ISMAEL DE BARROS ROCHA

PRODUÇÃO DA CENOURA (*Daucus carota* L.) IRRIGADA NAS CONDIÇÕES EDAFOCLIMÁTICAS DA REGIÃO DO ALTO PARANAÍBA: AVALIAÇÃO ECONÔMICA E DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CULTURA

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2003

ISMAEL DE BARROS ROCHA

PRODUÇÃO DA CENOURA (*Daucus carota* L.) IRRIGADA NAS CONDIÇÕES EDAFOCLIMÁTICAS DA REGIÃO DO ALTO PARANAÍBA: AVALIAÇÃO ECONÔMICA E DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CULTURA

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 30 de Junho de 2003.

_____	_____
Profa. Suely de Fátima Ramos Silveira (Conselheiro)	Prof. Mário Puiatti (Conselheiro)
_____	_____
Porf. Márcio Mota Ramos	Prof. Edvaldo Fialho dos Reis

_____

Prof. Rubens Alves de Oliveira
(Orientador)

À MINHA ESPOSA, ADRIANA,

que sempre está presente nos momentos de tristeza, com suas palavras de incentivo e auxílio, e nunca me negou o seu amor;

AOS MEUS FAMILIARES,

que sempre estiveram presentes e nunca me abandonaram, fortalecendo- me com suas orações, nos momentos mais difíceis,

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade concedida para evoluir nesta existência moral e intelectualmente.

À Universidade Federal de Mato Grosso, pela oportunidade de realizar este curso.

À Universidade Federal de Viçosa, por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola, pelo curso oferecido.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG, pelo financiamento desta pesquisa.

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

À Cooperativa Agropecuária do Alto Paranaíba - COOPADAP, pelo apoio na execução deste trabalho.

Ao professor Rubens Alves de Oliveira, pela orientação, apoio e por sempre acreditar que alcançaríamos o objetivo proposto.

Aos professores Suely de Fátima Ramos Silveira, Paulo Roberto Cecon, Mário Puiatti e Gilberto Chohaku Sediyama, pelas críticas e sugestões nas diversas fases deste trabalho.

Aos professores Márcio Mota Ramos e Edvaldo Fialho dos Reis pelas críticas e sugestões.

Aos amigos do Departamento de Engenharia Agrícola, em especial a Sólon, Adão, Ricardo, Suzana, Maurício, Luiz Otávio, Adilson, José Luiz, Bérgson, Olívio, Silvia, Paulo Márcio e Viviane.

Aos amigos Hércules, Celso, Adílio, Marcelo, Job, João e Célio, da Fazenda Experimental Rio Paranaíba, que nos ajudaram e sem os quais seria impossível a realização deste trabalho.

Aos amigos Francisco de Almeida Lobo e Joadil Gonçalves de Abreu, pela amizade e auxílio nas horas difíceis.

BIOGRAFIA

ISMAEL DE BARROS ROCHA, filho de José Ferreira Rocha e Zina Antonina de Barros Rocha, nasceu na cidade de Cuiabá, Estado de Mato Grosso, aos 16 de agosto de 1961.

Em março de 1981, iniciou o Curso de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa (UFV), diplomando-se em julho de 1985.

Em março de 1986, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, na Universidade Federal de Viçosa, defendendo a dissertação em setembro de 1989.

Em abril de 1990, iniciou um trabalho de pesquisa junto à Universidade Federal de Mato Grosso, no Departamento de Solos e Engenharia Rural, integrando o programa de Desenvolvimento Regional do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), concluindo-o em fevereiro de 1993.

Em março de 1993, foi contratado como professor substituto, pela Universidade Federal de Mato Grosso.

Em setembro de 1995, foi nomeado em caráter efetivo, na classe de Professor Assistente na Universidade Federal de Mato Grosso.

Em abril de 1999, iniciou o Curso de Doutorado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, na Universidade Federal de Viçosa, defendendo tese em 30 de junho de 2003.

ÍNDICE

	Página
LISTA DE QUADROS	x
LISTA DE FIGURAS	xiv
LISTA DE SIMBOLOS	xviii
RESUMO	xxi
ABSTRACT	xxiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1. Cultura da cenoura	5
2.2. Função de produção	8
2.2.1. Produto físico médio.....	12
2.2.2. Produto físico marginal.....	12
2.2.3. Produção máxima física.....	12
2.2.4. Produção máxima econômica.....	14
2.2.5. Relação fator-fator.....	16
2.2.6. Estratégia de irrigação.....	17
2.2.6.1. Sob restrição de terra.....	17
2.2.6.2. Sob restrição de água.....	21

2.2.7. Função de resposta múltipla..... 23
2.2.8. Experimentos utilizando função de produção..... 25
2.3. Evapotranspiração e coeficiente de cultura 29
2.4. Unidades térmicas (graus-dia) 32
2.5. Considerações gerais 34
3. MATERIAL E MÉTODO 35
3.1. Área experimental 35
3.2. Instalação da cultura..... 39
3.3. Instalação do experimento..... 40
3.4. Delineamento experimental..... 45
3.5. Manejo da irrigação..... 47
3.6. Função de produção..... 48
3.6.1. Estratégia de irrigação..... 49
3.6.1.1. Sob restrição de terra..... 49
3.6.1.2. sob restrição de água..... 50
3.6.2. Função de resposta múltipla..... 51
3.7. Estimativa do coeficiente de cultura..... 52
3.8. Determinação dos graus-dia..... 55
3.9. Eficiência do uso da água..... 55
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 57
4.1. Manejo de irrigação..... 57
4.2. Função de produção..... 58
4.2.1. Preço do produto e dos fatores de produção..... 62
4.2.2. Superfície de resposta..... 65
4.2.3. Taxa marginal de substituição técnica..... 67
4.3. Superfície de resposta para cenoura nas classes Extra A, AA e AAA..... 70
4.4. Estratégias ótimas de irrigação..... 79
4.2.3. Sob restrição de água..... 79
4.2.3. Sob restrição de terra..... 81
4.5. Estimativa do coeficiente de cultura.....

4.6. Análise do crescimento da cultura em função dos graus-dia acumulados e da lâmina de irrigação..... 92
4.7. Eficiência do uso da água 93
5. RESUMO E CONCLUSÕES..... 97
6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS..... 100
ANEXOS..... 108

LISTA DE QUADROS

QUADRO		Página
1	Características químicas do solo da área experimental, para as duas profundidades estudadas.....	38
2	Distribuição granulométrica e resultado das análises físico-hídricas do solo da área experimental, para as duas camadas estudadas.....	38
3	Pulverizações realizadas durante o ciclo de cultivo da cultivar Brasília.....	45
4	Pulverizações realizadas durante o ciclo de cultivo da cultivar Nantes.....	46
5	Classificação das raízes segundo o comprimento e o diâmetro mediano.....	47
6	Estimativas dos coeficientes do modelo de superfície de resposta de segunda ordem para estimar a produtividade comercial de raízes de cenoura das cultivares Brasília e Nantes em função de lâmina total de água aplicada (W) e de dose de nitrogênio (N).....	61
7	Valores médios observados da produtividade de raízes comerciais da cenoura 'Brasília', em t ha^{-1}, para lâminas totais de água aplicada (W) e doses de nitrogênio (N). Rio Paranaíba, MG, 09.01 a 23.04.2002.....	62

8 Valores médios observados da produtividade de raízes comerciais da cenoura 'Nantes', em t ha^{-1}, para lâminas totais de água aplicada (W) e doses de nitrogênio (N). Rio Paranaíba, MG, 06.05 a 09.09.2002..... 62

9 Preços médios mensais pagos aos produtores por tonelada de cenoura suja (P_Y) e aos comerciantes por tonelada de cenoura limpa, classificada e selecionada (Extra AAA, Extra AA e Extra A) e de nitrogênio (sulfato de amônio) (P_N) por kg..... 64

10 Doses de nitrogênio (N) e produtividades máximas física (Y_{fis}) e econômica (Y_{eco}) nas lâminas totais de água, cultivar Brasília, Rio Paranaíba, MG..... 67

11 Doses de nitrogênio (N) e produtividades máximas física (Y_{fis}) e econômica (Y_{eco}) nas lâminas totais de água, cultivar Nantes, Rio Paranaíba, MG..... 68

12 Combinações de lâminas totais de água e doses de nitrogênio e as correspondentes taxas marginais de substituição da água pelo nitrogênio, para níveis fixos de produtividade para a cenoura, cultivar Brasília. Rio Paranaíba, MG..... 69

13 Combinações de lâminas totais de água e doses de nitrogênio e as correspondentes taxas marginais de substituição da água pelo nitrogênio, para níveis fixos de produtividade para a cenoura, cultivar Nantes. Rio Paranaíba, MG..... 69

14 Estimativas dos coeficientes do modelo de superfície de resposta de segunda ordem para estimar a produtividade de cenoura da cultivar Brasília, para as classes Extra AAA, AA e A em função de lâmina total de água aplicada e dose de nitrogênio (N). Rio Paranaíba, MG..... 72

15 Estimativas dos coeficientes do modelo de superfície de resposta de segunda ordem para estimar a produtividade de cenoura da cultivar Nantes, para as classes Extra AAA, AA e A em função de lâmina total de água aplicada e dose de nitrogênio (N). Rio Paranaíba, MG..... 72

16 Produtividades médias observadas das raízes de cenoura, cultivar Brasília classificada como Extra AAA, AA e A em t ha^{-1}, para doses de nitrogênio (N) e lâminas totais de água aplicadas(W). Rio Paranaíba, MG..... 73

17 Produtividades médias observadas das raízes de cenoura, cultivar Nantes classificada como Extra AAA, AA e A em t ha^{-1}, para doses de nitrogênio (N) e lâminas totais de água aplicadas(W). Rio Paranaíba, MG..... 73

18 Produtividades máximas física e econômica nas lâminas totais de água (W) e doses de nitrogênio (N) aplicadas, cultivar Brasília, Rio Paranaíba, MG..... 74

19 Produtividades máximas física e econômica nas lâminas totais de água (W) e doses de nitrogênio (N) aplicadas, cultivar Brasília, Rio Paranaíba, MG..... 75

20 Valores das lâminas máxima (Wmax), ótima (Ww*) e equivalente (Wwe) em função do preço do produto (P_Y), dos custos fixos e independentes da irrigação (Co) e do preço da água de irrigação para um pivô de 80 ha (P_W), para a cenoura 'Brasília', durante os períodos de janeiro a maio e novembro e dezembro de 2002..... 80

21 Valores das lâminas máxima (Wmax), ótima (Ww*) e equivalente (Wwe) em função do preço do produto (P_Y), dos custos fixos e independentes da irrigação (Co) e do preço da água de irrigação para um pivô de 80 ha (P_W), para a cenoura 'Nantes', durante o período de junho a novembro de 2002..... 81

22 Valores das lâminas máxima (Wmax), ótima (Wt*) e equivalente (Wte) em função do preço do produto (P_Y), dos custos fixos e independentes da irrigação (Co) e do preço da água de irrigação para um pivô de 80 ha (P_W), para a cenoura 'Brasília' 84

23 Valores das lâminas máxima (Wmax), ótima (Wt*) e equivalente (Wte) em função do preço do produto (P_Y), dos custos fixos e independentes da irrigação (Co) e do preço da água de irrigação para um pivô de 80 ha (P_W), para a cenoura 'Nantes' 84

24 Valores da evapotranspiração de referência (ETo) estimada pelo método de Penman-Monteith, evapotranspiração da cultura (ETc) e de coeficiente de cultura (Kc) da cenoura estimados com uso da metodologia proposta pelo Boletim FAO 56, para as cultivares Brasília e Nantes..... 90

25 Valores de coeficiente de cultura (K_c) da cenoura nos estádios de desenvolvimento, obtidos em diferentes fontes de literatura e ajustado para o experimento de acordo com uso do Boletim FAO 56 para as cultivares Brasília e Nantes..... 92

26 Valores dos graus-dia acumulados (GD) e dias após a semeadura (DAS) nos diversos estádios de desenvolvimento da cultura, para as cultivares Brasília e Nantes. Rio Paranaíba, MG..... 93

27 Estimativas dos coeficientes do modelo de superfície de resposta de segunda ordem para estimar eficiência de uso da água (EUA) das cultivares Brasília e Nantes, em função da lâmina total de água aplicada (W) e doses de nitrogênio (N)..... 96

LISTA DE FIGURAS

FIGURA		Página
1	Variação diária das temperaturas máxima e mínima (ºC) e da umidade relativa do ar média (%) para a época de cultivo da cultivar Brasília.....	36
2	Variação diária das temperaturas máxima e mínima (ºC) e da umidade relativa do ar média para a época de cultivo da cultivar Nantes.....	36
3	Precipitação pluvial diária (mm) diária durante a época de cultivo da cultivar Brasília.....	37
4	Precipitação pluvial diária (mm) diária durante a época de cultivo da cultivar Nantes.....	37
5	Curva de retenção de água no solo, para as profundidades de 0-20 e 20-40 cm.....	39
6	Croqui da área experimental.....	41
7	Preparo dos canteiros na área experimental.....	42
8	Estrutura de suporte do tubo perfurado usado na irrigação das parcelas experimentais.....	43
9	Estruturas nas quais foram instaladas caixas de fibra de vidro para controle da quantidade de água aplicada nas parcelas experimentais.....	43

10 Lâminas totais de água aplicadas durante o ciclo da cultivar Brasília..... 59

11 Lâminas totais de água aplicadas durante o ciclo da cultivar Nantes..... 60

12 Variação da umidade do solo durante o ciclo da cenoura, cultivar Brasília, do tratamento W_3N_2, apresentado pelo programa computacional SISDA..... 60

13 Variação da umidade do solo durante o ciclo da cenoura, cultivar Nantes, do tratamento W_3N_2, apresentado pelo programa computacional SISDA..... 61

14 Estimativa da produtividade de raízes comerciais da cenoura (*Dacus carota* L.), cultivar Brasília, em função de doses de nitrogênio e de lâminas totais de água aplicada. Rio Paranaíba, MG, 09.01 a 23.04.2002..... 63

15 Estimativa da produtividade de raízes comerciais da cenoura (*Dacus carota* L.), cultivar Nantes, em função de doses de nitrogênio e de lâminas totais de água. Rio Paranaíba, MG, 06.05 a 09.09.2002..... 63

16 Estimativa da produtividade da cenoura 'Brasília' classificada como Extra AAA, em função de doses de nitrogênio e de lâminas totais de água. Rio Paranaíba, MG.. 76

17 Estimativa da produtividade da cenoura 'Brasília' classificada como Extra AA, em função de doses de nitrogênio e de lâminas totais de água. Rio Paranaíba, MG... 76

18 Estimativa da produtividade da cenoura 'Brasília' classificada como Extra A, em função de doses de nitrogênio e de lâminas totais de água. Rio Paranaíba, MG.. 77

19 Estimativa da produtividade da cenoura 'Nantes' classificada como Extra AAA, em função de doses de nitrogênio e de lâminas totais de água. Rio Paranaíba, MG.. 77

20 Estimativa da produtividade da cenoura 'Nantes' classificada como Extra AA, em função de doses de nitrogênio e de lâminas totais de água. Rio Paranaíba, MG.. 78

21 Estimativa da produtividade da cenoura 'Nantes' classificada como Extra A, em função de doses de nitrogênio e de lâminas totais de água. Rio Paranaíba, MG.. 78

22 Lâminas de água total máxima (Wmax), ótima (Ww*) e equivalente (Wwe), em função do preço do produto (P_Y), com doses de 160 e 240 kg de N ha^{-1}, cultivar Brasília, considerando a água como fator limitante da produção..... 82

23 Lâminas de água total máxima (Wmax), ótima (Ww*) e equivalente (Wwe), em função do preço do produto (P_Y), com doses de 160 e 240 kg de N ha^{-1}, cultivar Nantes, considerando a água como fator limitante da produção..... 82

24 Receita líquida em função da lâmina total de água e do preço do produto, com dose de nitrogênio que resulta na produtividade máxima econômica, cultivar Brasília, considerando a água como fator limitante da produção..... 83

25 Receita líquida em função da lâmina total de água e do preço do produto, com dose de nitrogênio que resulta na produtividade máxima econômica, cultivar Nantes, considerando a água como fator limitante da produção..... 83

26 Lâmina de água total máxima (Wmax), ótima (Wt*) e equivalente (Wte), em função do preço do produto (P_Y), com dose de 160 kg ha^{-1} de nitrogênio, cultivar Brasília, considerando a terra como fator limitante da produção..... 85

27 Lâmina de água total máxima (Wmax), ótima (Wt*) e equivalente (Wte), em função do preço do produto (P_Y), com dose de 160 kg ha^{-1} de nitrogênio, cultivar Nantes, considerando a terra como fator limitante da produção..... 85

28 Receita líquida em função de P_W/P_Y e da lâmina total de água, para a cultivar Brasília..... 87

29 Receita líquida em função de P_W/P_Y e da lâmina total de água, para a cultivar Nantes..... 87

30 Variação dos coeficientes Kcb_b e Kc (Kcb + Ke), da precipitação pluvial e da lâmina de irrigação, ao longo do ciclo da cultura da cenoura, cultivar Brasília..... 91

31 Variação dos coeficientes Kcb_b e Kc (Kcb + Ke), da precipitação pluvial e da lâmina de irrigação, ao longo do ciclo da cultura da cenoura, cultivar Nantes..... 91

32 Foto da cultura da cenoura, cultivar Nantes, normal (A) e em contraste (B), para determinação do sombreamento do solo pela parte aérea das plantas..... 92

33 Eficiência do uso da água pela cenoura, cultivar Brasília, em função das lâminas totais de água e de doses de nitrogênio..... 95

34 Eficiência do uso da água pela cenoura, cultivar Nantes, em função das lâminas totais de água e de doses de nitrogênio..... 95

LISTAS DE SÍMBOLOS

SÍMBOLOS

A	Área irrigada (ha)
A_d	Área disponível para cultivo (ha)
C	Custo dos fatores fixos (R$ ha^{-1})
CC	Capacidade de campo (% em peso)
CEB	Custo de energia para o bombeamento (R$ ha^{-1} ciclo da $cultura^{-1}$)
C_0	Custos fixos e independentes da irrigação (R$ ha^{-1})
C_t	Custo total de produção (R$ ha^{-1})
D	Lâmina de água perdida por drenagem profunda (mm)
Da	Massa específica do solo (g cm^{-3})
DAS	Dias após a semeadura (d)
$D_{e,i-1}$	Lâmina de evaporação acumulada na camada superficial do solo até o final do dia anterior (mm)
$\frac{dY}{dW}$	Produtividade física marginal do fator água
$\frac{dY}{dN}$	Produtividade física marginal do fator nitrogênio
Dp	Depreciação do sistema de irrigação (R$ ha^{-1} ciclo da $cultura^{-1}$)
E	Lâmina de água utilizada no processo de evaporação na superfície do solo (mm)
e_i	Erro aleatório
$E_{superficial}$	Escoamento superficial (mm d^{-1})
ETc	Evapotranspiração da cultura (mm d^{-1})
ETo	Evapotranspiração de referência (mm dia^{-1})
EUA	Eficiência de uso de água (g m^{-2} mm^{-1})
F	Fator de disponibilidade de água (decimal)
few	Fração do solo que está exposto e umedecido (decimal)
fw	Fração média da superfície do solo molhada por irrigação ou chuva (decimal)

