,42	0,53	0,64	0,74
0,44	2417,0	2405,3	2390,1	2371,6	2349,6
0,73	2426,0	2422,2	2416,7	2409,9	2401,8
1,02	2429,2	2425,0	2424,1	2420,6	2416,5
1,31	2430,3	2429,0	2427,2	2425,0	2422,6
1,61	2430,9	2430,0	2428,8	2427,4	2425,7

**QUADRO 4. Receita líquida ótima econômica, em US\$/ha, para diferentes custos da água e preços do produto.**

Preços do produto (US\$/kg)	Custos da água (US\$/mm.ha)				
	0,32	0,42	0,53	0,64	0,74
0,44	399,9	388,8	339,1	290,9	244,3
0,73	1142,8	1089,6	1037,3	985,8	935,3
1,02	1847,2	1793,1	1739,6	1686,8	1634,6
1,31	2552,1	2497,5	2443,3	2389,7	2336,6
1,61	3257,2	3202,3	3174,7	3093,6	3039,9

**QUADRO 5. Redução da receita líquida devida ao déficit de água aplicada ( $\beta$ ), em US\$/ha, para uniformidade de distribuição de água de 90%.**

Preços do produto (US\$/kg)	Custos da água (US\$/mm.ha)				
	0,32	0,42	0,53	0,64	0,74
0,44	0,30	0,29	0,29	0,28	0,27
0,73	0,52	0,51	0,50	0,49	0,48
1,02	0,73	0,73	0,72	0,71	0,70
1,31	0,95	0,94	0,93	0,92	0,92
1,61	1,17	1,16	1,15	1,14	1,13

**QUADRO 6. Redução da receita líquida devida ao déficit de água aplicada ( $\beta$ ), em US\$/ha, para uniformidade de distribuição de água de 80%.**

Preços do produto (US\$/kg)	Custos da água (US\$/mm.ha)				
	0,32	0,42	0,53	0,64	0,74
0,44	0,54	0,53	0,51	0,49	0,48
0,73	1,04	1,02	1,00	0,99	0,97
1,02	1,47	1,45	1,44	1,42	1,40
1,31	1,90	1,88	1,87	1,85	1,83
1,61	2,33	2,32	2,30	2,28	2,26

**QUADRO 7. Redução da receita líquida devida ao déficit de água aplicada ( $\beta$ ), em US\$/ha, para uniformidade de distribuição de água de 70%.**

Preços do produto (US\$/kg)	Custos da água (US\$/mm.ha)				
	0,32	0,42	0,53	0,64	0,74
0,44	0,73	0,67	0,65	0,61	0,56
0,73	1,31	1,28	1,26	1,24	1,22
1,02	1,97	1,95	1,92	1,90	1,87
1,31	2,55	2,52	2,50	2,48	2,45
1,61	3,12	3,10	3,08	3,05	3,03

**QUADRO 8. Redução da receita líquida devida ao excesso de água aplicada ( $\alpha$ ), em US\$/ha, para uniformidade de distribuição de água de 90%.**

Preços do produto (US\$/kg)	Custos da água (US\$/mm.ha)				
	0,32	0,42	0,53	0,64	0,74
0,44	0,15	0,18	0,20	0,22	0,23
0,73	0,19	0,22	0,25	0,28	0,30
1,02	0,23	0,26	0,29	0,32	0,35
1,31	0,25	0,29	0,33	0,36	0,40
1,61	0,29	0,33	0,36	0,39	0,44

**QUADRO 9. Redução da receita líquida devida ao excesso de água aplicada ( $\alpha$ ), em US\$/ha, para uma uniformidade de distribuição de água de 80%.**

Preços do produto (US\$/kg)	Custos da água (US\$/mm.ha)				
	0,32	0,42	0,53	0,64	0,74
0,44	0,15	0,19	0,22	0,25	0,28
0,73	0,19	0,23	0,25	0,29	0,33
1,02	0,24	0,27	0,31	0,34	0,37
1,31	0,25	0,30	0,32	0,37	0,41
1,61	0,32	0,34	0,37	0,39	0,45

**QUADRO 10. Redução da receita líquida devida ao déficit de água aplicada ( $\alpha$ ), em US\$/ha, para uma uniformidade de distribuição de água de 70%.**

Preços do produto (US\$/kg)	Custos da água (US\$/mm.ha)				
	0,32	0,42	0,53	0,64	0,74
0,44	0,16	0,19	0,24	0,26	0,30
0,73	0,19	0,22	0,26	0,30	0,33
1,02	0,24	0,26	0,29	0,34	0,36
1,31	0,27	0,30	0,34	0,37	0,40
1,61	0,29	0,33	0,37	0,42	0,45