GD	Graus-dia (ºC)
h	Altura da cultura (m)
Kc_{max}	Coeficiente de cultura máximo, após chuva ou irrigação (-)
Kc_{min}	Coeficiente de cultura mínimo, para solo com superfície descoberta e seca (-)
Kcb	Coeficiente basal de cultura basal (-)
Kcb_{final}	Coeficiente basal de cultura do estádio final de crescimento (-)
$Kcb_{inicial}$	Coeficiente basal de cultura durante o estádio inicial (-)
Kcb_{meio}	Coeficiente basal de cultura durante o estádio II (-)
Ke	Coeficiente de evaporação do solo (-)
Kr	Coeficiente de redução da evaporação (-)
Ks	Coeficiente de estresse hídrico (-)
LRD	Lâmina de água real disponível no solo (mm)
LNR	Lâmina real necessária para a umidade de o solo retornar a capacidade de campo (mm)
$L_{anterior}$	Lâmina de água no solo antes da precipitação pluvial (mm d^{-1})
L_{atual}	Lâmina de água no solo atual (mm d^{-1})
$L_{percolada}$	Lâmina de água percolada (mm d^{-1})
MO	Manutenção e Operação do Sistema (R$ ha^{-1} ciclo da $cultura^{-1}$)
n	Número de dias entre duas irrigações consecutivas
N	Dose de nitrogênio aplicado (kg ha^{-1})
Pe	Precipitação pluvial efetiva (mm dia^{-1})
PM	Ponto de murcha permanente (% em peso)
P_N	Preço do fator nitrogênio (R$ kg^{-1})
Pp	Precipitação pluvial (mm)
P_W	Preço do fator água (R$ mm^{-1} ha^{-1})
P_{WBsb}	Preço do fator água para o cultivar Brasília, (R$ mm^{-1} ha^{-1})
P_{WNan}	Preço do fator água para o cultivar Nantes, (R$ mm^{-1} ha^{-1})
P_Y	Preço do produto (R$ t^{-1})
$P_Y \frac{dY}{dN}$	Valor da produtividade marginal do fator nitrogênio
$P_Y \frac{dY}{dW}$	Valor da produtividade marginal do fator água
R^2	Coeficiente de determinação
REW	Lâmina de evaporação acumulada até o final da fase 1 (mm)
RL	Receita líquida (R$ ha^{-1})
T	Lâmina de água utilizada para a transpiração da cultura (mm)
T_b	Temperatura-base da cultura (ºC)
TEW	Lâmina máxima de água que pode ser evaporada do solo (mm)
T_{max}	Temperatura do ar máxima (ºC)
T_{min}	Temperatura do ar mínima (ºC)
TMS	Taxa marginal de substituição (-)
u_2	Velocidade do vento, média diária, a 2,0 m de altura (m s^{-1})
UR_{min}	Umidade relativa do ar mínima, média diária (%)
V	Lâmina de água utilizada para o crescimento da cultura (mm)
W	Lâmina total de água aplicada (mm)
W_i	Lâmina de irrigação, sendo i igual a tratamento (i = 0; 1; 2; 3 e 4 em mm d^{-1})

Wmax	Lâmina total de água que proporciona a produção máxima física (mm)
Wn	Lâmina de água de irrigação para o intervalo de n dias (mm)
W_t^*	Lâmina total de água ótima, sendo a terra o fator limitante da produção (mm)
W_{te}	Lâmina total de água equivalente, sendo a terra o fator limitante da produção (mm)
W_{we}	Lâmina total de água equivalente, sendo a água o fator limitante da produção (mm)
W_w^*	Lâmina total de água ótima, sendo a água o fator limitante da produção (mm)
W_d	Volume de água disponível (m^3)
Z	Profundidade efetiva do sistema radicular (cm)
Z_{ev}	Profundidade do solo sujeita a evaporação (m)
$\hat{Y}$	Produtividade estimada da cultura (t ha^{-1})
$1 - f_c$	Fração média de solo exposto, não sombreado, (decimal)
β_i	Coeficientes de regressão
	Multiplicador de Lagrange
θ_{CC}	Umidade do solo na capacidade de campo (m^3 m^{-3})
θ_{PM}	Umidade do solo no ponto de murcha permanente (m^3 m^{-3})

RESUMO

ROCHA, Ismael de Barros, D.S., Universidade Federal de Viçosa, Julho de 2003. **Produção da cenoura (*Daucus carota* L.) irrigada nas condições edafoclimáticas da região do Alto Paranaíba: avaliação econômica e determinação do coeficiente de cultura**. Orientador: Rubens Alves de Oliveira. Conselheiros: Gilberto Chohaku Sediyama, Mário Puiatti, Paulo Roberto Cecon e Suely de Fátima Ramos Silveira.

Os objetivos foram determinar para a cenoura (*Daucus carota* L.), cultivares Brasília e Nantes, cultivadas no verão e no inverno, respectivamente, as combinações dos níveis de água e de nitrogênio que permitissem produtividade capaz de gerar receita líquida máxima, e estimar os coeficientes de cultura (Kc) para um manejo racional da irrigação na região do Alto Paranaíba. Instalaram-se na Estação Experimental Rio Paranaíba da Cooperativa Agropecuária do Alto Paranaíba (COOPADAP), em Rio Paranaíba, MG, dois experimentos que foram montados segundo um esquema fatorial 5x5 no delineamento blocos ao acaso, com três repetições. Os tratamentos constaram das combinações de cinco níveis de lâmina total de água e cinco doses de nitrogênio. No primeiro experimento, com a cultivar Brasília, aplicaram-se cinco níveis de lâmina total de água: W_1 = 397,67mm; W_2 = 409,85mm; W_3 = 431,83mm; W_4 = 445,54mm e W_5 = 479,81 mm. No segundo experimento com o cultivar Nantes, foram: W_1 = 311,45mm; W_2 = 369,94mm; W_3 = 429,64mm; W_4 = 482,31mm e W_5 = 545,10 mm. Os cinco níveis de doses de nitrogênio foram: N_0 = 0kg ha^{-1},

N_1 = 80kg ha^{-1}, N_2 = 160kg ha^{-1}, N_3 = 240kg ha^{-1} e N_4 = 320kg ha^{-1}, distribuído a lanço e aplicado 40% na semeadura e mais duas aplicações de 30% cada, em cobertura, aos 30 e aos 50 dias após a semeadura. As semeaduras foram realizadas nos dias 9 de janeiro de 2002 (Brasília) e 6 de maio de 2002 (Nantes). A adubação básica constou de 220kg de K_2O ha^{-1}, na forma de cloreto de potássio, 15 dias antes da semeadura e de 66kg ha^{-1}, em cobertura, aos 20 e 40 dias após a semeadura, e 2.222kg de P_2O_5 ha^{-1}, na forma de superfosfato simples, juntamente com o cloreto de potássio na semeadura. Foi feita a incorporação de 3t de calcário dolomítico por hectare, 3 meses antes da semeadura de verão. As irrigações foram aplicadas seguindo o turno de rega de um dia, da semeadura até o desbaste; de dois dias, do desbaste até o final do estádio I (80% de cobertura do solo); e de três dias, do final do estádio I até a colheita. O coeficiente de cultura (Kc) foi estimado utilizando-se a metodologia do Boletim FAO 56, sendo o Kc separado em coeficiente de evaporação do solo (Ke) e coeficiente basal da cultura (Kcb). Feita a análise de variância e de regressão, verificou-se que as equações de regressão ajustadas aos dados de produtividade de raízes comerciais, como variável dependente e, para lâminas totais de água aplicadas e doses de nitrogênio, como variáveis independentes, apresentaram os coeficientes de regressão significativos ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t e os coeficientes de determinação (R^2) iguais a 0,8684 e 0,8689 para as cultivares Brasília e Nantes, respectivamente. Foi observado que, para a cultivar Brasília, a produtividade máxima econômica estimada foi 40,94t ha^{-1}, obtida com a lâmina total de água de 443,17mm e dose de nitrogênio de 170,49kg de N ha^{-1}, proporcionando receita líquida de R$19.941,81 ha^{-1}, para o mês de março de 2002; e, para a cultivar Nantes, a produtividade máxima econômica estimada foi 57,90t ha^{-1}, obtida com lâmina de 434,75mm e 171,56kg de N ha^{-1}, e receita líquida de R$ 6.539,63ha^{-1}, para o mês de setembro de 2002, considerando os preços dos fatores (água e nitrogênio) e do produto (cenoura). Os coeficientes de cultura (Kc) ajustados foram: estádio inicial = 1,07 e 1,07; estádio I = 1,14 e 1,13 e estádio II = 1,10 e 1,09, para as cultivares Brasília e Nantes, respectivamente.

ABSTRACT

ROCHA, Ismael de Barros, D. S., Universidade Federal de Viçosa, July 2003. **Irrigated carrot production (*Daucus carota* L.) under the edaphoclimatic conditions of the Alto Paranaíba region : an economical evaluation and determination of the crop coefficient.** Adviser: Rubens Alves de Oliveira. Committee members: Gilberto Chohaku Sediyama, Mario Pulatti, Paulo Roberto Cecon and Suely de Fátima Ramos Silveira.

Objectives were the determination of water and nitrogen level combinations for the carrot cultivars Brasilia and Nantes cultivated in summer and winter, respectively, that would allow a productivity with a maximum net revenue, and the estimation of .the crop culture (Kc) under a reasonable irrigation management in the Alto Paranaiba region. Two experiments with a completely randomized block design and a 5x5 factorial scheme, with three replications, were established at the Estação Experimental Rio Paranaiba da Cooperativa Agropecuária do Alto Paranaiba-COOPADAP (Experimental Station Rio Paranaiba of Agriculture and Animal Husbandry in Alto Paranaiba), State of Mians Gerais, Brazil. The treatments consisted in combinations of five total water depths and five nitrogen doses. Five levels of total water depth were used in the first experiment with the cultivar Brasilia (W_1 = 397.67mm; W_2 = 409.85mm; W_3 = 431.83mm; W_4 = 445.54mm; and W_5 = 479.81mm), as well as in the second with the cultivar Nantes (W_1 = 311.45mm; W_2 = 369.94mm; W_3 = 429.64mm; W_4 = 482.31mm; and W_5 = 545.10mm). The five nitrogen doses (N_0 = 0kg ha^{-1}; N_1 = 80kg ha^{-1}; N_2 = 160kg ha^{-1}; N_3 = 240kg ha^{-1}; and N_4 = 320kg ha^{-1}) were distribuido a lanço ; 40% applied at sowing, and 30 % each, in top dressing, 30 and 50 days after sowing. The cultivar Brasilia was sown on January 9, and Nantes on May 6. Basic fertilization consisted of 220kg K_2O ha^{-1}, in the form of potassium chloride, 15 days before sowing, and 66kg ha^{-1}, in top dressing, 20 and 40 days after sowing, and 2.222kg P_2O_5 ha^{-1}, in the form of simple superphosphate, together with the potassium

chlora/ite at sowing. 3t of dolomitic lime per hectare were incorporated 3 months before the summer sowing. The irrigations were applied following the watering turn of 1 day from sowing until thinning, of two days from thinning until the end of stage I, and of three days from the end of stage one until the harvest. The crop coefficient (Kc) was estimated according to the FAO Bulletin 56; Kc is divided in the soil vaporization coefficient (Ke) and the basal crop coefficient (Kcb). The variance and regression analysis showed that the regression equations adjusted to the yield data of commercial roots as dependent variable, and for total applied water depths and nitrogen doses as independent variables, presented significant regression coefficients at a level of 1 % of probability by the t test and the determination coefficients (R^2) of 0.8684 and 0.8689 for the cultivars Brasilia and Nantes, respectively. For the cultivar Brasilia, the highest estimated economical productivity was 40.94 t ha^{-1}, obtained by a total water depth of 443.17mm and a nitrogen dose of 170.49 kg of N ha^{-1}, spawning a net revenue of R$ 19’941.81 ha^{-1} in the month of May 2002; while the highest estimated economical productivity was 57.90 t ha^{-1} for the cultivar Nantes, obtained by a water depth 434.75mm and 171.56kg of N ha^{-1}, with a net revenue of R$ 6,539.63 ha^{-1} for the month of September 2002, considering the prices of the factors (water and nitrogen), as well as of the product (carrot). The adjusted crop coefficients (Kc) were: initial stage = 1.07 and 1.07; stage I = 1.14 and 1.13; and stage II = 1.10 and 1.09, for the cultivars Brasilia and Nantes, respectively.

1. INTRODUÇÃO

No manejo racional de sistema de irrigação, devem ser maximizadas a produtividade e a eficiência do uso da água e minimizados os custos, quer de mão-de-obra quer de capital, para que sejam obtidos produtos de boa qualidade, de forma a tornar lucrativa a utilização da irrigação, com menor impacto possível no ambiente.

Nas últimas décadas, ocorreu aumento expressivo da área irrigada no Brasil, a pesar de a irrigação ainda não estar sendo praticada com a eficácia exigida. Ademais, a competição por água, cada vez maior entre os diferentes usuários, como indústria, abastecimento para consumo humano e agricultura, associada aos movimentos ecológicos que conscientizam a população sobre a importância de um meio ambiente mais saudável e menos poluído, implica em pressões para que a irrigação seja conduzida de modo a causar o mínimo impacto possível ao meio ambiente, tanto quanto à disponibilidade e qualidade da água para as múltiplas atividades (BERNARDO, 1998).

Um dos principais problemas que ocorrem na agricultura é a baixa eficiência com que são utilizados os recursos disponíveis. Uma produção eficiente e rentável deve constituir um dos principais objetivos da empresa agrícola. Para atingir esse fim devem-se utilizar racionalmente os fatores de

produção, de modo a atingir os mais altos níveis de produtividade econômica (FRIZZONE, 1998).

A água e a adubação constituem, entre os fatores que complementam a produção agrícola, os que limitam mais intensamente a produtividade, assumindo-se um bom material genético e um controle fitossanitário satisfatório. Assim, na agricultura irrigada, o fator água deve ser otimizado, possibilitando, sem maiores riscos, a maximização do uso dos demais insumos de produção e, por conseqüência, a obtenção de maiores produtividades, com melhor combinação dos insumos empregados. Para tanto, o conhecimento das funções de produção ou superfícies de resposta é fundamental para auxiliar nas decisões, haja vista que estas funções possibilitam determinar as interações entre os fatores que interferem na produtividade e adotar as soluções mais condizentes com a realidade regional, permitindo, assim, o manejo racional da irrigação em bases técnicas e economicamente viáveis (BERNARDO, 1998).

O manejo da água na agricultura irrigada deve ser adequado para cada espécie vegetal, sendo importante, conhecer alguns parâmetros básicos a respeito da necessidade de água das culturas, que dependem das condições edafoclimáticas da região em estudo. Segundo JENSEN et al. (1990), a utilização de equações para o cálculo direto da evapotranspiração para várias culturas e estádios de crescimento, por exemplo, para programação contínua da irrigação, embora teoricamente possível, não é realizada na prática. O uso correto dessas equações requereria medições de todos os parâmetros sobre cada cultura ou grupo de culturas envolvidas. Assim, JENSEN et al. (1990) e ALLEN et al. (1998) recomendam a utilização da aproximação proposta por van Wijk e de Vries, na qual a evapotranspiração da cultura (ETc) é estimada com o uso do coeficiente de cultura (Kc) multiplicado pela evapotranspiração de referência (ETo).

Em geral, as hortaliças são espécies vegetais de ciclo curto, cujo desenvolvimento é intensamente influenciado pelas condições de umidade do solo. A deficiência de água no solo é, usualmente, o fator mais limitante para a obtenção de produtividade elevada e de produtos de boa qualidade. Assim, a reposição de água ao solo, por meio da irrigação, na quantidade adequada e no

momento oportuno, é decisiva para o sucesso da produção de hortaliças (MAROUELLI e SILVA, 1998).

A cenoura é importante olerícola, muito apreciada na culinária brasileira, estando classificada entre as dez espécies de hortaliças mais cultivadas. A parte comercial da planta é a raiz tuberosa, com o formato variável entre cônico e cilíndrico, com coloração de alaranjada intensa (devido ao teor de -caroteno) a púrpura (devido ao teor de antocianina). A origem da planta remonta aos continentes europeu e asiático, e é utilizada pelo homem há mais de dois mil anos. Além de -caroteno e de carboidratos é uma rica fonte de cálcio e vitamina A, de fácil digestão e baixo teor de calorias.

De acordo com LANA e VIEIRA (2000) a cenoura está entre as hortaliças de maior importância econômica no Brasil. Em 1998, a área plantada foi de aproximadamente 23 mil hectares, alcançando valores da ordem de US$ 545 milhões, que correspondem a 0,2% do Produto Interno Bruto (PIB) agrícola nacional. No Estado de Minas Gerais, os maiores produtores de cenoura são os municípios de São Gotardo, Carandaí e Maria da Fé.

Além da água, outro fator que limita a produtividade e qualidade das raízes de cenoura é a nutrição mineral, uma vez que se trata de uma cultura bastante exigente em nutrientes no solo. Pesquisas envolvendo a relação de fatores como lâmina de água, fertilizante e produção de uma cultura, apontam recomendações com vistas à produtividade física máxima, geralmente não levando em conta os aspectos econômicos, os quais devem ser considerados, já que o ótimo econômico quase sempre não corresponde à máxima produtividade física.

Na região do Alto Paranaíba, MG, cultivam-se aproximadamente cinco mil hectares de cenoura por ano, além de outras olerícolas (COOPADAP – informação pessoal, 2002). Portanto, são necessários estudos visando à otimização do uso dos recursos hídricos, associados às funções de produção de culturas, que forneçam parâmetros, para a adoção de práticas adequadas de manejo e políticas de gestão de recursos hídricos, que são importantes para manutenção e ampliação da produção agrícola irrigada e conservação dos

recursos naturais. Tais estudos, certamente, são necessários e fornecerão aos produtores parâmetros científicos para tomada de decisão.

Por essas razões, os objetivos deste trabalho foram: estudar o efeito de diferentes lâminas de irrigação e doses de nitrogênio sobre a produtividade da cultura da cenoura, nas condições edafoclimáticas da região do Alto Paranaíba; definir estratégias ótimas de irrigação, considerando a água e a terra como fatores limitantes da produção e na determinação de diferentes valores para o preço do produto; e estimar os coeficientes de cultura (Kc) que permitam manejo racional da irrigação na região.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Cultura da cenoura

A cenoura (*Daucus carota* L.) é uma olerácea introduzida no Brasil, vinda da Europa (França e Holanda) e da Ásia (Japão). Cultiva-se, atualmente, além das cultivares originárias dos grupos Nantes (Nantes, Forto, Nantesa etc.) e Kuroda (Kuroda, Nova Kuroda, Kuronan etc.), cultivares do grupo Brasília (Brasília, Tropical, Nova Carandaí e Alvorada), obtidas de populações de cenoura mais antigas, coletadas no sul do País. Estas, além de apresentarem bom formato e coloração de raiz, são produtivas e bem adaptadas ao cultivo de verão (VIEIRA et al., 1999).

A cenoura é uma raiz pivotante, tuberosa, lisa e quase livre de ramificações na parte superior; porém, fina, comprida e bem dotada de raízes laterais, na parte inferior. Dependendo da cultivar, a raiz tuberosa pode ser globular ou alongada, cônica ou cilíndrica e de cor amarela, vermelho-alaranjada ou púrpura. No Ocidente, as cultivares mais populares têm raiz alongada e a coloração vermelho-alaranjada.

Na fase vegetativa, o caule é quase imperceptível, constituído pelo ponto de inserção das folhas, na parte superior da raiz. As folhas apresentam pecíolo

longo e fino e limbo de contorno geral triangular, imparipenado e composto de folíolos finamente recortados (tripnatisecta). Em pleno desenvolvimento vegetativo, a planta apresenta um tufo de folhas em posição aproximadamente vertical, alcançando de 30 a 50 cm de altura.

A passagem da fase vegetativa para a fase reprodutiva depende da cultivar. As cultivares bianuais de origem européia têm o seu florescimento induzido por temperaturas do ar menores que 15ºC, sendo as mais cultivadas no Brasil. As cultivares anuais de origem asiática florescem por influência do fotoperíodo longo. A planta emite uma haste floral de até 0,80 m de altura, com grande número de ramificações, em cujas extremidades se localizam as inflorescências do tipo umbela, com flores hermafroditas ou flores masculinas junto com hermafroditas (PÁDUA et al., 1984).

A temperatura do ar é o elemento climático mais importante para a produção de raízes. Temperaturas do ar entre 10 e 15ºC favorecem o alongamento das raízes e o desenvolvimento de coloração característica, ao passo que temperaturas superiores a 21ºC estimulam a formação de raízes curtas e de coloração deficiente. No entanto, existem cultivares que formam boas raízes, na faixa de temperaturas compreendidas entre 18 e 25ºC. Acima de 30ºC, a planta tem o ciclo vegetativo reduzido, o que afeta o desenvolvimento das raízes e a produtividade. A faixa ideal para a germinação rápida e uniforme é de 20 a 30ºC, na qual a emergência ocorre entre 7 e 10 dias após a semeadura (VIEIRA et al., 1999).

A umidade relativa do ar (UR) elevada favorece o desenvolvimento da cultura, principalmente no estádio inicial. Por outro lado, a UR elevada associada à temperatura do ar alta propicia o desenvolvimento de doenças na folhagem, causadas principalmente por *Alternaria dauci*, *Cercospora carotae* e pela bactéria *Xanthomonas campestris* pv. *carotae* (queima-das-folhas), constituindo-se o principal problema fitossanitário da cultura no período de verão.

O fotoperíodo interfere na qualidade das raízes, principalmente no teor de caroteno. Whitaker, citado por PÁDUA et al. (1984), observou que, em fotoperíodos de 9 a 14 horas, o teor de caroteno foi maior que em fotoperíodo de 7 horas.

A preferência do consumidor brasileiro é por raízes de cenoura bem desenvolvidas, cilíndricas, lisas, sem raízes laterais ou secundárias, uniformes, com comprimento variando entre 15 e 20 cm e com diâmetro de 3 a 4 cm. A coloração deve ser alaranjada intensa, com ausência de ombro (parte superior das raízes) com pigmentação verde ou roxa.

Cada cultivar tem características próprias quanto ao formato das raízes e resistência às doenças, dependendo da época de plantio. Assim, pode-se produzir cenoura durante o ano todo numa determinada região, desde que se plante a cultivar apropriada para a condição de clima predominante.

A cultivar Nantes, de origem francesa, é considerado padrão comercial de raízes de cenoura no Brasil, devido à preferência por raízes de formato cilíndricas, lisas e de coloração alaranjada intensa. Todavia, por ser muito susceptível ao ataque de doenças que ocorrem na folhagem (queima-das-folhas), não é recomendável o seu cultivo durante a estação chuvosa e quente. Por causa da exigência de temperatura do ar mais amena, é recomendado o seu cultivo em época fria (outono/inverno), podendo ser colhida de 90 a 110 dias após a semeadura.

A cultivar Brasília, devido à sua resistência às doenças da folhagem (queima-das-folhas), sendo indicada para o cultivo de verão, alterou o cenário da cultura no País e, hoje, ocupa 95% dos plantios de verão no Brasil. Adaptada às condições de todas as regiões produtoras, pode ser cultivada, durante o ano todo, em regiões onde a temperatura do ar varie de amena para quente. A colheita pode ser efetuada de 85 a 100 dias após a semeadura (VIEIRA et al., 1999).

No grupo de hortaliças cujas partes comestíveis são as raízes, a cenoura está entre as de maior importância econômica no Brasil. A estimativa de área plantada em 2002 foi da ordem de 28 mil hectares, com produção de 750 mil toneladas de raízes (SILVA et al., 2003). Os municípios maiores produtores são: Carandaí, Maria da Fé e São Gotardo (Minas Gerais); Piedade, Ibiúna e Mogi das Cruzes (São Paulo); Ponta Grossa (Paraná) e Irecê (Bahia). Embora a produção seja melhor em áreas de clima ameno, nos últimos anos, devido ao desenvolvimento de cultivares tolerantes ao calor e com resistência às principais doenças de folhagem da cultura, o cultivo de cenoura vem se expandindo

também nos estados da Bahia, Pernambuco e no Distrito Federal (VIEIRA et al., 1999).

A cenoura destaca-se por seu valor nutritivo, sendo uma das principais fontes de pró-vitamina A (-caroteno), com 132 UI g^{-1}. Além do consumo *in natura*, é utilizada como matéria-prima por indústrias processadoras de alimentos, que a comercializam na forma de seleta de legumes, alimentos infantis e sopas instantâneas (VIEIRA et al., 1999).

2.2. Função de produção

A produção das culturas agrícolas é determinada por vários fatores referentes ao solo, à planta e à atmosfera que interagem entre si. Existe uma relação funcional entre esses fatores e a produção das culturas, característica de cada condição ambiental. A produção das culturas (Y) requer grande quantidade de insumos ou fatores de produção (Xi), tais como: água, fertilizantes, defensivos, herbicidas, sementes, máquinas, implementos agrícolas e disponibilidade de mão-de-obra durante todo o ciclo da cultura. A produção será determinada pela proporção de insumos (HEXEM e HEADY, 1978; DILLON, 1977).

Segundo FERGUSON (1988) a função de produção pode ser representada por uma função matemática, que exprime uma relação técnica entre um conjunto específico de fatores envolvidos num processo produtivo e a produção física possível de se obter com a tecnologia disponível, por unidade de tempo, e pode ser expressa como:

$$Y = f(X_1, X_2, ..., X_n) \quad (1)$$

As funções de produção água-cultura são particularmente importantes para as análises de produção agrícola quando a água é escassa ou de alto custo. Para o

processo de planejamento, essas funções constituem-se o elemento básico de decisão dos planos de desenvolvimento e, relativamente à operação de projetos de irrigação, permitem tomar decisões sobre planos ótimos de cultivo e ocupação de área para produção econômica com base na água disponível (FRIZZONE, 1998).

As aplicações das funções de produção água-cultura são freqüentemente criticadas por serem empíricas, específicas de um local e incompletas, omitindo efeitos de muitos outros fatores e suas interações com a água. Entretanto, conforme salientam VAUX e PRUITT (1983) e HOWELL et al. (1992), as funções de produção são necessárias para prever, sob condições dadas de clima, cultivo e operação, as produtividades físicas marginais da água a serem utilizadas nas análises econômicas.

Em geral, os resultados experimentais obtidos em campo conduzem a um grande número de tipos de funções Y = Y (W), com traçados gráficos muito diferentes. O trabalho de HEXEM e HEADY (1978) representa importante contribuição para os estudos empíricos de funções de produção água-cultura. Apresenta uma compreensiva revisão sobre teoria econômica aplicada a essas funções e técnicas estatísticas comumente utilizadas para estimá-las. Os autores concluíram que as funções polinomiais são mais adequadas para expressar analiticamente as relações água aplicada-produtividade, inclusive superando os bons resultados proporcionados pela equação de Mitscherlich.

Segundo BERNARDO (1998), a forma clássica de função de resposta limita-se a selecionar, por meio de regressão, um tipo de curva ajustada aos dados obtidos em experimentos de campo. A adoção de tais aproximações empíricas, mesmo oferecendo escassas possibilidades de explicar a natureza das relações que regulam o processo, justifica-se pela necessidade de encontrar indicadores de caráter agroeconômico, sem a necessidade de recorrer a modelos complexos de difícil operacionalidade. Nesse aspecto as funções de resposta são de grande importância teórica e prática.

Para FRIZZONE (1998) pode-se afirmar que, num determinado ambiente e para determinada espécie vegetal cultivada, não existe uma única curva que relacione produtividade-lâmina total de água aplicada. A natureza dessa relação está determinada não só pela espécie vegetal como também pela

cultivar, pela idade da planta e pelas condições climáticas e edáficas. Entretanto, com base em experimentos de campo, repetidos por vários anos, nos quais se fixam as outras variáveis que possam causar efeitos, obtém-se funções que representam produtividade média em função de quantidade estacional de água aplicada, sendo geralmente válidas para as condições edafoclimáticas em que foram obtidas.

Segundo HARGREAVES e SAMANI (1984), a relação lâmina total de água aplicada-produtividade pode ser considerada linear até aproximadamente 50% da quantidade de água que proporciona produtividade máxima. Para maiores quantidades de água, os acréscimos na produção são progressivamente menores, refletindo as várias perdas de água que ocorrem próximo da condição de máxima produtividade física, com irrigação sem déficit hídrico. Portanto, a irrigação é menos eficiente quanto maior for à quantidade de água aplicada próximo dessa condição. O declínio na eficiência está relacionado com o valor da lâmina de água e freqüência de irrigação, com as características da cultura e do solo e com as condições climáticas.

BUCKS e HUNSAKER (1987) comentam que a redução da produtividade da cultura por excesso de água está associada à falta de aeração do solo, lixiviação de nutrientes e a doenças que se desenvolvem em solo úmido.

OLIVEIRA (1993) comenta que muitos trabalhos de pesquisa, envolvendo irrigação e fertilizantes, apontam recomendações genéricas que objetivam a obtenção de produtividades físicas máximas, sem qualquer preocupação com aspectos econômicos. A utilização da irrigação, com base nessas informações, poderá torná-la inviável do ponto de vista econômico, já que o ótimo econômico geralmente não corresponde à produtividade física máxima.

As funções de produção são bastante difundidas, sendo muito empregadas para determinar os níveis ótimos econômicos dos fatores de produção (LANZER e PARIS, 1980).

Os modelos matemáticos que descrevem uma função de produção, mais comumente utilizados nas análises econômicas das pesquisas agrícolas, são: quadrático, raiz quadrada, Mitscherhich e o potência 3/2 (HEXEM e HEADY, 1978). Entretanto, o modelo polinomial quadrático, utilizado por vários

pesquisadores, como MARTINS, 1998; CARVALHO 1994; OLIVEIRA, 1993; FRIZZONE, 1987; TARSITANO e HOFFMANN, 1985, na maioria das vezes, foi o que melhor representou a estimativa de produção, permitindo uma análise que define as quantidades dos fatores de máxima eficiência econômica com o uso da produtividade máxima ou da receita líquida máxima.

Dos fatores de produção, a água e os fertilizantes são aqueles que limitam a produtividade das culturas com maior freqüência. Desse modo, o controle da irrigação e da fertilidade do solo constitui-se o critério preponderante para o êxito da agricultura. A utilização das funções de resposta permite encontrar soluções úteis na otimização do uso da água e dos fertilizantes na agricultura ou na previsão da produtividade das culturas (FRIZZONE, 1998).

DILLON (1977), após análise sobre a teoria neoclássica da função de produção para as culturas agrícolas, estabeleceu que: (a) existe uma relação contínua, única e uniforme entre o fator de produção (X_1) e a produção (Y), considerando os outros fatores fixos; e (b) prevalecem retornos decrescentes para X. De acordo com essa assertiva, à medida que se empregam mais quantidades de um insumo variável, enquanto a de outros insumos permanece constante, a quantidade adicional da produção total obtida é cada vez menor. As suposições anteriores garantem que as derivadas de primeira e segunda ordem da equação 1 existem.

Dada a forma algébrica $Y = f(X_1/ X_2,..., X_n)$, em que X_1 é o insumo variável, $X_2...X_n$ são os insumos fixos, pode-se derivar três quantidades de interesse: (a) produção total; (b) produto físico médio de X_1 ($PFMe_1$); e (c) produto físico marginal de X_1 ($PFMg_1$).

Essas três medidas são quantidades físicas e têm a característica comum de relacionarem de forma diferente, insumos e produção, isto é, relação fator-produto.

A produção total é a quantidade de produto que se obtém da utilização do fator variável, mantendo-se fixa a quantidade dos demais fatores.

2.2.1. Produto físico médio

O produto físico médio é definido como a relação entre a produção total e a quantidade de insumo variável utilizado ou, simplesmente, a produção média por unidade de insumo variável utilizado, assim:

$$PFMe = \frac{\hat{Y}}{X_1} \tag{2}$$

2.2.2. Produto físico marginal

O produto físico marginal de um insumo é a adição à produção total devida à utilização de uma unidade adicional do insumo, mantendo-se constante a quantidade dos demais insumos, de modo que constitui a inclinação da função de produção, sendo:

$$PFMg = \frac{dY}{dX_1} \tag{3}$$

2.2.3. Produção máxima física

Para obtenção da produção máxima física, quando se tem um fator variável, são necessárias duas condições, ou seja, a derivada primeira deve ser igualar a zero e a segunda derivada deve ser negativa, assim:

$$\frac{dY}{dX_1} = 0 \tag{4}$$

$$\frac{d^2Y}{d^2X_1} < 0 \qquad (5)$$

O produto físico marginal do fator X_1 deve igualar-se a zero para obtermos a produtividade máxima física.

A função de produção com dois fatores variáveis é representada graficamente por uma superfície de resposta em três dimensões. Nestas circunstâncias, utilizam-se as derivadas parciais para definir as condições para obtenção da produção máxima física. Assim, as seguintes condições devem ser satisfeitas:

$$Y = f(X_1, X_2 / X_3, ..., X_n) \qquad (6)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial X_1} = 0 \qquad \text{e} \qquad \frac{\partial Y}{\partial X_2} = 0 \qquad (7)$$

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial^2 X_1} < 0 \qquad e \qquad \frac{\partial^2 Y}{\partial^2 X_2} < 0 \qquad (8)$$

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial^2 Y}{\partial^2 X_1} & \frac{\partial^2 Y}{\partial X_1, \partial X_2} \\ \frac{\partial^2 Y}{\partial X_2, \partial X_1} & \frac{\partial^2 Y}{\partial^2 X_2} \end{vmatrix} > 0 \qquad (9)$$

Quando se estuda o efeito combinado de dois fatores de produção, por exemplo, água e nitrogênio na produtividade da cultura, utiliza-se a metodologia de superfície de resposta para escolha do modelo. Sendo o modelo escolhido a superfície de resposta de segunda ordem da forma:

$$\hat{Y} = f(W, N) = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 W + \hat{\beta}_2 N + \hat{\beta}_{11} W^2 + \hat{\beta}_{22} N^2 \qquad (10)$$

em que,

$\hat{Y}$ = produtividade estimada da cultura, t ha^{-1};

$\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_{11}$ e $\hat{\beta}_{22}$ = parâmetros estimados da regressão, admensional;

W = lâmina total de água aplicada, mm; e

N = dose de nitrogênio, kg ha^{-1};

Neste caso, a lâmina total de água a ser aplicada e a dose de nitrogênio para obtenção da produtividade máxima física é obtida fazendo as derivadas parciais de primeira ordem da equação 10 e igualando a zero, sendo que as derivadas parciais de segunda ordem devem ser negativas e o determinante positivo para que se tenha um ponto de máximo, e são dadas por:

$$W_{max} = -\frac{\beta_1}{2\beta_{11}} \quad (11)$$

$$N_{max} = -\frac{\beta_2}{2\beta_{22}} \quad (12)$$

2.2.4. Produção máxima econômica

Os níveis de água e nitrogênio de maior retorno econômico devem corresponder a uma produtividade que traduza uma receita líquida máxima (RL) ou um lucro máximo.

Considerando a condição simplificadora, que a soma dos custos fixos (C_F) e dos custos indiretamente dependentes da quantidade de água aplicada e doses de nitrogênio (C_0) são constantes (C), conforme sugerido por HART et al. (1980), ENGLISH (1990) e FRIZZONE (1998), pode-se expressar a função de custo total de produção (C_T) na forma linear:

$$C_T = C + P_W W + P_N N \quad (13)$$

em que,

P_Y = preço do produto, R$ t^{-1};

P_W = preço do fator água, R$ mm^{-1} ha^{-1};

P_N = preço do fator nitrogênio, R$ kg^{-1}; e

C = custo dos fatores fixos para produção da cultura, R$ ha^{-1}.

Assim, a equação da receita líquida pode ser dada pela equação:

$$RL(W,N) = P_Y Y - P_W W - P_N N - C \quad (14)$$

Maximizando a equação 14, tem-se:

$$\frac{\partial RL}{\partial W} = P_Y \frac{\partial Y}{\partial W} - P_W = 0 \quad (15)$$

$$P_Y \frac{\partial Y}{\partial W} = P_W \quad (16)$$

substituindo a equação 10 na 16, temos:

$$\frac{P_W}{P_Y} = \beta_1 + 2\beta_{11} W \quad (17)$$

$$\frac{\partial RL}{\partial N} = P_Y \frac{\partial Y}{\partial N} - P_N = 0 \quad (18)$$

$$P_Y \frac{\partial Y}{\partial N} = P_N \quad (19)$$

substituindo a equação 10 na 19, temos:

$$\frac{P_N}{P_Y} = \beta_2 + 2\beta_{22} N \quad (20)$$

as expressões 16 e 19 são um axioma da economia: a quantidade ótima de insumo corresponde ao ponto em que o valor do produto marginal do insumo se iguala ao preço do insumo. Ainda, para ser um ponto de máximo às derivadas parciais de segunda ordem deve ser menor do que zero e o determinante deve ser positivo.

Da solução das equações 17 e 20 obtém-se respectivamente, a lâmina de irrigação e a dose de nitrogênio com maior retorno econômico.

2.2.5. Relação fator-fator

Se for conhecida a forma algébrica da função de produção com duas variáveis ($Y = f(X_1, X_2)$), pode-se derivar toda a informação disponível das funções de uma variável ($Y = f(X_1)$ e $Y = f(X_2)$). Para obter essas funções de uma variável, basta considerar simplesmente X_2 ou X_1, respectivamente, como fixos a um certo nível.

Além das relações fator-produto ($Y = f(X_1)$ e $Y = f(X_2)$), quando se tem dois insumos variáveis, pode-se tratar do domínio das relações fator-fator, estas consistem em: (a) família de equações das isoquantas; e (b) taxa marginal de substituição técnica de X_i por X_j, designada por $TMST_{ij}$.

As equações da isoquantas são os lugares geométricos das combinações de insumos que rendem um nível fixo de produto. Essas equações são obtidas reordenando a superfície de resposta de tal modo que um insumo pode se expressar como uma função do outro, considerando fixa a produção Y. Assim, se Y* denota um nível fixo de Y, a função da isoquanta para a produção Y* é:

$$X_1 = f(X_2; Y^*) \tag{21}$$

Para vários níveis de Y, esta função gera uma família de equações de isoquantas. Evidentemente, a forma e localização das isoquantas dependem da forma da função de produção.

A taxa marginal de substituição técnica de X_1 por X_2 é dada pela inclinação da reta tangente à curva da isoquanta. Algebricamente, em qualquer ponto de uma isoquanta tem-se:

$$TMST_{12} = -\frac{dX_1}{dX_2}, \qquad Y = Y^* \tag{22}$$

$$TMST_{12} = \frac{1}{TMST_{21}} \quad (23)$$

A taxa marginal de substituição técnica de X_1 por X_2 ($TMST_{12}$) indica a taxa na qual deverá ser o acréscimo de utilização de X_1, que compense o decréscimo de utilização de X_2, de tal forma que se mantenha a quantidade produzida do produto.

Para o caso em que os fatores variáveis são lâmina total de água aplicada e dose de nitrogênio, algebricamente, em qualquer ponto de uma isoquanta tem-se:

$$TMST_{W/N} = -\frac{dW}{dN} = \frac{PFMg_N}{PFMg_W} \quad (24)$$

em que,

$PFMg_N$ = produto físico marginal do fator nitrogênio, t kg^{-1}; e

$PFMg_W$ = produto físico marginal do fator água, t mm^{-1}.