**QUADRO 11. Efeito relativo do déficit sobre o excesso de água aplicada ( $\beta/\alpha$ ) para diferentes custos da água e preços do produto, para uniformidade de distribuição de água de 90%.**

Preços do produto (US\$/kg)	Custos da água (US\$/mm.ha)				
	0,32	0,42	0,53	0,64	0,74
0,44	1,20	1,66	1,43	1,25	1,18
0,73	2,70	2,30	1,99	1,78	1,60
1,02	3,22	2,82	2,49	2,22	1,99
1,31	3,73	3,22	2,82	2,59	2,31
1,61	3,93	3,55	3,22	2,94	2,59

**QUADRO 12. Efeito relativo do déficit sobre o excesso de água aplicada ( $\beta/\alpha$ ) para diferentes custos da água e preços do produto, para uniformidade de distribuição de água de 80%.**

Preços do produto (US\$/kg)	Custos da água (US\$/mm.ha)				
	0,32	0,42	0,53	0,64	0,74
0,44	3,51	2,74	2,31	1,98	1,71
0,73	5,37	4,42	3,94	3,38	2,94
1,02	6,25	5,37	4,69	4,16	3,73
1,31	7,46	6,25	5,78	5,01	4,42
1,61	7,67	6,80	6,25	5,78	5,01

**QUADRO 13. Lâmina média ótima relativa em função de  $\beta/\alpha$ , para uniformidade de distribuição de água de 90%.**

$\beta/\alpha$	Requerimento de água (mm)		
	16	14	12
1,18	(16,1) 1,004	(14,1) 1,004	(12,1) 1,004
1,65	(16,5) 1,032	(14,4) 1,032	(12,7) 1,032
1,98	(16,8) 1,048	(14,7) 1,048	(12,6) 1,048
2,30	(17,0) 1,061	(14,8) 1,061	(12,7) 1,061
2,70	(17,2) 1,076	(15,1) 1,076	(12,9) 1,076
3,22	(17,5) 1,093	(15,3) 1,093	(13,1) 1,093
3,55	(17,6) 1,103	(15,5) 1,103	(13,2) 1,103
3,93	(17,8) 1,113	(15,6) 1,113	(13,4) 1,113

\* Os valores entre parênteses correspondem à lâmina de água média ótima, em mm.

**QUADRO 14. Lâmina média ótima relativa em função de  $\beta/\alpha$ , para uniformidade de distribuição de água de 80%.**

$\beta/\alpha$	Requerimento de água (mm)		
	16	14	12
2,74	(18,4) 1,151	(16,1) 1,151	(13,8) 1,151
3,51	(19,4) 1,211	(16,9) 1,211	(14,5) 1,211
3,94	(19,9) 1,242	(17,4) 1,242	(14,9) 1,242
4,41	(20,4) 1,276	(17,9) 1,276	(15,3) 1,276
5,37	(21,4) 1,341	(18,8) 1,341	(16,1) 1,341
6,25	(22,4) 1,398	(19,6) 1,398	(16,8) 1,398
6,81	(23,0) 1,436	(20,1) 1,436	(17,2) 1,436
7,46	(23,7) 1,482	(20,7) 1,482	(17,8) 1,482

\* Os valores entre parênteses correspondem à lâmina de água média ótima, em mm.



**QUADRO 15. Requerimento ótimo relativo em função de  $\beta/\alpha$ , para uma uniformidade de distribuição de água de 90%.**

$\beta/\alpha$	Lâmina média (mm)		
	16	14	12
1,18	(15,8) 0,987	(13,8) 0,987	(11,8) 0,987
1,59	(15,4) 0,963	(13,5) 0,963	(11,5) 0,963
1,98	(15,2) 0,947	(13,3) 0,947	(11,3) 0,947
2,30	(15,0) 0,935	(13,1) 0,935	(11,2) 0,935
2,59	(14,8) 0,926	(12,9) 0,926	(11,1) 0,926
3,22	(14,6) 0,910	(12,7) 0,910	(10,9) 0,910
3,73	(14,4) 0,900	(12,6) 0,900	(10,8) 0,900
3,93	(14,3) 0,896	(12,5) 0,896	(10,7) 0,896

\* Os valores entre parênteses correspondem ao requerimento ótimo de água, em mm.