2.2.6. Estratégias de irrigação

2.2.6.1. Sob restrição de terra

Segundo ENGLISH (1990) e FRIZZONE (1998), sendo a disponibilidade de terra o único fator limitante da produção, 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 receita bruta e de custos.

Considerando a água como o único fator variável, a função de produção da cultura é uma função polinomial de segundo grau, da forma:

$$\hat{Y}(W) = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 W + \hat{\beta}_2 W^2 \quad (25)$$

Assumindo, como condição simplificadora, conforme sugerido por HART et al. (1980), ENGLISH (1990) e FRIZZONE (1998), pode-se expressar a função de custo total de produção (C_T) na forma linear:

$$C_T = C + P_W W \quad (26)$$

e a função de receita líquida da unidade técnica como:

$$RL = A\left[Y(W)P_Y - (C + P_W W)\right] \quad (27)$$

em que,

A = área irrigada, ha;

Assim, a seguinte função Lagrange pode ser escrita:

$$L(A, W, \lambda) = A\left[Y(W)Py - C - WPw\right] - \lambda(A - A_d) \quad (28)$$

em que,

A_d = área disponível para cultivo, ha; e

= multiplicador de Lagrange.

Obtendo-se as derivadas parciais da equação 43 em relação a A, W e , e igualando a zero, tem-se:

$$\frac{\partial L}{\partial W} = A\left[P_Y \frac{dY}{dW} - P_W\right] = 0 \quad (29)$$

$$\frac{\partial L}{\partial A} = P_Y\, Y(W) - C - P_W\, W - \lambda = 0 \tag{30}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = -A + A_d = 0 \tag{31}$$

Da equação 29 obtém-se:

$$P_Y \frac{dY}{dW} = P_W \tag{32}$$

Utilizando a equação 25 e substituindo sua derivada na equação 32 resulta:

$$\beta_1 + 2\beta_2 W = \frac{P_W}{P_Y} \tag{33}$$

$$W_t^* = \frac{P_W - P_Y\beta_1}{2P_Y\beta_2} \tag{34}$$

em que,

W_t^* = lâmina total de água ótima tendo a terra como fator limitante da produção, mm.

A W_t^* é o ponto em que o valor do produto marginal se iguala ao custo marginal, isto é, corresponde à lâmina que proporciona a máxima renda líquida por unidade de área, para um dado preço de produto e um dado preço da água.

Devido à da grande variação e difícil previsão da função de produção das culturas e em razão da variação do clima, das características físico-hídricas do solo, da uniformidade de distribuição de água pelo sistema de irrigação e de muitos outros fatores, torna-se difícil prever quanto de água é armazenada em disponibilidade na zona radicular. Somando essas incertezas com a variabilidade de resposta da cultura ao uso de fertilizantes, às condições fitossanitárias e de

manejo do solo, a produção real das culturas para um determinado nível de água aplicada é praticamente imprevisível.

O risco econômico aumenta na razão direta da incerteza quanto à quantidade produzida. No entanto, utilizando estratégias de irrigação, o risco poderá ser minimizado. Este é o problema essencial em irrigação, uma vez que não se pode conhecer com precisão a forma da curva de produção em função da água aplicada, não é possível determinar, com certeza, o nível de água que maximiza a renda líquida. Além disso, a quantidade ótima de água representa apenas um ponto sobre a curva de produção, tendo pouco significado prático. Entretanto, pode ser definido um intervalo entre a lâmina total de água que proporciona a produção máxima física (W_{max}) e a lâmina total de água equivalente (W_{te}) que proporciona uma renda líquida igual a W_{max}. No intervalo entre W_{max} e W_{te}, a irrigação com déficit deverá ser mais rentável do que a irrigação sem déficit (FRIZZONE, 1998).

De acordo com a equação 14 tem-se:

$$RL(W_{max}) = P_Y Y(W_{max}) - P_W W_{max} - C \quad (35)$$

$$RL(W_{te}) = P_Y Y(W_{te}) - P_W W_{te} - C \quad (36)$$

A W_{te} é encontrada para $RL(W_{max}) = RL(W_{te})$, então:

$$W_{te} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (37)$$

sendo,

$$a = P_Y \beta_2$$

$$b = P_Y \beta_1 - P_W$$

$$c = \frac{P_Y \beta_1^2}{4\beta_2} - \frac{P_W \beta_1}{2\beta_2}$$

em que,

W_{te} = lâmina total de água equivalente tendo a terra como fator limitante de produção, mm.

2.2.6.2. Sob restrição de água

A disponibilidade de água, freqüentemente, constitui um fator limitante à produção. Neste caso a água economizada pela irrigação com déficit pode ser utilizada para irrigar uma quantidade adicional de terra, possibilitando o aumento da receita líquida. Segundo os pesquisadores ENGLISH (1990) e FRIZZONE (1998) o objetivo é encontrar o nível de água que maximiza a receita líquida, por unidade de volume de água. Assim, a função Lagrange pode ser assim formulada:

$$L(A,W,\lambda) = A\left[P_Y\, Y(W) - P_W\, W - C\right] - \lambda(AW - W_d) \tag{38}$$

Para a condição ótima tem-se:

$$\frac{\partial L}{\partial A} = P_Y\, Y(W) - P_W\, W - C - l\, W = 0 \tag{39}$$

$$\frac{\partial L}{\partial W} = A\left(P_Y \frac{dY}{dW} - P_W\right) - \lambda A = 0 \tag{40}$$

$$\frac{\partial L}{\partial l} = -AW + W_d = 0 \tag{41}$$

em que,

W_d = volume de água disponível, m^3.

Explicitando-se da equação 40 e substituindo na equação 39, tem-se:

$$P_Y\ Y(W) - P_W\ W - C - \left(P_Y \frac{dY}{dW} - P_W \right) W = 0$$

$$P_Y \left(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 W + \hat{\beta}_2 W^2 \right) - P_Y W - C - P_Y\ \hat{\beta}_1\ W - P_Y\ 2\hat{\beta}_2\ W^2 + P_W\ W = 0$$

$$W_w^* = \sqrt{\frac{P_Y \hat{\beta}_0 - C}{P_Y \hat{\beta}_2}} \tag{42}$$

em que,

W_w^* = lâmina total de água ótima sendo a água o fator limitante da produção, mm.

Sendo a água o fator limitante, a área irrigada com a cultura (A) é uma função da lâmina total de água aplicada (W), isto é:

$$A = \frac{W_t}{W} \tag{43}$$

em que,

W_t = quantidade total de água disponível, mm.

Para obter a lâmina de água total equivalente (W_{we}), menor do que W_w^*, que produz uma receita líquida equivalente àquela obtida pelo nível W_{max}, utilizam-se as seguintes equações:

$$RL(W_{max}) = A[P_Y\ Y(W_{max}) - P_W\ W_{max} - C]$$

$$RL(W_{we}) = A[P_Y\ Y(W_{we}) - P_W W_{we} - C]$$

para $RL(W_{max}) = RL(W_{we})$, obtém-se o valor de W_{we} pela expressão:

$$W_{we} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (44)$$

sendo,

$$a = P_Y \hat{\beta}_2$$

$$b = \frac{4P_Y \hat{\beta}_o \hat{\beta}_2 + P_Y \hat{\beta}_1^2 - 4\hat{\beta}_2 C}{2\hat{\beta}_1}$$

$$c = P_Y \hat{\beta}_0 - C$$

em que,

W_{we} = lâmina total de água equivalente sendo a água como fator limitante de produção, mm.

2.2.7. Função de resposta múltipla

Quando a produção total da cultura é dividida e classificada, e sendo impossível quantificar os insumos utilizados entre as distintas respostas, nesses casos de acordo com DILLON (1977), pode-se considerar que ocorram várias respostas simultâneas, e cada uma pode ser expressa como uma função de produção:

$$Y_i = f_j(X_1, X_2) \quad j = 1,2,3 \quad (45)$$

em que,

Y_i = produtividade da cultura para as três classificações, t ha^{-1}, i = 1, 2, 3; e

f_j = função de resposta da cultura para as três classificações.

Sendo os fatores de produção variáveis lâmina de água e dose de nitrogênio, a quantidade desses insumos a serem aplicados para obtenção da máxima produtividade física é obtida fazendo-se a primeira derivada das três equações de Y_i iguais a zero, e resolvendo para que satisfaça o sistema de equações, sendo dada por:

$$\frac{dY_i}{dX_i} = 0 \tag{46}$$

Os níveis de água e nitrogênio de maior retorno econômico devem corresponder a uma produtividade que traduza uma receita líquida máxima (RL) dada pela equação:

$$RL(X_i) = P_{Y_i} Y_i - P_{X_i} X_i - C \tag{47}$$

A condição de produtividade máxima econômica requer a solução simultânea do conjunto de três equações que participam da produção total, igualando-as a zero. Sendo:

$$\sum P_{Y_i} \left(\frac{\partial Y_i}{\partial X_i} \right) - P_{X_i} = 0 \tag{48}$$

2.2.8. Experimentos utilizando função de produção

LIU et al. (2002), obtiveram dados numa pesquisa de campo realizada com a cultura de milho (*Zea mays* L.) no planalto de Loess na província de Shaanxi, China, cujos tratamentos incluíram nove níveis de lâminas de água de irrigação por sulco, com três repetições, sendo as práticas culturais e os níveis de nutrientes no solo considerados ótimos em todos os tratamentos. Mediram também a umidade do solo a uma profundidade de 3,0m em todos os tratamentos, utilizando-se o método de sonda de nêutrons para estimar a evapotranspiração sazonal. Determinaram as inter-relações dinâmicas da produtividade da cultura (Y), evapotranspiração sazonal (ET) e a eficiência de uso da água (EUA), com base numa função de produção em que a variável independente foi a evapotranspiração (Função de Produção de Evapotranspiração – FPET). Eles concluíram que quando a FPET é linear, a tendência variável de EUA com ET é diretamente afetada pelo intercepto da função e a elasticidade de produção devida à água é numericamente igual ao fator de resposta de produtividade (Ky) quando ET alcança a ET máxima (ETm). Quando a FPET é quadrática, a ET que maximiza EUA é menor do que a ET para produtividade máxima (Ym), e o valor da ET que maximiza EUA é igual à raiz quadrada da relação do intercepto da função com o coeficiente do termo quadrático.

DALVI et al. (1999) utilizaram a metodologia de superfície de resposta para avaliar o efeito dos níveis de irrigação e de fertirrigação, além da freqüência de microirrigação na produtividade do tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Dhanashri). A pesquisa de campo foi conduzida durante o biênio 94-95, na estação central de pesquisa da Universidade Agrícola Dr. Panjabrao Deshmukh, Akola (Índia), com o objetivo principal de promover a otimização para maximizar a produtividade e minimizar o custo. As superfícies de resposta revelaram que o tratamento da irrigação por gotejamento, com turno de rega de dois dias e nível de irrigação correspondente a 79% da evapotranspiração e fertirrigação de 96% da dose indicada, resultou em máxima produtividade do tomate. A economia de água foi em torno de 21% e aumentou a produtividade em até 27%. A pesquisa revelou ainda que o uso de um sistema de gotejamento portátil, transportado mecanicamente, possibilitou irrigar o dobro da área com

turno de rega de dois dias, proporcionando a economia de aproximadamente 50% no investimento inicial quando comparado com o sistema fixo.

AL-JAMAL et al. (2000) realizaram experimento na localidade de Farmington, Novo México, com a cultura de cebola (*Allium cepa* L.) com o objetivo de determinar a função de produção que relaciona a produtividade-evapotranspiração (FPET). A aplicação de água foi realizada por um sistema de irrigação por aspersão, disposto no campo segundo o sistema de aspersão em linha. A FPET determinada foi linear, expressou-se como uma FPET relativa e encontrou-se um fator de resposta de produtividade (Ky) igual a 1,52.

Em outro experimento conduzido em Las Cruces, Novo México, esses autores utilizaram uma linha de gotejamento para determinar uma função de produção relacionando produtividade–lâmina de água total aplicada (FPW) com o objetivo de estimar as exigências de água para a cultura com metas de produtividade selecionadas. Os tratamentos de irrigação foram: 40, 60, 80, 100, e 120% da evapotranspiração da cultura. A FPW encontrada foi curvilínea. Segundo os autores, isso ocorreu devido ao fato de ter sido aplicada água em excesso. A FPW foi corrigida em função da quantidade de água de irrigação percolada e expressou-se a produtividade em função da evapotranspiração (FPET). A produtividade máxima de cebola em Las Cruces, com o sistema de irrigação por gotejamento, foi 20% maior do que o determinado em Farmington, em que se utilizou o sistema de irrigação por aspersão. Embora a produtividade tenha aumentado, a percolação também aumentou e a eficiência de irrigação diminuiu. Os autores comentam que a maior produtividade alcançada pelo sistema de irrigação por gotejamento, comparado ao sistema por aspersão, parece ser devido ao tipo de sistema e ao manejo da irrigação num solo arenoso, mas diferenças de variedades de cebola e condições climáticas dos dois locais podem também ter interferido na produtividade.

KIPKORIR et al. (2002) determinaram as funções de produção relacionando produtividade-lâmina de água total aplicada (FPW) para as culturas de milho (*Zea mays* L.) e cebola (*Allium cepa* L.), utilizando sistema de irrigação por sulcos, num solo argilo siltoso da região semi-árida de Perkerra, Quênia. Devido à drenagem profunda, as funções de produção encontradas foram

polinômios de segundo e terceiro graus. Os valores do fator de resposta de produtividade (Ky), que representam a relação entre déficit de evapotranspiração da cultura e redução de produtividade, foram iguais a 1,21 e 1,28, para as culturas de milho e de cebola, respectivamente. A análise da FPW determinada para o milho para as condições locais e o sistema de irrigação utilizado indica que o manejo da irrigação suplementar por déficit foi mais atraente, sendo mais lucrativo cultivar toda área disponível, embora aumente o risco por causa da dependência da precipitação pluvial. Para a cultura da cebola, a mesma análise indicou que a lâmina total de água aplicada deve estar próxima da produtividade máxima física.

ANDRADE JUNIOR et al. (2001) utilizaram uma função de produção quadrática e uma função de custo linear, obtidas nas condições edafoclimáticas dos Tabuleiros Costeiros do Piauí, com o objetivo de determinar estratégias ótimas de irrigação para a cultura da melancia (*Citrullus lanatus* Thumb. Mansf.), considerando a água como fator limitante da produção e diferentes valores para o preço do produto e da energia elétrica. A irrigação com a lâmina total de água, aplicada abaixo daquela que proporciona a produtividade máxima física, resultou em maiores receitas líquidas, com significativa economia de água, no intervalo de variação de preços do produto de US$0,05 kg^{-1} a US$0,35 kg^{-1}, utilizando três formas de tarifação da energia elétrica. Acima desse intervalo deve-se utilizar a lâmina que maximiza a produção de frutos.

FERREIRA et al. (2001), trabalhando com a cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), objetivaram determinar as lâminas totais de água ótimas para o sistema de irrigação tipo pivô central, por meio da função de produção, que proporcionam produtividade capaz de gerar receita líquida máxima, em duas condições do preço do produto, pago pelo governo e de mercado (R$28,00 e 69,00 a saca de 60 kg, respectivamente) e três condições de preço do fator água (R$0,38, 0,58 e 0,78 mm^{-1} ha^{-1}) na região de Brasília, DF. Os pesquisadores chegaram às seguintes conclusões: a) a melhor condição de receita líquida obtida (R$2.352,40 ha^{-1}) foi alcançada com um valor de comercialização da saca de feijão de R$69,00 e o preço do fator água de R$0,38 mm^{-1} ha^{-1} com uma produtividade de 3.061 kg ha^{-1} e a lâmina de irrigação aplicada de 575 mm; b) a

pior condição de receita líquida (R$38,50 ha^{-1}) foi alcançada com valor de comercialização da saca de feijão de R$28,00 e o preço do fator água de R$ 0,78 mm^{-1} ha^{-1} com uma produtividade de 3.035 kg ha^{-1} e a lâmina de irrigação aplicada de 549 mm; e c) a proposta de se considerar dois valores de comercialização e três valores de custo do fator água proporcionou cenários que demonstram condições de receita líquida razoáveis à limitada no preço mínimo de venda do produto.

QUEIROZ et al. (1996) fizeram estudos para definição de estratégias ótimas de irrigação da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) explorada nas condições edafoclimáticas de Ilha solteira, SP, a partir de funções de produção envolvendo os fatores água e nitrogênio e de funções de custo total, considerando a terra como fator limitante e diferentes relações entre o preço da água e o preço do produto. O estudo mostrou que a aplicação de lâmina total de água entre 200 e 800 mm torna rentável o cultivo. A maior receita líquida (US$510,40 ha^{-1}) foi obtida com o nível de 90 kg ha^{-1} de nitrogênio. Nessa condição, obteve-se um intervalo de manejo racional de água de 400 a 600mm. A relação entre o preço do fator água e o preço do produto menor do que um, é um indicativo da viabilidade econômica da irrigação; quanto menor for essa relação, menor deverá ser o déficit de água no manejo da irrigação.

CALHEIROS et al. (1996) desenvolveram estudos sobre estratégias ótimas de irrigação, examinando os aspectos econômicos da irrigação com déficit. Foram estudadas as relações entre produção de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), lâmina total de água aplicada, doses de nitrogênio e preço do produto. Para analisar as relações de tais fatores com os aspectos econômicos da irrigação com déficit, utilizaram-se funções de custo linear e funções de produção quadráticas, obtidas em experimento conduzido em Ilha Solteira, SP. O manejo da irrigação com a aplicação da lâmina total de água aplicada (lâmina ótima), que leva à máxima produtividade econômica, para o intervalo considerado de variação de preços do produto, resultaram em economia de água de 0,5 a 42% em relação à lâmina total de água aplicada (lâmina máxima) para a máxima produtividade física, dependendo da dose de nitrogênio utilizada. O uso da lâmina de água total aplicada (lâmina equivalente), que proporciona receita líquida igual à lâmina

máxima proporciona a economia de água de 2 a 66%. Entre as doses de nitrogênio utilizadas, a de 90 kg ha^{-1} proporcionou melhor resposta em termos de produção e de receita líquida. O preço do produto foi o fator mais importante na determinação da estratégia ótima de irrigação.

2.3. Evapotranspiração e coeficiente de cultura

Em geral, as hortaliças têm seu desenvolvimento intensamente influenciado pelas condições de umidade do ambiente, sendo, ainda, espécies vegetais de ciclo geralmente curto, o que as torna muito sensível à pequena margem de erro em seu manejo, com relação ao suprimento de água e nutrientes. A deficiência de água é o fator mais limitante para a obtenção de produtividades elevadas e de produtos de boa qualidade, mas o excesso também pode ser prejudicial. Assim, a reposição de água ao solo, por meio da irrigação, na quantidade adequada e no momento oportuno é decisiva para o sucesso da olericultura (MAROUELLI, 1998). Uma maneira para estimar a quantidade de água consumida pela cultura e o momento da irrigação é determinando a evapotranspiração da cultura.

A evapotranspiração da cultura (ETc) pode ser obtida a partir de dados meteorológicos e da cultura em si, por meio da equação de Penman-Monteith, ajustando o albedo e as resistências aerodinâmicas e de superfície do dossel para as características vegetativas da cultura, estimando assim a taxa de evapotranspiração diretamente. O albedo e as resistências são, porém, difíceis de serem calculadas com precisão, porque eles podem variar continuamente, durante o período com a mudança das condições climáticas, com o desenvolvimento da cultura e com a umidade da superfície do solo. A resistência de superfície é influenciada pela disponibilidade de água do solo e aumenta muito se a cultura está sujeita ao déficit hídrico (PEREIRA e ALLEN, 1998). Por esses motivos e pela considerável falta de pesquisas referentes às resistências aerodinâmica e de

superfície para as várias espécies cultivadas, o Boletim da FAO-56 recomenda utilizar a aproximação:

$$ETc = Kc\ ETo \quad (49)$$

em que,

ETc = evapotranspiração da cultura, mm d^{-1};

Kc = coeficiente de cultura, adimensional; e

ETo = evapotranspiração da cultura de referência, mm d^{-1}.

ALLEN et al. (1998) propõem um procedimento de cálculo para estimar os efeitos específicos devidos ao umedecimento da superfície do solo no valor do coeficiente de cultura (Kc). A solução consiste em separar o Kc em dois coeficientes, um para transpiração da cultura, isto é, o coeficiente basal de cultura (Kcb), e outro para evaporação de água do solo (Ke), sendo a ETc determinada pela seguinte equação:

$$ETc = (Kcb + Ke)\ ETo \quad (50)$$

em que,

Kcb = coeficiente basal de cultura, adimensional; e

Ke = coeficiente de evaporação de água do solo, adimensional.

O procedimento de cálculo da ETc consiste de: a) identificar as durações dos estádios de desenvolvimento da cultura, e selecionar os coeficientes Kcb correspondentes; b) ajustar os coeficientes Kcb selecionados para as condições climáticas durante os estádios de desenvolvimento; c) construir a curva do Kcb; c) determinar diariamente Ke, isto é, o valor da evaporação da água de superfície; e d) calcular ETc como o produto da ETo e (Kcb + Ke).

RADIN et al. (1999) por meio de análises de experimentos das safras de 1993/94 a 1996/97, conduzidos na Estação Agronômica da UFRGS em Eldorado do Sul, RS, com milho (*Zea mays* L.) híbrido precoce Pioneer 3230, determinaram o coeficiente de cultura (Kc) calculado em base semanal pela razão entre a evapotranspiração máxima da cultura, medida em lisímetro de percolação,

e a evapotranspiração de referência estimada pela equação de Penman; concluíram que o Kc inicial variou de 0,20 a 0,88, em função da freqüência de irrigação, sendo maiores quando o turno de rega é menor, e ajustaram, com o uso da análise de regressão linear, uma equação para o ciclo da cultura, em função do índice de área foliar (IAF), sendo: Kc = 0,723 + 0,1 IAF, com R^2 = 0,75.

SCALOPPI e SANTOS (1999), utilizando metodologia proposta por Jensen et al. (1970), estimaram o coeficiente de cultura (Kc) para manejo de irrigação da cultura de cebola (*Allium cepa* L.), sob condição de déficit hídrico. Esta estimativa assume importância em condições de escassez ou de custo elevado da água, impondo restrições nas quantidades aplicadas, em consonância com as características reveladas pelas funções de produção da cultura irrigada. O coeficiente de cultura deve ser desdobrado em componentes relacionados com a disponibilidade de água à cultura, e ao processo evaporativo da água por meio da superfície do solo. O valor de Kc diário variou de 0,4 a 1,1 durante o ciclo da cultura. Concluíram que o procedimento proposto pode ser empregado para a execução de balanços hídricos em solos cultivados sob regimes de irrigação com aplicação de lâmina de água abaixo daquela que proporciona a produtividade máxima física.

LI et al. (2003), em pesquisa realizada na região Naiman, Mongólia Central, China, utilizando lisímetro de balança para determinar a evapotranspiração máxima diária da cultura, e equação de Penman-Monteith FAO 56, determinaram o coeficiente de cultura para as culturas de trigo (*Triticum aestivum* L.) e do milho (*Zea mays* L.) nos estádios inicial, desenvolvimento, intermediário e final os quais foram de 0,55; 1,03; 1,19; 0,65 e 0,50; 1,02; 1,26; 0,68; respectivamente.

2.4. Unidades térmicas (graus-dia)

O crescimento e o desenvolvimento das culturas são influenciados pelas condições climáticas, dentre as quais se destacam a temperatura do ar e do solo, precipitação pluvial, radiação solar e fotoperíodo. Devido à grande complexidade nas interações cultura-clima, os estudos fenológicos têm sido, em sua maioria, conduzidos pelo estabelecimento de relações entre a taxa de desenvolvimento da cultura e índices bioclimáticos, com base, geralmente, na temperatura do ar (SILVA, 1989).

A utilização da técnica de cálculos de unidades térmicas ou graus-dia é recomendada em razão da grande variabilidade apresentada pelos dias do calendário, no que diz respeito à previsão de estádios de desenvolvimento das diferentes cultivares, na medida em que se varia de local, época de semeadura ou de ano. A temperatura do ar é um dos elementos que influenciam diretamente o desenvolvimento da cultura em todos os estádios. Para completarem cada fase do desenvolvimento, as plantas necessitam de determinada quantidade de energia. O método ideal de avaliação da extensão de um determinado subperíodo deve evidenciar apenas as diferenças entre genótipos, mantendo-se constante para uma mesma cultivar em diferentes condições ambientais (SOUZA, 1991).

A temperatura é um parâmetro mais simples de se expressar à energia disponível no meio. Essa energia é importante para o crescimento e desenvolvimento da cultura. Assim, com base na exigência térmica da cultura conceituam-se graus-dia (GD) como a contabilidade diária da energia que se situa acima da condição mínima e abaixo da máxima exigida pela planta (OMETTO, 1981).

O conceito de graus-dia baseia-se no acúmulo térmico dentro dos limites nos quais as plantas se desenvolvem, definidos pelas temperaturas basais inferior (T_b) e superior (T_B). Cada grau de temperatura acima da temperatura-base corresponde a um grau-dia. Cada cultivar possui uma temperatura-base que pode variar em função da fase fenológica da planta, sendo comum, no entanto, adotar um valor médio de temperatura-base para todo o ciclo da cultura, para facilitar a sua aplicação (CAMARGO et al., 1987).

A teoria de graus-dia assume que existe uma temperatura-base, abaixo da qual a planta não se desenvolve e, se o fizer, será em escala muito reduzida. Pressupõe, também, uma relação linear entre o acréscimo de temperatura e desenvolvimento da cultura, que temperaturas noturnas e diurnas tenham a mesma importância para o crescimento e desenvolvimento da planta e que a influência de outros elementos, tais como fotoperíodo e umidade do solo, desde que otimizados, sejam desprezíveis em relação à temperatura do ar. Tais aproximações tornam-se motivos freqüentes de críticas ao seu uso, mas, apesar das críticas a respeito da sua utilização para estimar a duração de um estádio fenológico ou ciclo das culturas, os resultados obtidos em diversos estudos têm sido muito satisfatórios (FERREIRA, 1997; BARROS, 1998; FERREIRA, 2000; FARIA et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2001, CARDOSO et al., 2001).

As temperaturas-base de várias culturas são encontradas em diversos trabalhos. Para a batata (*Solanum tuberosum* L.) cultivar Itararé (IAC-5986) a temperatura-base foi 8ºC (TRABEJO et al., 1991); ervilha (*Pisum sativum* L.) para três cultivares Mikado, Triofin e Majestic a temperatura-base foi 5,3ºC (BARBANO et al., 2001). LOZADA e ANGELOCCI (1999) testaram três temperaturas-base para a maturação do milho (*Zea mays* L.) e concluíram que as melhores foram 8 e 10ºC; e, para a soja (*Glycine max* L.), é de 14ºC, segundo CAMARGO et al. (1987). Segundo MOTA (1986) a maioria das espécies agrícolas começa a crescer a 6ºC.

O conceito de unidades térmicas foi desenvolvido para superar as inadequações do calendário diário para predizer estádios de crescimento e desenvolvimento da cultura, mas tem sido útil também na identificação de melhores épocas de semeadura, no escalonamento da produção e para prever fases fenológicas em programas de melhoramento e predição de produção da cultura (BRUNINI et al., 2001; CARDOSO, 2001).

2.5. Considerações gerais

Os solos sob vegetação de cerrado, em geral, caracterizam-se por possuírem baixos teores de nutrientes, redução da matéria orgânica com os sucessivos cultivos, pH baixo e alta fixação de fósforo (LOPES E COX, 1977). A quantidade de água disponível é baixa, situando-se na faixa de 30 a 42,3 mm para os primeiros 0,30m de profundidade (SANS, 1986; McMAHON e GOEDERT, 1985). Sendo a evapotranspiração da ordem de 5 a 6mm dia^{-1}, o déficit hídrico ocorre muito rapidamente, principalmente se o sistema radicular estiver limitado à superfície. Essa situação pode ocasionar severas reduções na produtividade, particularmente se o déficit ocorrer nos estádios críticos de desenvolvimento da cultura (AZEVEDO, 1988). Nessas condições, faz-se necessário que estudos sejam desenvolvidos e se determinem lâminas de irrigação e níveis de adubação para diversas culturas, os quais poderão proporcionar produtividades economicamente viáveis.

3. MATERIAL E MÉTODO

3.1 Área experimental

O presente estudo foi conduzido na Estação Experimental Rio Paranaíba, pertencente à Cooperativa Agropecuária do Alto Paranaíba (COOPADAP), localizada no município de Rio Paranaíba, MG, com coordenadas geográficas de 19º 12’ 26’’S de latitude, 46º 09’ 46’’W de longitude e altitude de 1.159m.

O clima da região é do tipo mesotérmico úmido, Cwb, segundo classificação climática proposta por Köeppen, isto é, temperado de inverno seco.

As variações diárias das temperaturas máxima e mínima e da umidade relativa do ar média encontram-se nas Figuras 1 e 2, para as épocas de cultivo das cultivares Brasília e Nantes, respectivamente. Observa-se que, na época de verão, as temperaturas são mais elevadas juntamente com a precipitação pluvial, Figura 3, em comparação com a época do cultivo de inverno, Figura 4. A precipitação total no cultivo de verão foi 713mm e, no inverno, de 76mm.

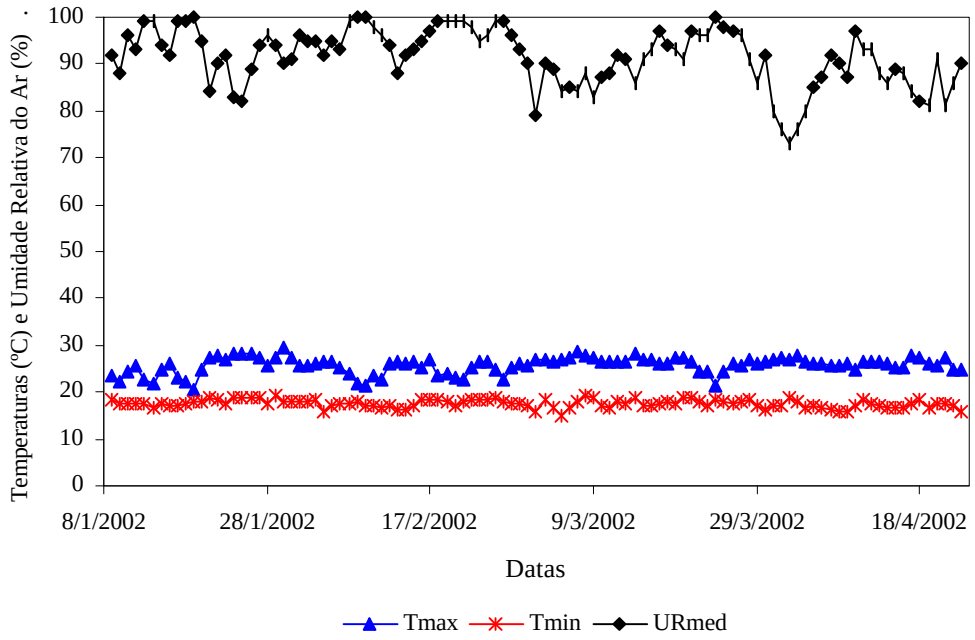

Figura 1 – Variação diária das temperaturas máxima e mínima (ºC) e da umidade relativa do ar média (%) para a época de cultivo da cultivar Brasília.

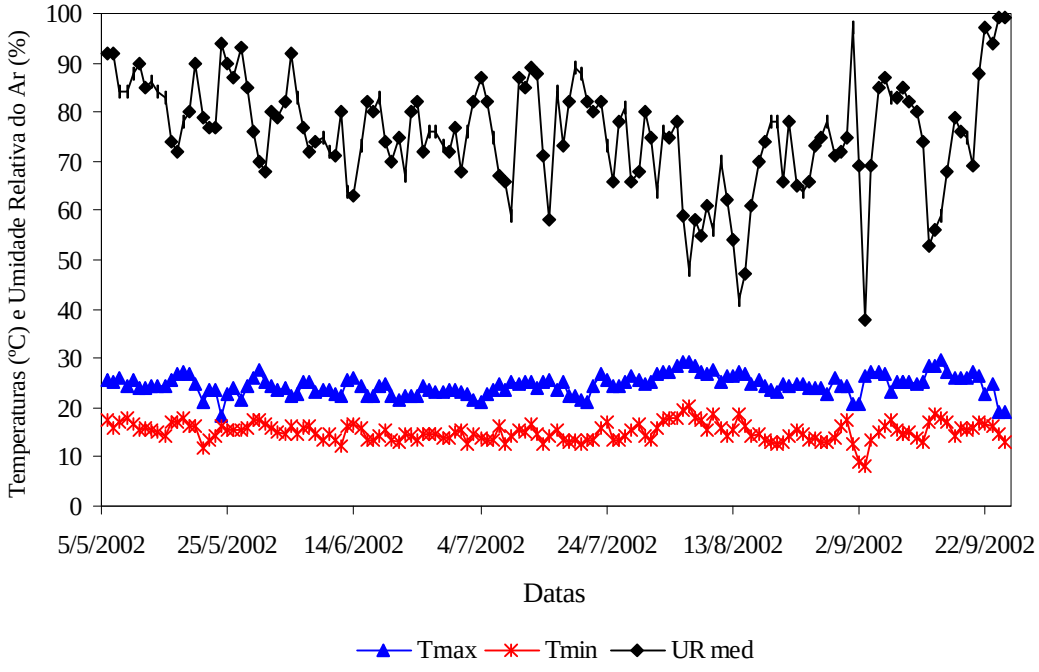

Figura 2 – Variação diária das temperaturas máxima e mínima (ºC) e da umidade relativa do ar média para a época de cultivo da cultivar Nantes.

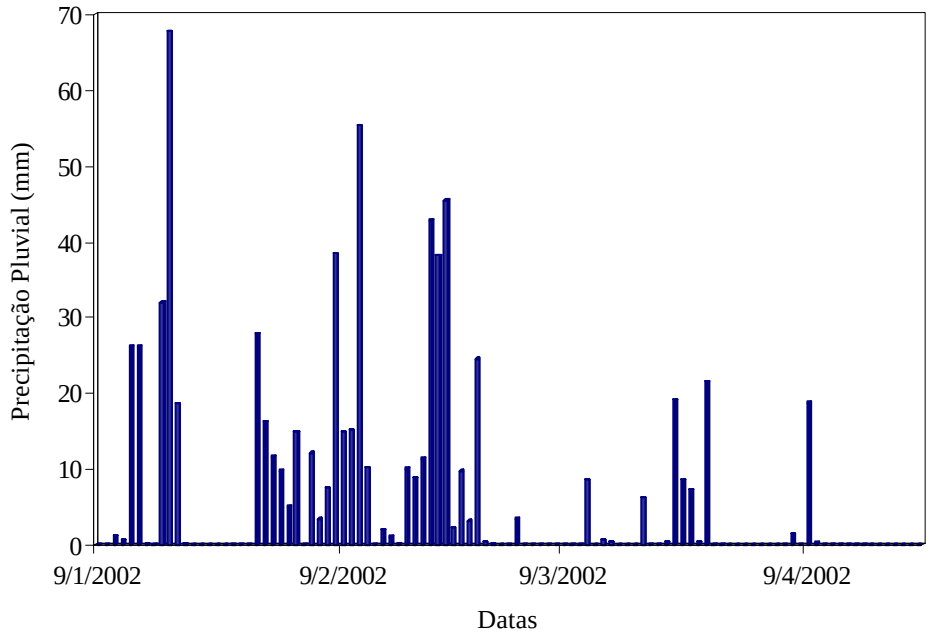

Figura 3 – Precipitação pluvial diária (mm) diária durante a época de cultivo da cultivar Brasília.

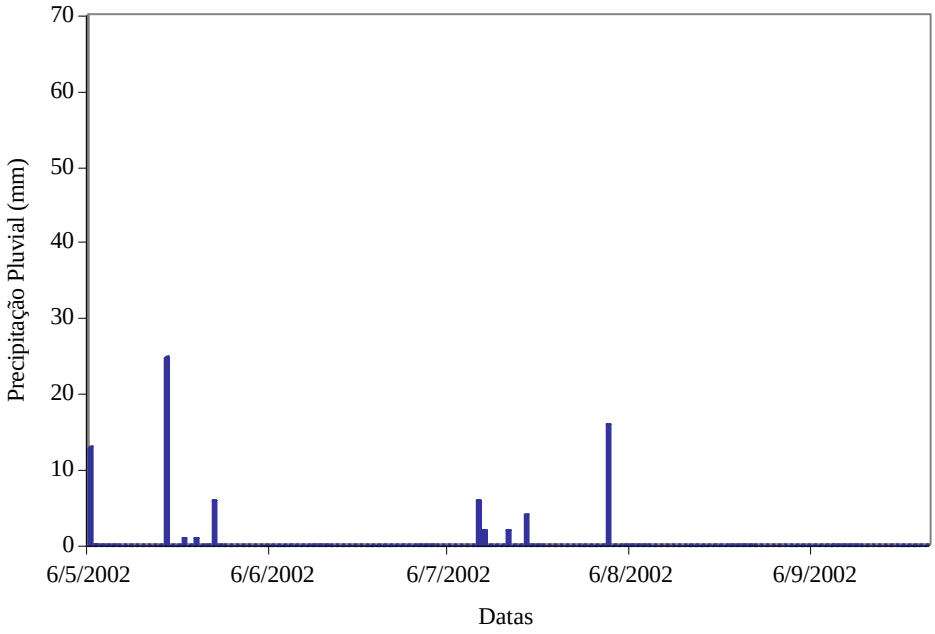

Figura 4 – Precipitação pluvial diária (mm) durante a época de cultivo da cultivar Nantes.

O solo da área experimental foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO eutrófico. Algumas das características químicas do solo da área experimental encontram-se no Quadro 1. A distribuição granulométrica e os resultados das análises físico-hídricas do solo encontram-se no Quadro 2. O solo da área experimental apresentou textura muita argilosa na camada de 0-20 cm e argiloso-siltosa na camada de 20-40 cm de profundidade.

As curvas de retenção de água do solo nas duas camadas estudadas estão apresentadas na Figura 5.

Quadro 1 – Características químicas do solo da área experimental, para as duas profundidades estudadas.

Profundidade	pH	P	K	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H+Al	MO
(cm)	$\begin{pmatrix}\text{em}\\ H_2O\end{pmatrix}$	.....mg dm^{-3}.....		.....$cmol_c$ dm^{-3}.....				dag kg^{-1}
0 – 20	6,3	4,4	36	2,9	0,7	0,0	6,1	4,65
20 – 40	5,8	0,8	18	0,8	0,1	0,0	5,9	3,89

Quadro 2 – Distribuição granulométrica e resultado das análises físico-hídricas do solo da área experimental, para as duas camadas estudadas.