**QUADRO 16. Requerimento ótimo relativo em função de  $\beta/\alpha$ , para uniformidade de distribuição de água de 80%.**

$\beta/\alpha$	Lâmina média (mm)		
	16	14	12
1,71	(14,7) 0,916	(12,8) 0,916	(11,0) 0,916
2,94	(13,3) 0,834	(11,7) 0,834	(10,0) 0,834
3,73	(12,8) 0,799	(11,2) 0,799	( 9,6) 0,799
4,41	(12,4) 0,775	(10,8) 0,775	( 9,3) 0,775
5,01	(12,1) 0,757	(10,6) 0,757	( 9,1) 0,757
5,37	(11,9) 0,748	(10,5) 0,748	( 9,0) 0,748
6,25	(11,6) 0,727	(10,2) 0,727	( 8,7) 0,727
7,46	(11,2) 0,707	( 9,9) 0,707	( 8,5) 0,707

\* Os valores entre parênteses correspondem ao requerimento ótimo de água, em mm.

**QUADRO 17.** Qualidade da irrigação para a condição ótima de operação, quando o requerimento de água é fixo e a uniformidade de distribuição de água é 90%.

Lâmina ótima relativa	Adequação da irrigação (%)			
	Eficiência de irrigação	Eficiência de armazenamento	Perda por percolação	Área adequad. irrigada
1,00	95,17	95,53	4,83	51,87
1,01	94,91	95,68	5,09	53,38
1,02	94,25	96,04	5,75	56,95
1,03	93,65	96,34	6,35	59,92
1,04	93,05	96,61	6,94	62,62
1,05	92,44	96,87	7,56	65,20
1,06	91,57	97,20	8,43	68,50
1,07	90,87	97,43	9,13	70,93
1,08	90,10	97,67	9,90	73,39
1,09	89,52	97,84	10,48	75,09
1,10	88,91	98,00	11,09	76,79
1,11	88,58	98,08	11,42	77,65

**QUADRO 18.** Qualidade da irrigação para a condição ótima de operação, quando o requerimento de água é fixo e a uniformidade de distribuição de água é 80%.

Lâmina ótima relativa	Adequação da irrigação (%)			
	Eficiência de irrigação	Eficiência de armazenamento	Perda por percolação	Área adequad. irrigada
1,05	87,71	92,29	12,29	58,93
1,11	84,19	93,67	15,81	66,54
1,17	81,14	94,65	18,86	71,92
1,20	79,27	95,18	20,73	74,77
1,23	77,85	95,54	22,15	76,74
1,28	75,36	96,12	24,64	79,86
1,32	73,35	96,54	26,65	82,10
1,34	72,20	96,76	27,80	83,28
1,37	70,93	96,99	29,07	84,51
1,40	69,50	97,23	30,50	85,79
1,44	67,87	97,49	32,13	87,15
1,48	65,95	97,76	34,05	88,61

**QUADRO 19. Qualidade da irrigação para a condição ótima de operação, quando a lâmina média aplicada é fixa e a uniformidade de distribuição de água é 90%.**

Requerimento ótimo relativo	Adequação da irrigação (%)			
	Eficiência de irrigação	Eficiência de armazenamento	Perda por percolação	Área adequad. irrigada
0,99	94,58	95,87	5,42	55,19
0,98	94,33	96,00	5,67	56,55
0,97	93,67	96,33	6,33	59,82
0,96	92,87	96,69	7,13	63,39
0,95	91,90	97,08	8,10	67,30
0,94	91,06	97,37	8,94	70,28
0,93	90,62	97,51	9,38	71,75
0,92	89,92	97,73	10,08	73,93
0,91	89,16	97,94	10,84	76,12
0,90	88,29	98,15	11,71	78,38

**QUADRO 20. Qualidade da irrigação para a condição ótima de operação, quando a lâmina média aplicada é fixa e a uniformidade de distribuição de água é 80%.**

Requerimento ótimo relativo	Adequação da irrigação (%)			
	Eficiência de irrigação	Eficiência de armazenamento	Perda por percolação	Área adequad. irrigada
0,92	85,42	93,22	14,58	64,07
0,89	83,82	93,80	16,18	67,25
0,87	82,08	94,36	17,92	70,36
0,84	80,15	94,93	19,85	73,46
0,81	77,75	95,57	22,25	76,88
0,79	75,96	95,99	24,04	79,15
0,77	73,91	96,43	26,09	81,51
0,75	72,33	96,73	27,67	83,15
0,74	71,47	96,89	28,53	84,00
0,73	70,55	97,05	29,45	84,86
0,72	69,56	97,22	30,44	85,74
0,70	64,48	97,39	31,52	86,65

**DIAGRAMA LÓGICO DE FLUXO  
DO MODELO COMPUTACIONAL**