Profundidade (cm)	Distribuição granulométrica (%)			Nível de umidade[1] (kg kg^{-1})		Massa específica do solo[2] (g cm^{-3})	Massa específica das partículas do solo (g cm^{-3})
	Argila	Silte	Areia	Cc	Pm		
0 – 20	61	28	11	0,32	0,21	1,04	2,80
20 – 40	41	42	17	0,31	0,20	1,03	2,70

[1] Os níveis de umidade do solo na capacidade de campo (Cc) e no ponto de murcha permanente (Pm) foram determinados no laboratório às tensões de -30 e -1.500 kPa, respectivamente.
[2] A massa específica do solo foi determinada em amostras coletadas em cilindros UHLAND.

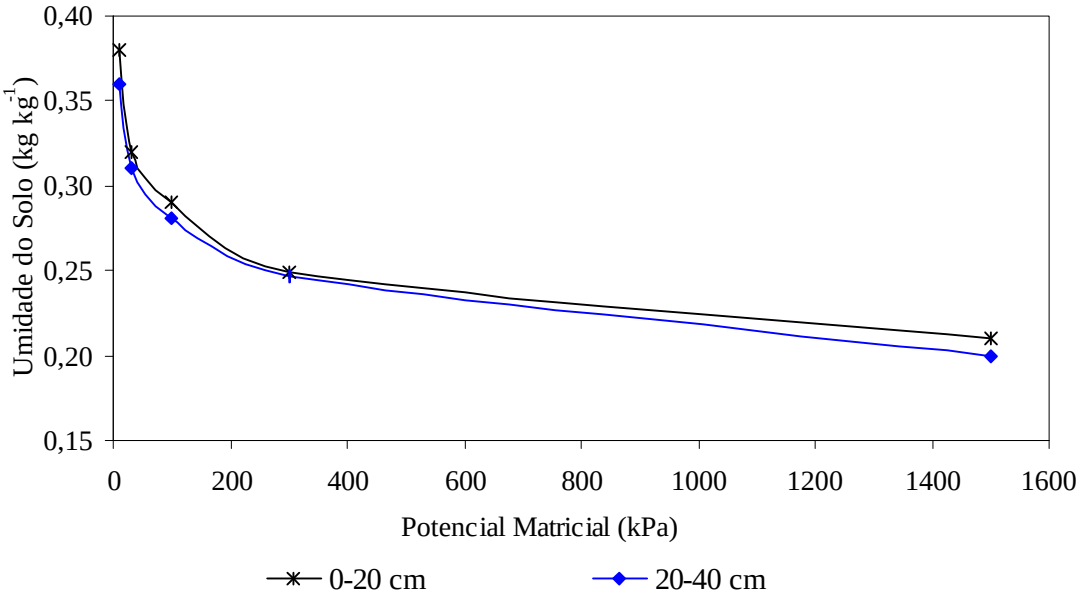

Figura 5 – Curva de retenção de água no solo, para as profundidades de 0-20 e 20-40 cm.

3.2 Instalação da cultura

Nos experimentos utilizaram-se sementes de cenoura (*Daucus carota* L.) das cultivares Nantes, no cultivo de inverno, e Brasília, no cultivo de verão, com os seguintes padrões de qualidade: pureza mínima de 99% e poder germinativo mínimo de 98%.

O preparo do solo constou de uma aração e de duas gradagens para efetuar o adequado destorroamento, seguido da rotocanteiradora, para fazer os canteiros. Para a semeadura utilizou-se uma semeadora pneumática de cinco linhas duplas espaçadas de 0,30m, com espaçamento de 0,08m entre fileiras e de 0,04m entre plantas na fileira.

As adubações foram feitas com base na análise de solo (Quadro 1), distribuindo-se o adubo a lanço e incorporando-o com rotocanteiradora. Foram aplicados: 220kg ha^{-1} de K_2O, na forma de cloreto de potássio, 15 dias antes da semeadura, e 66kg ha^{-1}, em cobertura, aos 20 e 40 dias após a emergência das plântulas; 2.222kg ha^{-1} de P_2O_5, na forma de superfosfato simples, 15 dias antes

da semeadura, e, três meses antes do plantio de verão, foi feita a incorporação de 3t ha^{-1} de calcário dolomítico para elevar a saturação por bases conforme recomendação da COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS (1999).

Realizou-se a semeadura da cultivar Brasília no dia 9.1.2002 e da cultivar Nantes no dia 6.5.2002, ocorrendo a emergência das plântulas 7 e 10 após a semeadura, respectivamente. Aos 35 dias, após a emergência, foi feito o desbaste das plantas excedentes, adequando-se o espaçamento de 0,04 m entre plantas na fileira, totalizando 150 plantas/m^{-2}. No dia 23.4.2002, realizou-se a colheita da cultivar Brasília e, no dia 9.9.2002, da cultivar Nantes.

3.3. Instalação do experimento

A Figura 6 mostra esquematicamente os canteiros, sendo que os dois externos formam a bordadura e os três centrais, os Blocos com as parcelas; bem como a localização da estação meteorológica eletrônica compacta.

Os experimentos foram conduzidos em cinco canteiros de 1,20m x 81,0m (Figura 7). Os tratamentos foram aplicados nos três canteiros centrais, possuindo cada um 25 parcelas de 3,0m de comprimento. As parcelas foram separadas por lonas plásticas colocadas até a profundidade de 0,40 m, com a finalidade de se evitar a passagem de água e de nutrientes de uma parcela para outra.

Na área experimental, foi instalada uma estação meteorológica eletrônica compacta, segundo as normas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), com sensores de duração do dia, precipitação pluvial, velocidade do vento, radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar. A coleta diária de dados climáticos foi feita às oito horas.

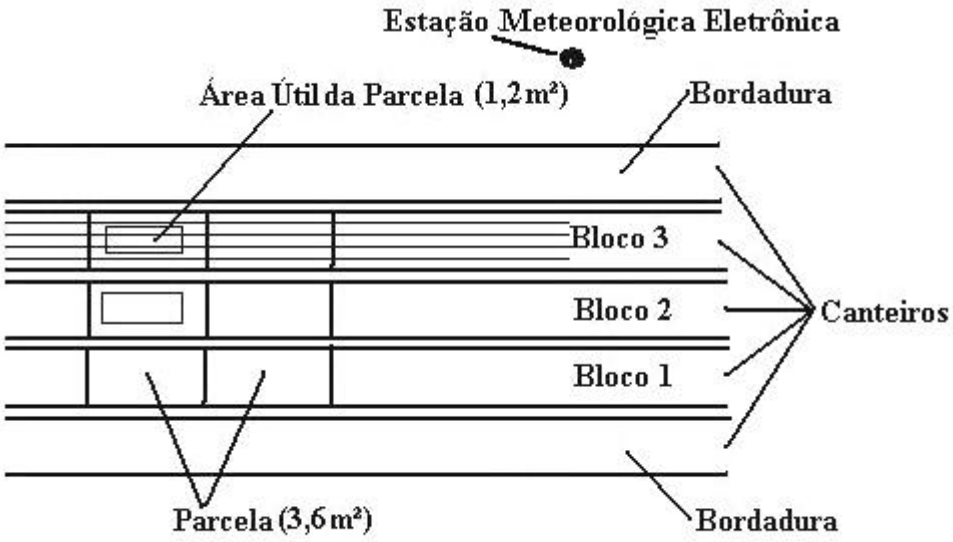

Figura 6. Croqui da área experimental.

O método de irrigação utilizado foi uma simulação de aspersão, empregando-se um tubo de PVC de 25mm perfurado e instalado num balancim na estrutura metálica dotada de duas rodas de bicicleta, ficando a aproximadamente 0,80m de altura da superfície do canteiro (Figura 8). O tubo foi acoplado por meio de mangueiras a uma caixa de fibra de vidro construída com a área de 1,0m^2 e 1,10 m de altura. Assim, cada 1mm de altura na caixa correspondia a 1L de água, permitindo contabilizar o volume de água aplicado na parcela. As caixas foram instaladas a 4,0m de altura, possibilitando a obtenção de pressão suficiente para a aplicação da lâmina de água necessária nas irrigações (Figura 9).

Para o manejo da irrigação obtiveram-se, diariamente, os valores da evapotranspiração de referência e da precipitação pluvial local. As irrigações obedeceram a um turno de rega (TR) fixo, que variou em função do desenvolvimento da cultura da seguinte maneira: da semeadura até estabelecimento da cultura (40 dias após semeadura) o TR foi de 1 dia; do estabelecimento da cultura até 30 dias antes colheita o TR foi de 2 dias; e, no último mês de cultivo, o TR foi de 3 dias. Tomou-se o cuidado para que nas parcelas W_3 a soma da diferença entre a evapotranspiração de referência e a precipitação efetiva nunca fosse superior à lâmina real de água disponível no

solo, calculada com fator de disponibilidade igual a 30%, conforme recomendação de MAROUELLI e SILVA (1998) para a cultura da cenoura, ou seja, quando a relação seguinte era verdadeira:

$$LRD \leq \sum_{i=1}^{n} (ETo_i - Pe_i) \qquad (51)$$

em que,

LRD = lâmina real de água disponível no solo, mm;

n = número de dias entre duas irrigações consecutivas;

ETo_i = evapotranspiração de referência, mm d^{-1}; e

Pe = precipitação efetiva, mm d^{-1}.

Figura 7 – Preparo dos canteiros na área experimental.

A evapotranspiração de referência (ETo) foi estimada pelo método de Penman-Monteith, utilizando-se o programa computacional REF-ET de ALLEN et al. (1998).

A equação anterior considera que o lençol freático é profundo o suficiente para tornar o fluxo capilar ascendente desprezível.

Figura 8 – Estrutura de suporte do tubo perfurado usado na irrigação das parcelas experimentais.

Figura 9 – Estruturas nas quais foram instaladas caixas de fibra de vidro para controle da quantidade de água aplicada nas parcelas experimentais.

A LRD foi calculada aplicando-se a seguinte equação:

$$LRD = \frac{(CC - PM)}{10} f\ Da\ Z \quad (52)$$

em que,

CC = capacidade de campo, porcentagem em peso;

PM = ponto de murcha permanente, porcentagem em peso;

f = fator de disponibilidade de água no solo, decimal;

Da = massa específica do solo, g cm^{-3}; e

Z = profundidade efetiva do sistema radicular, cm.

A precipitação efetiva (Pe) foi estimada diariamente em função da precipitação pluvial (P) e da lâmina de água necessária para que a umidade do solo retornasse à CC na camada de solo explorada pelo sistema radicular das plantas, com as seguintes condições:

Primeiramente, quando a P foi inferior à deficiência atual de água no solo, a água perdida por escoamento superficial foi desprezível. Isto se baseou no fato de que, em áreas irrigadas, a quantidade de água necessária para elevar a umidade do solo à CC é, muitas vezes, inferior a 20-30 mm, e que chuvas dessa magnitude raramente provocam escoamento superficial, exceto em solos de baixa permeabilidade, declivosos ou compactados.

Em segundo lugar, no caso de chuva intensa ou quando a deficiência de água no solo (LRN) for pequena, pode ocorrer tanto escoamento superficial quanto drenagem profunda. Nesse caso, considerou-se que a P ocorrida, mesmo que provoque escoamento superficial, foi capaz de elevar a umidade do solo à CC. Assim sendo, não foi necessário quantificar as perdas de água decorrentes do escoamento superficial e, ou, percolação abaixo do sistema radicular da cultura.

Com base nas considerações anteriores, pode-se admitir que:

$$\text{se } P < LRN \Rightarrow Pe = P \quad (53)$$

$$\text{se } P \geq LRN \Rightarrow Pe = LRN \quad (54)$$

Determinado o momento da irrigação, a quantidade de água necessária é dada pelo somatório da diferença entre a ETo e a Pe ocorrida desde a última irrigação.

$$W_n = \sum_{i=1}^{n} (ETo_i - Pe_i) \quad (55)$$

sendo W_n a lâmina de água de irrigação para o intervalo de n dias.

O controle das plantas daninhas foi feito manualmente e o controle fitossanitário foi efetuado conforme os Quadros 3 e 4.

Quadro 3 – Pulverizações realizadas durante o ciclo de cultivo da cultivar Brasília.

Pulverizações realizadas para o controle de doenças									
Ingrediente ativo	**Datas das Pulverizações**								
Mancozeb	11/02	21/02	27/02	08/03	15/03	21/03			17/04
Chlorothalonil							01/04	08/04	12/04
Pulverizações realizadas para o controle de pragas									
Ingrediente ativo	**Datas das Pulverizações**								
Fenpropathrin	21/02								
Clorpirifós		28/02		08/03					
Permethrin			01/03		11/03				
Carbaryl						01/04	08/04	17/04	

3.4. Delineamento experimental

O experimento para determinação da função de produção e análise econômica foi montado segundo um esquema fatorial 5x5, no delineamento blocos ao acaso, com três repetições. A Figura 3 mostra, esquematicamente, a disposição das parcelas, blocos e localização da estação meteorológica

automática. Os tratamentos foram as combinações de cinco lâminas de irrigação e cinco doses de nitrogênio. As cinco lâminas de irrigação foram: W_0 = 0,6 ETo, W_1 = 0,8 ETo, W_2 = 1,0 ETo, W_3 = 1,2 ETo, W_4 = 1,4 ETo. As cinco doses de nitrogênio foram N_0 = 0kg ha^{-1}, N_1 = 80kg ha^{-1}, N_2 = 160kg ha^{-1}, N_3 = 240kg ha^{-1}, N_4 = 320kg ha^{-1}.

Quadro 4 – Pulverizações realizadas durante o ciclo de cultivo da cultivar Nantes.

Pulverizações realizadas para o controle de doenças										
Ingrediente ativo	**Datas das Pulverizações**									
Mancozeb	14/06	24/06					05/08	12/08	26/08	31/08
Chlorothalonil			03/07	10/07	18/07	24/07				
Pulverizações realizadas para o controle de pragas										
Ingrediente ativo	**Datas das Pulverizações**									
Fenpropathrin				10/07						
Clorpirifós	24/06		04/07		11/07					
Permethrin		03/07								
Carbaryl						05/08	12/08	26/08		

Foram colhidas as três fileiras centrais de cada parcela, totalizando a área útil de 1,2m^2 por unidade experimental. As raízes colhidas foram pesadas e classificadas, segundo a metodologia utilizada pela COOPADAP, medindo-se o comprimento e o diâmetro, conforme Quadro 5. Considerou-se como comercial o somatório da classes Extra A, Extra AA e Extra AAA.

A produtividade foi obtida pelo valor médio alcançado em cada tratamento, em t ha^{-1}. Com a finalidade de gerar resultados mais próximos da situação real de campo, foi considerada, neste trabalho, área útil de 8.000m^2 para um hectare de plantio, uma vez que, no campo, parte da área é ocupada com carreadores.

Quadro 5 – Classificação das raízes segundo o comprimento e o diâmetro mediano.

Classe	Comprimento (cm)	Diâmetro (cm)
Extra G	> 22,0	> 4,5
Extra AAA	17,0 – 22,0	< 4,5
Extra AA	12,0 – 17,0	> 3,0
Extra A	10,0 – 12,0	> 2,5
Descartes	< 10,0	< 2,5

Fonte: COOPADAP

3.5. Manejo da irrigação

Após a semeadura, todos os tratamentos receberam irrigação uniforme, com turno de rega de um dia, durante os primeiros 21 dias, para garantir a germinação e estabelecimento da cultura. Após esse período, iniciou-se o controle das lâminas de irrigação com turno de rega de dois dias e, somente no final do ciclo da cultura, passou-se para três dias.

Utilizou-se o programa computacional SISDA para calcular a lâmina de irrigação necessária da cultura da cenoura e para estimativa da precipitação efetiva (Pe) em cada tratamento. O cálculo da estimativa da precipitação efetiva, para cada tratamento, considerando como Pe aquela que ficou retida na camada de solo estudada e que pudesse ser utilizada pela cultura, tornou-se necessário em razão de os tratamentos receberam lâminas de irrigação diferenciadas, fazendo com que a capacidade de armazenamento do solo no volume estudado seja diferente antes de uma precipitação pluvial (P).

O programa SISDA considerou como precipitação efetiva toda precipitação pluvial que infiltra no solo, ressalvando-se que parte dela pode ser perdida por percolação. O cálculo do escoamento superficial foi feito pela diferença entre a precipitação pluvial e a infiltrada no solo.

A lâmina de água percolada (excesso) foi calculada pela diferença:

$$L_{percolada} = P_{inf\ iltrada} - DH_{anterior} - ET_c \quad (56)$$

em que,

$L_{percolada}$ = lâmina percolada da camada de solo de 0-40 cm, mm d^{-1};

$P_{infiltrada}$ = precipitação infiltrada na camada de solo de 0-40 cm, mm d^{-1};

$DH_{anterior}$ = déficit hídrico na camada de solo de 0-40 cm do dia anterior antes da precipitação pluvial, mm d^{-1};

ET_c = evapotranspiração da cultura, mm d^{-1}.

A precipitação efetiva, para cada tratamento, foi calculada com a equação:

$$P_{efetiva} = P_p - L_{percolada} - E_{Superficial} \quad (57)$$

3.6. Função de produção

Para obtenção da função de produção, foi utilizada análise de regressão entre a variável dependente (produção comercial) e as variáveis independentes (lâminas de água e doses de nitrogênio).

Empregando a metodologia de superfície de resposta, os modelos foram escolhidos com base na significância dos coeficientes de regressão, utilizando-se o teste t ao nível de até 10% de probabilidade, coeficiente de determinação (R^2) e no fenômeno em estudo.

Para estudar o efeito combinado de lâmina total de água aplicada e doses de nitrogênio na produtividade da cenoura foi utilizada uma superfície de resposta de segunda ordem igual à equação 7.

A lâmina total de água a ser aplicada e a dose de nitrogênio exigida para obtenção da produtividade máxima física foram obtidas das derivadas parciais de primeira ordem da equação 7 e igualando-as a zero, sendo que as derivadas

parciais de segunda ordem foram negativas e o determinante positivo caracterizando um ponto de máximo.

Os níveis de água e nitrogênio de maior retorno econômico devem corresponder a uma produtividade que traduza uma receita líquida máxima (RL) ou um lucro máximo.

A função de custo total de produção (C_T) na forma linear pode ser expressa como a equação 13. Assim, a equação da receita líquida pode ser dada pela equação 14. Maximizando a equação 14, obtém-se a lâmina de irrigação e a dose de nitrogênio de maior retorno econômico, equações 17 e 20 respectivamente.

A taxa marginal de substituição técnica da lâmina total de água aplicada (W) por dose de nitrogênio (N) ($TMST_{W/N}$) é dada pela inclinação da tangente à curva da isoquanta, equação 24.

3.6.1. Estratégias de irrigação

3.6.1.1. Sob restrição de terra

Sendo a disponibilidade de terra o único fator limitante da produção, a estratégia ótima de irrigação consiste em aplicar a quantidade de água que maximize a receita líquida por unidade de área, o que corresponde maximizar a diferença entre as funções de receita bruta e de custos.

Considerando a água como o único fator variável, a função de produção da cultura é uma função polinomial de segundo grau, semelhante à equação 25. Como condição simplificadora, conforme sugerido por HART et al. (1980), ENGLISH (1990) e FRIZZONE (1998), podem-se expressar a função de custo

total de produção (C_T) conforme equação 26 e a função de receita líquida da unidade técnica análoga à equação 27.

Assim, a lâmina total de água ótima (W_t*) tendo a terra como fator limitante da produção, equação 34, corresponde à lâmina que proporciona a máxima renda líquida por unidade de área, para um dado preço de produto e um dado preço da água.

Definimos um intervalo entre a lâmina total de água que proporciona a produção máxima física (W_{max}) e a lâmina total de água equivalente (W_{te}) que proporciona uma renda líquida igual a W_{max}, conforme as equações 11 e 37. No intervalo entre W_{max} e W_{te}, a irrigação com déficit deverá ser mais rentável do que a irrigação sem déficit (FRIZZONE, 1998).

3.6.1.2. Sob restrição de água

Considerou-se a disponibilidade de água como fator limitante à produção, como já está ocorrendo em alguns casos na região do Alto Paranaíba. A água economizada pela irrigação com déficit pode ser utilizada para irrigar uma quantidade adicional de terra, possibilitando o aumento da receita líquida. Segundo os pesquisadores ENGLISH (1990) e FRIZZONE (1998), para encontrar o nível de água que maximiza a receita líquida, por unidade de volume de água, utilizam-se a equação 42. A lâmina total de água ótima (W_w^*) maximiza a receita líquida.

Para obter a lâmina de água total equivalente (W_{we}), menor do que W_w^*, que produz uma receita líquida equivalente àquela obtida pelo nível W_{max}, utiliza-se à equação 44.

3.6.2. Função de resposta múltipla

Como a produção total de cenoura é dividida e classificada principalmente em Extra AAA, Extra AA e Extra A, e sendo impossível quantificar os insumos entre as distintas respostas, de acordo com DILLON (1977), considerou-se que ocorreram várias respostas simultâneas, cada uma expressa como uma Função de Resposta, equação 45.

As lâminas de água e a dose de nitrogênio a ser aplicada para obtenção da máxima produtividade física foram obtidas fazendo-se a primeira derivada das três equações de Y_i iguais a zero, e resolvendo para que satisfaça o sistema de equações.

Os níveis de água e nitrogênio de maior retorno econômico correspondem à produtividade que traduza uma receita líquida máxima (RL), equação 47.

A condição de produtividade máxima econômica requer a solução simultânea do conjunto de três equações que participam da produção total, igualando-as a zero, equação 48.

Assim, ajustaram-se três equações de regressão utilizando a metodologia de superfície de resposta, tendo a produção da cenoura para as diferentes classificações como variável dependente e lâmina total de água e dose de nitrogênio como variáveis independentes. Os modelos foram escolhidos com base na significância dos coeficientes da equação de regressão, utilizando-se o teste t ao nível de até 10% de probabilidade, coeficiente de determinação e no fenômeno em estudo.

3.7. Estimativa do coeficiente de cultura

Os coeficientes de cultura (Kc) estimados para os três estádios de desenvolvimento da cenoura, cultivares Brasília e Nantes, foram obtidos seguindo-se a metodologia proposta no Boletim FAO 56 (ALLEN et al., 1998), nas condições edafoclimáticas da região do Alto Paranaíba, irrigada por pivô central.

A evapotranspiração de referência (ETo) foi estimada aplicando-se a equação de Penman-Monteith, base diária (ALLEN et al., 1998). A metodologia utilizada no cálculo da ETc considerou os efeitos de umedecimento da camada superficial do solo no valor do coeficiente de cultura, particionado em Kcb e Ke. Assim, a ETc foi estimada com a equação 50.

Semanalmente, a cultura era fotografada, para que, posteriormente, fosse determinda a cobertura do solo (sombreamento), utilizando o programa MATLAB R12 pelo método iterativo, dividindo o ciclo da cultura da cenoura em três estádios, de acordo com os parâmetros propostos por DOORENBOS e PRUITT (1975), para a determinação dos K_{cb} correspondentes, em:

Estádio inicial – semeadura até 10% da cobertura do solo;

Estádio I – do final do estádio inicial até 80% da cobertura do solo; e

Estádio II – final do estádio I até a colheita.

Na determinação dos coeficientes basais de cultura usaram-se os valores recomendados por ALLEN et al. (1998), para a condição sem estresse: $Kcb_{inicial}$ = 0,15, Kcb_{meio} = 0,95 e Kcb_{final} = 0,85. O ajuste dos coeficientes basais de cultura, para os períodos intermediário e final, foi feito por meio da aplicação da seguinte equação:

$$Kcb = Kcb_{tab} + [0{,}04\,(u_2 - 2) - 0{,}004(URmin - 45)]\left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \qquad (58)$$

em que,

$Kcb_{(tab)}$ = valor para Kcb_{meio} ou Kcb_{final} (se 0,45) da Tabela 17 de ALLEN et al.,1998;

u_2 = velocidade do vento, média diária, a 2,0 m de altura, m s^{-1} (para intervalo de variação de 1 a 6 m s^{-1});

URmin = umidade relativa do ar mínima, média diária, % (para intervalo de variação de 20 a 80%); e

h = altura da cultura, m.

O coeficiente de evaporação foi calculado aplicando-se a equação:

$$Ke = \min\{(Kr(Kc_{max} - Kcb)), (few\, Kc_{max})\} \quad (59)$$

em que,

min = valor mínimo entre os parâmetros entre parênteses separados por vírgula;

Kr = coeficiente de redução da evaporação;

few = fração do solo que está exposto e umedecido; e

Kc_{max} = valor máximo de Kc após chuva ou irrigação.

Na determinação do Kr, consideram-se duas fases: 1) logo após uma chuva ou irrigação, a evaporação na superfície umedecida do solo ocorre à taxa máxima e depende somente da energia disponível; assim, Kr = 1; e, 2) a ocorrência de evaporação na superfície do solo limita a evaporação da água contida no perfil, adotando-se a profundidade de 0,15m; neste caso, Kr é calculado por:

$$Kr = \frac{TEW - De_{i-1}}{TEW - REW} \text{ para } De_{i-1} > REW \quad (60)$$

sendo,

TEW = lâmina máxima de água que pode ser evaporada do solo, mm;

De_{i-1} = lâmina de evaporação acumulada na camada superficial do solo até o final do dia anterior, mm; e

REW = lâmina de evaporação acumulada até o final da fase 1, mm

A lâmina de água máxima que pode ser evaporada do solo foi calculada aplicando-se a seguinte equação:

$$TEW = 1000(q_{CC} - 0{,}5q_{PM})Zev \quad (61)$$

em que,

θ_{CC} = umidade do solo na capacidade de campo, $m^3\ m^{-3}$;

θ_{PM} = umidade do solo no ponto de murcha permanente, $m^3\ m^{-3}$; e

Zev = profundidade do solo sujeita a evaporação (0,10 a 0,15m). Assumiu-se Zev igual a 0,15m

O valor de Kc_{max} foi obtido com a aplicação da equação:

$$Kc_{max} = \max\left\{\left(1{,}1 + [0{,}04(u_2 - 2) - 0{,}004(UR - 45)]\left(\frac{h}{3}\right)^{0{,}3}\right), (Kcb + 0{,}05)\right\} \quad (62)$$

em que,

max = valor máximo entre os parâmetros entre parênteses separados por vírgula;

A fração de solo exposta e umedecida (few), na qual ocorre a maior parte da evaporação, foi calculada por:

$$few = \min\{(1 - fc), (fw)\} \quad (63)$$

em que,

1 – fc = fração média de solo exposto, não sombreado, (0,01 a 1)

fw = fração média da superfície do solo molhada por irrigação ou chuva (0,01 a 1); no caso de irrigação por aspersão, fw = 1 (ALLEN et al., 1998)

A fração efetiva da superfície do solo sombreada pela vegetação foi estimada pela seguinte equação:

$$fc = \left(\frac{Kcb - Kc_{min}}{Kc_{max} - Kc_{min}}\right)^{(1+0{,}5h)} \quad (64)$$

em que Kc_{min} é o menor valor de Kc para solo com superfície descoberta e seca (≈ 0,15 a 0,20).

3.8. Determinação dos graus-dia

Os graus-dia necessários para satisfazer o ciclo semeadura-colheita das cultivares Brasília e Nantes, foram calculados pela equação indicada por OMETTO (1981), quando a temperatura mínima basal (T_b) é menor que a temperatura mínima do ar (T_{min}), e a temperatura máxima basal é maior que a temperatura máxima do ar (T_{max}):

$$GD = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_b \qquad (65)$$

em que,

GD = graus-dia, ºC;

T_{max} = temperatura do ar máxima, ºC;

T_{min} = temperatura do ar mínima, ºC; e

T_b = temperatura-base da cultura, 6ºC.

Para a cultura da cenoura, conforme CARVALHO (1994), as seguintes condições devem ser observadas:

Se $T_{max} > 30$ºC, então $T_{max} = 30$ºC

Se $T_{min} < 6$ºC, então $T_{min} = 6$ºC.

3.9. Eficiência do uso da água

A eficiência do uso da água, segundo BEGG e TURNER (1976), é a relação entre a produtividade da cultura e a quantidade de água consumida durante o seu ciclo no processo de evapotranspiração.

Utilizou-se, neste trabalho, a relação proposta por HILLEL (1972):

$$EUA = \frac{Y}{V + T + E + D} \qquad (66)$$

em que,

EUA = eficiência do uso da água, g m^{-2} mm^{-1};

Y = produtividade da cultura, g m^{-2};

V = lâmina de água utilizada para o crescimento da cultura, mm;

T = lâmina de água de constituição vegetal, mm;

E = lâmina de água utilizada no processo de evaporação na superfície do solo, mm;

D = lâmina de água perdida por drenagem profunda, mm.

Os componentes do denominador da equação 66 foram agrupados e representados pela lâmina total de água aplicada, em decorrência da dificuldade de sua determinação em condições de campo.

Uma equação de regressão foi ajustada por meio da metodologia de superfície de resposta, tendo a EUA como variável dependente e a lâmina total de água e a dose de nitrogênio como variáveis independentes. Os modelos foram escolhidos com base na significância dos coeficientes da equação de regressão, utilizando-se o teste t ao nível de até 10% de probabilidade, coeficiente de determinação e no fenômeno em estudo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Manejo de irrigação

O manejo de irrigação da cenoura foi conduzido em duas fases. A primeira ocorreu durante os 21 dias seguintes à semeadura, quando a irrigação foi feita diariamente em todas as parcelas, sendo necessária para a germinação e o estabelecimento da cultura. Para a cultivar Brasília, a lâmina de irrigação nessa fase foi de 61,0mm e a precipitação efetiva foi de 37,3mm. Na cultivar Nantes, os valores foram 58,0mm e 31,8mm, respectivamente. A segunda fase foi caracterizada pela aplicação dos níveis relativos às cinco lâminas de irrigação. As lâminas de irrigação aplicadas na cultivar Brasília foram 173,0mm, 211,0mm, 249,0mm, 287,0mm e 323,0mm. Nesse caso, as lâminas totais, considerando a precipitação efetiva, foram: W_1 = 397,67mm; W_2 = 409,85mm; W_3 = 431,83; W_4 = 445,54mm e W_5 = 479,81mm. Para a cultivar Nantes as lâminas de irrigação foram 248,0mm, 313,0mm, 378,0mm, 442,0mm e 505,0mm, com as seguintes lâminas totais: W_1 = 311,45mm; W_2 = 369,94mm; W_3 = 429,64mm; W_4 = 482,31 mm e W_5 = 545,10mm.

No Anexo A, encontram-se os valores de evapotranspiração de referência e das lâminas de irrigação aplicadas durante os ciclos culturais das cultivares Brasília e Nantes, respectivamente.

Nas Figuras 10 e 11, encontram-se os gráficos com as lâminas de precipitação efetiva e aplicadas por irrigação nos níveis d'água, durante os ciclos culturais das cultivares de cenoura Brasília e Nantes, respectivamente.

Nas Figuras 12 e 13, estão os gráficos do manejo da água no solo, apresentados pelo programa computacional SISDA, para o tratamento W_3N_2 aplicado às cultivares Brasília e Nantes, respectivamente. Para os outros tratamentos os gráficos encontram-se no Anexo B. O cultivo da cenoura, cultivar Nantes, ocorreu nas estações outono e inverno, com maior número de irrigações em comparação ao que foi feito no cultivo da cenoura Brasília, que ocorreu no verão. Para o nível W_3 a umidade do solo variou entre a capacidade de campo e a umidade mínima do solo, estabelecida de acordo com a recomendação de MAROUELLI e SILVA (1998) para a cultura da cenoura, com o fator de disponibilidade de água no solo igual a 0,3. Observa-se, na Figura 12, que, na segunda quinzena de março, a umidade do solo ficou abaixo da mínima recomendada, devido ao fato de a irrigação nessa época do ano ser suplementar.

4.2. Função de produção

No Quadro 6, encontram-se os parâmetros das equações de regressão ajustados aos dados de produtividade comercial das raízes de cenoura das cultivares Brasília e Nantes, como variável dependente e de lâminas totais de água e doses de nitrogênio como variáveis independentes. As funções de produção, obtidas por intermédio da regressão, apresentam a significância dos efeitos do nitrogênio e da lâmina de água em seus componentes lineares e quadráticos. Os coeficientes de determinação (R^2), obtidos da média de

tratamentos, foram 0,8684 e 0,8689 para as cultivares Brasília e Nantes, respectivamente, indicando um bom ajustamento das superfícies de resposta.

Nos Quadros 7 e 8, encontram-se os valores observados de produtividade de raízes comerciais da cenoura e, nos Quadros 9 e 10, os valores estimados pelas funções de produção; nas Figuras 14 e 15, são apresentadas as superfícies de resposta para produtividade de raízes comerciais obtidas para as cultivares Brasília e Nantes, respectivamente. A produtividade máxima de raízes comerciais, estimada em 40,98t ha^{-1}, para a cultivar Brasília, foi conseguida com lâmina total de água de 443,35mm e dose de nitrogênio de 171,52kg ha^{-1}, valor inferior ao valor máximo observado no tratamento W_4N_3, que foi de 42,09t ha^{-1}. Para a cultivar Nantes, a produtividade de raízes comerciais estimada foi de 57,91t ha^{-1}, utilizando a lâmina total de água aplicada de 438,05mm e de 173,39kg de N ha^{-1}, valor esse também inferior ao valor máximo observado de 61,13t ha^{-1} no tratamento W_4N_3.

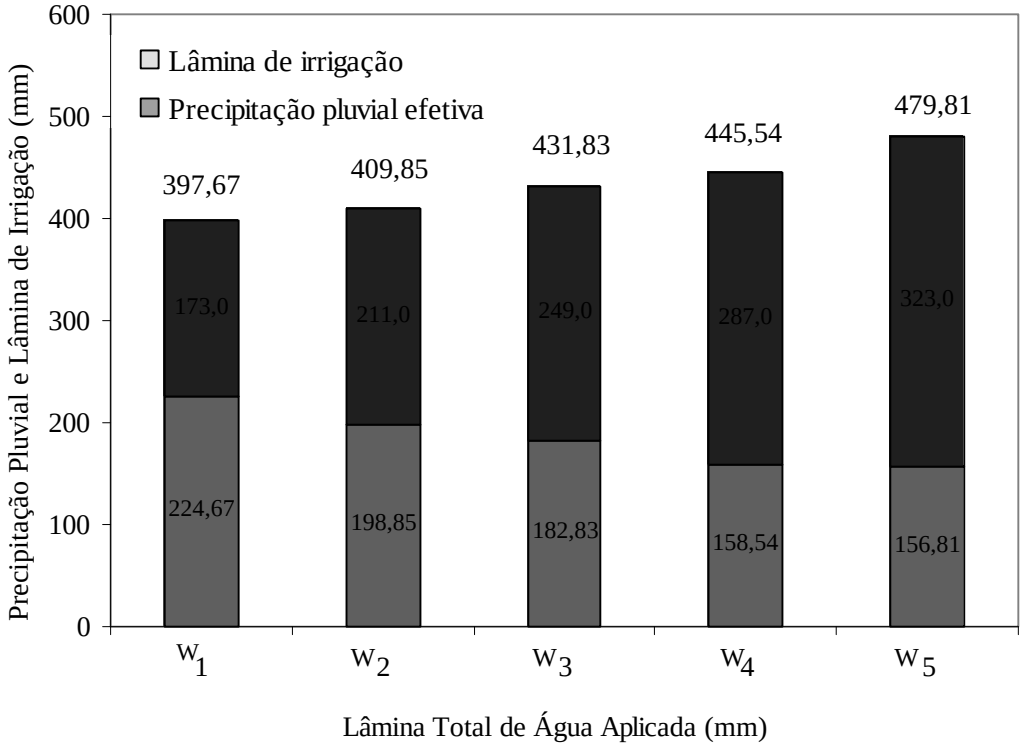

Figura 10 – Lâminas totais de água aplicadas durante o ciclo da cultivar Brasília.

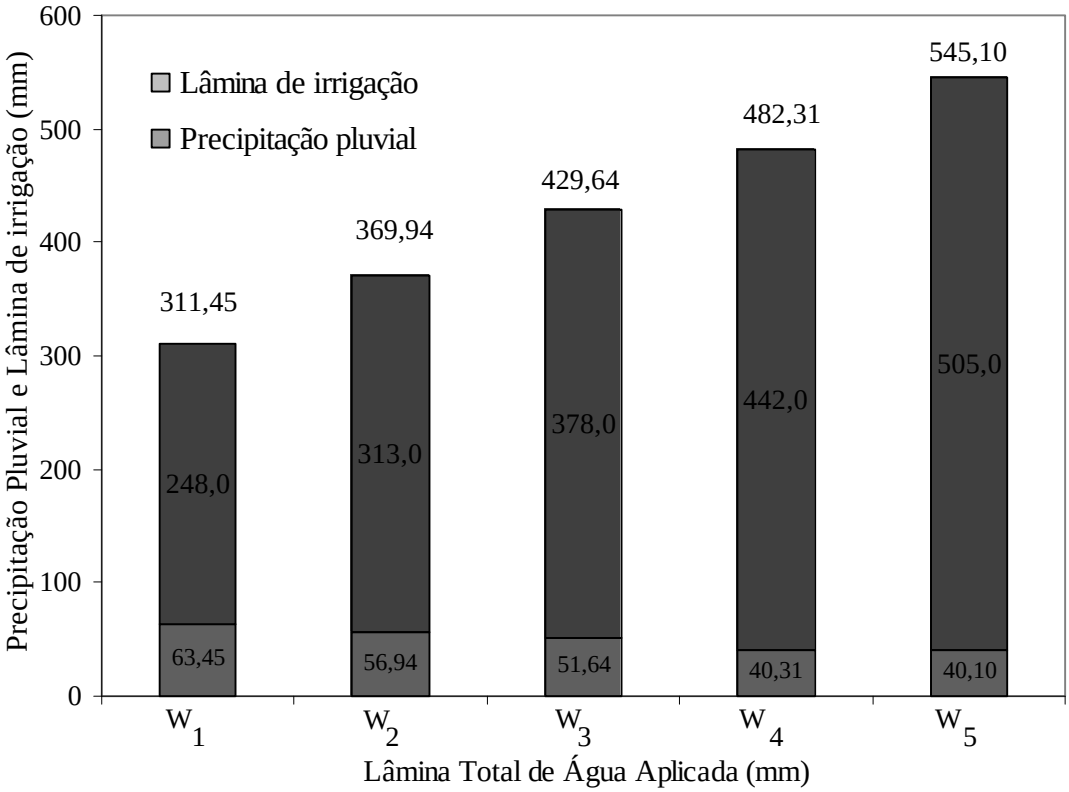

Figura 11 – Lâminas totais de água aplicadas durante o ciclo da cultivar Nantes.

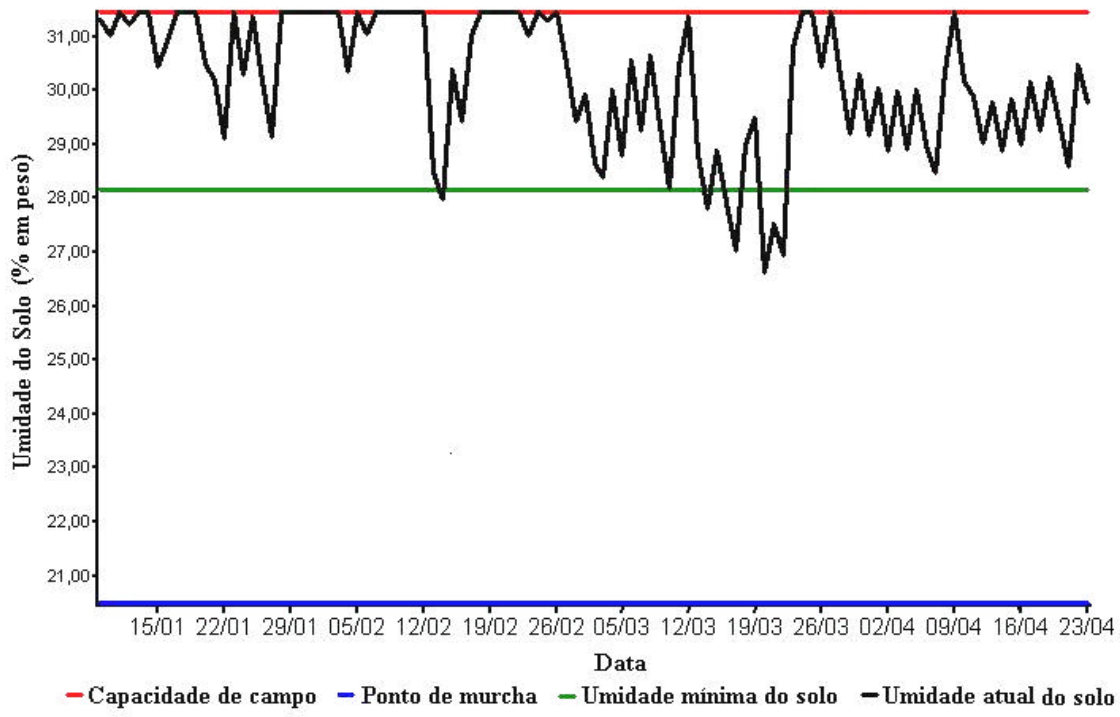

Figura 12 – Variação da umidade do solo durante o ciclo da cenoura, cultivar Brasília, do tratamento W_3N_2, apresentado pelo programa computacional SISDA.

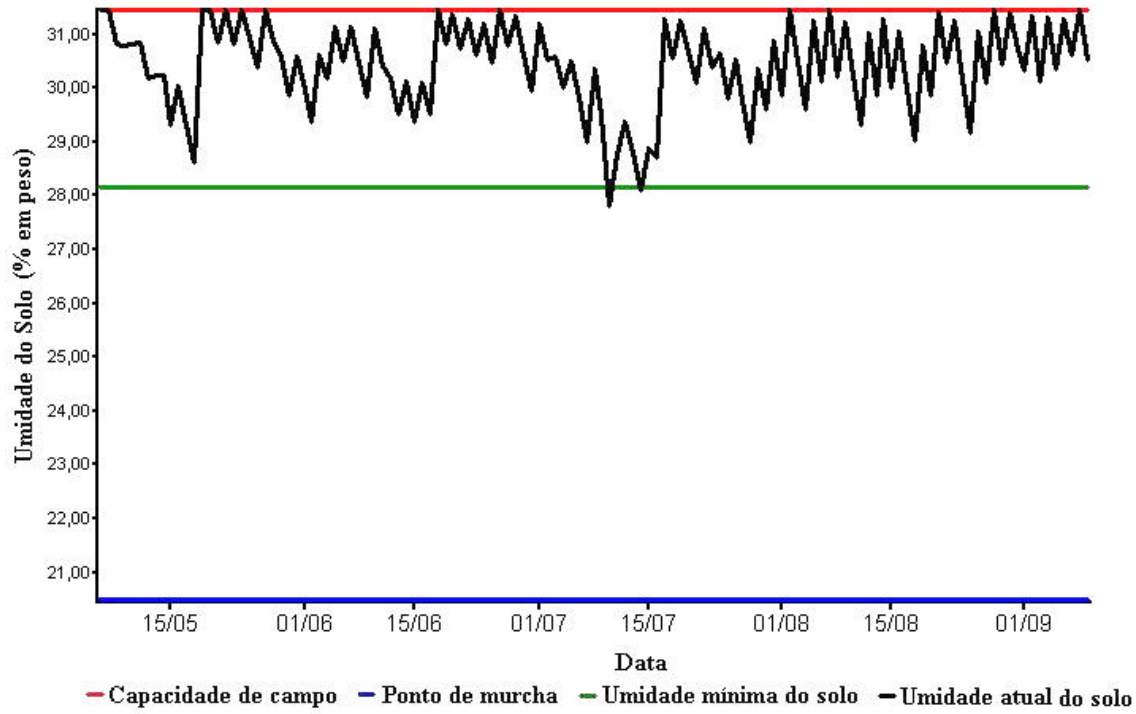

Figura 13 – Variação da umidade do solo durante o ciclo da cenoura, cultivar Nantes, do tratamento W_3N_2, apresentado pelo programa computacional SISDA.

Quadro 6 – Estimativas dos coeficientes do modelo de superfície de resposta de segunda ordem para estimar a produtividade comercial de raízes de cenoura das cultivares Brasília e Nantes em função de lâmina total de água aplicada (W) e de dose de nitrogênio (N).

Efeito	Coeficientes	Cultivar Brasília	Cultivar Nantes
	$_0$	- 445,345	- 40,0621
W	$_1$	$2,15083^{**}$	$3,71776 \times 10^{-1**}$
W^2	$_{11}$	$- 2,42567 \times 10^{-3**}$	$- 4,24358 \times 10^{-4**}$
N	$_2$	$1,11265 \times 10^{-1**}$	$1,90839 \times 10^{-1**}$
N^2	$_{22}$	$- 3,24354 \times 10^{-4**}$	$- 5,50321 \times 10^{-4**}$
	R^2	0,8684	0,8689
	F	$33,01^{**}$	$33,17^{**}$

** significativo em nível de 1% de probabilidade

Quadro 7 – Valores médios observados da produtividade de raízes comerciais da cenoura 'Brasília', em t ha^{-1}, para lâminas totais de água aplicada (W) e doses de nitrogênio (N). Rio Paranaíba, MG, 09.01 a 23.04.2002.

W (mm)	N (kg ha^{-1})				
	0	80	160	240	320
397,67	26,54	35,89	35,51	33,39	28,46
409,85	26,30	37,64	37,47	35,72	31,92
431,83	30,31	38,05	39,98	37,19	34,52
445,54	33,32	39,25	42,09	36,75	35,38
479,81	25,34	36,99	38,97	34,15	31,78

Quadro 8 - Valores médios observados da produtividade de raízes comerciais da cenoura 'Nantes', em t ha^{-1}, para lâminas totais de água aplicada (W) e doses de nitrogênio (N). Rio Paranaíba, MG, 06.05 a 09.09.2002.

W (mm)	N (kg/ha^{-1})				
	0	80	160	240	320
311,45	34,40	48,42	51,76	48,16	35,34
369,94	39,73	57,02	53,25	51,58	46,74
429,64	38,60	53,86	57,42	51,83	49,38
482,31	38,00	53,20	61,13	50,01	46,51
545,10	36,06	49,08	52,69	48,49	44,04

4.2.1. Preço do produto e dos fatores de produção

A cobrança pelo uso da água na bacia do Rio Paranaíba não está sendo efetivada, uma vez que o processo está em fase de regulamentação no Estado. Desse modo, o preço do fator água (P_W) foi composto pelos custos de depreciação do sistema de irrigação, energia para o bombeamento, manutenção e operação do sistema de irrigação e lâmina de água unitária. Os preços médios do fator água, durante o ciclo das cultivares Brasília e Nantes, foram de R\$0,52ha^{-1} mm^{-1} e R\$0,57ha^{-1} mm^{-1}, respectivamente. Esses cálculos encontram-se no Anexo C.

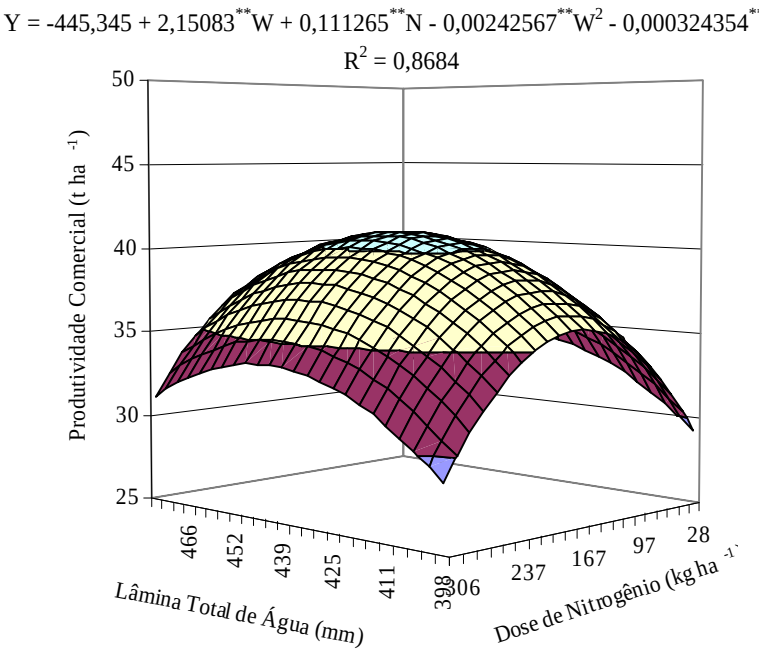

Figura 14 – Estimativa da produtividade de raízes comerciais da cenoura (*Dacus carota* L.), cultivar Brasília, em função de doses de nitrogênio e de lâminas totais de água aplicada. Rio Paranaíba, MG, 09.01 a 23.04.2002.

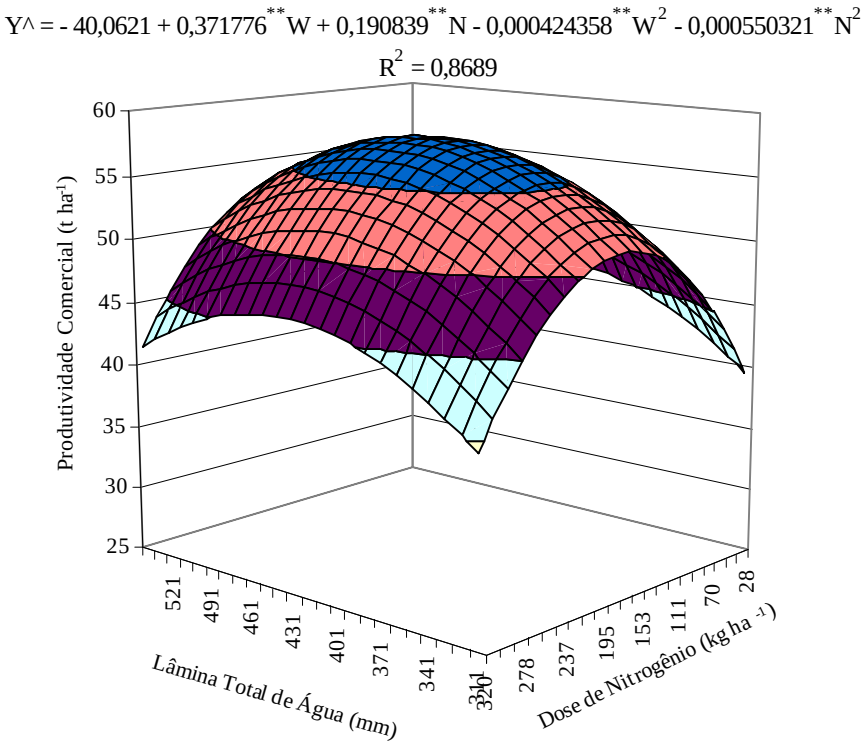

Figura 15 – Estimativa da produtividade de raízes comerciais da cenoura (*Dacus carota* L.), cultivar Nantes, em função de doses de nitrogênio e de lâminas totais de água. Rio Paranaíba, MG, 06.05 a 09.09.2002.

O preço do fator nitrogênio (P_N) foi composto pelos custos médios de aquisição do sulfato de amônio e de sua aplicação na região do Alto Paranaíba. Quanto ao preço do produto (P_Y), foi considerado o preço pago ao produtor pelas raízes de cenoura antes de serem lavadas e classificadas (cenoura suja) e o preço pago pela CEASA pelas raízes limpas, classificadas e selecionadas. No Quadro 9, encontram-se os preços pagos pelo fator nitrogênio (P_N) e pelo produto (P_Y) pela COOPADAP (raízes de cenoura suja) e pela CEASA de Belo Horizonte, MG (raízes de cenoura limpas, classificadas e selecionadas), durante o ano de 2002.

As raízes de cenoura são comercializadas durante todo o ano, sendo a cultivar Brasília comercializada na primavera-verão (janeiro, fevereiro, março, abril, maio, novembro e dezembro) e a cultivar Nantes no outono-inverno (junho, julho, agosto, setembro, outubro e novembro).

Quadro 9 – Preços médios mensais pagos aos produtores por tonelada de cenoura suja (P_Y) e aos comerciantes por tonelada de cenoura limpa, classificada e selecionada (Extra AAA, Extra AA e Extra A) e de nitrogênio (sulfato de amônio) (P_N) por kg.

Mês	P_Y[1] (R$ t^{-1})	Extra AAA[2] (R$ t^{-1})	Extra AA[2] (R$ t^{-1})	Extra A[2] (R$ t^{-1})	P_N[1] (R$ kg^{-1})
Janeiro	400,80	670,00	460,00	280,00	0,38
Fevereiro	526,60	770,00	560,00	360,00	0,40
Março	614,30	950,00	670,00	430,00	0,40
Abril	376,70	810,00	580,00	440,00	0,40
Maio	235,40	470,00	320,00	220,00	0,40
Junho	112,60	310,00	210,00	150,00	0,40
Julho	110,50	250,00	210,00	150,00	0,47
Agosto	179,80	360,00	240,00	180,00	0,47
Setembro	203,60	440,00	320,00	200,00	0,47
Outubro	85,60	370,00	260,00	220,00	0,43
Novembro	136,10	360,00	250,00	220,00	0,43
Dezembro	237,30	500,00	350,00	220,00	0,44

Fonte: [1]COOPADAP; [2] CEASA-Belo Horizonte, MG

4.2.2. Função de produção

Para se obter a lâmina de água e a dose de nitrogênio máximas físicas e econômicas, não fixando os níveis dos fatores, é necessário utilizar a metodologia de superfície de resposta. Para maximizar a superfície de resposta, deve-se calcular a derivada parcial em relação a qualquer dos fatores, produto físico marginal do fator, igualando-a a razão entre o preço do fator correspondente e o do produto, ou seja:

Para a cultivar Brasília

$$\hat{Y} = -445{,}345 + 2{,}15083 * W - 0{,}00242567 * W^2 + 0{,}111265 * N - \\ - 0{,}000324354 * N^2 \quad (67)$$

$$\frac{d\hat{Y}}{dW} = 2{,}15083 - 0{,}00485134 * W = \frac{P_W}{P_Y} \quad (68)$$

$$\frac{d\hat{Y}}{dN} = 0{,}111265 - 0{,}000648708 * N = \frac{P_N}{P_Y} \quad (69)$$

Para a cultivar Nantes

$$\hat{Y} = -40{,}0621 + 0{,}371776 * W - 0{,}000424358 * W^2 + 0{,}190839 * N - \\ - 0{,}000550321 * N^2 \quad (70)$$

$$\frac{d\hat{Y}}{dW} = 0{,}371776 - 0{,}000848716 * W = \frac{P_W}{P_Y} \quad (71)$$

$$\frac{d\hat{Y}}{dN} = 0{,}190839 - 0{,}001100642 * N = \frac{P_N}{P_Y} \quad (72)$$

Com os valores de P_W, P_N e P_Y, para os meses em que são comercializadas as cenouras das cultivares Brasília e Nantes, calculam-se os valores de lâmina total de água e da dose de nitrogênio que proporcionam a produtividade máxima econômica da cenoura, e a respectiva receita líquida (Quadros 10 e 11). A produtividade máxima econômica estimada para a cultivar Brasília é de 40,98t ha^{-1}, sendo obtida com a lâmina total de água de 443,17mm e uma dose de nitrogênio de 170,49kg ha^{-1} proporcionando a receita líquida de R$19.941,81 ha^{-1} para o mês de março. Para a cultivar Nantes colhida no mês de setembro, a produtividade máxima econômica estimada é de 57,90t ha^{-1}, obtida com uma lâmina de 434,75mm e 171,56kg de N ha^{-1}, e a renda líquida de R$6.539,63 ha^{-1}. Esses valores das doses dos fatores nitrogênio e lâmina total de irrigação são próximos dos valores que propiciam a produtividade física máxima. Isso indica que a irrigação deve ser feita de forma que garanta o desenvolvimento vegetativo da cultura sob condições ótimas de umidade e de nutrientes do solo.

As lâminas totais de irrigação e as doses de nitrogênio de máximo retorno econômico para as cenouras Brasília e Nantes não variaram muito durante o ano e estão próximas das lâminas e doses de nitrogênio que proporcionam a produtividade física máxima. Esse fato ocorre devido ao alto custo de produção da cenoura irrigada, em comparação com os custos referentes à adubação nitrogenada e à irrigação, tornando possível a produção da cenoura em seu potencial máximo. Resultado semelhante foi obtido por CARVALHO (1994).

Quadro 10 – Doses de nitrogênio (N) e produtividades máximas física (Y_{fis}) e econômica (Y_{eco}) nas lâminas totais de água, cultivar Brasília, Rio Paranaíba, MG.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Nov	Dez
P_Y[1]	400,80	526,60	614,30	376,70	235,40	136,10	237,30
P_W[2]	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
P_N[3]	0,38	0,40	0,40	0,40	0,40	0,43	0,44
				Produtividade Máxima Física			
W (mm)	443,35	443,35	443,35	443,35	443,35	443,35	443,35
N (kg ha^{-1})	171,52	171,52	171,52	171,52	171,52	171,52	171,52
Y_{fis} (t ha^{-1})	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98
RL[4]	**11.192,40**	**16.347,64**	**19.941,56**	**10.204,80**	**4.414,37**	**345,09**	**4.492,23**
				Produtividade Máxima Econômica			
W (mm)	443,08	443,14	443,17	443,06	442,89	442,56	442,90
N (kg ha^{-1})	169,94	170,32	170,49	169,84	168,84	166,88	168,86
Y_{eco} (t ha^{-1})	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98	40,97	40,98
RL	**11.192,80**	**16.347,94**	**19.941,81**	**10.205,21**	**4.415,04**	**346,25**	**4.492,90**

[1] preço do produto em R$ t^{-1}; [2] preço do fator água em R$ mm ha^{-1}; [3] preço do fator nitrogênio em R$ kg^{-1}; [4] receita líquida em R$ ha^{-1}

4.2.3. Taxa marginal de substituição técnica

A Taxa Marginal de Substituição Técnica (TMST) expressa a quantidade de um fator W de produção que será exatamente compensado por unidade adicional de outro fator N, ou vice-versa, tal que o nível de produção não varie. Nos Quadros 12 e 13, encontram-se os valores da TMST da lâmina total de água pela dose de nitrogênio ($TMST_{W/N}$), para as cenouras Brasília e Nantes, respectivamente.

Na região de produção racional, ou seja, aquela na qual os fatores podem ser substituídos para obtenção da mesma produtividade, a TMST é negativa. Nessa taxa, o nitrogênio está substituindo a água em proporção decrescente; por exemplo, na produtividade de 35t ha^{-1} de cenoura Nantes (Quadro 13), para cada

unidade de nitrogênio acrescentada (kg), pode-se economizar 1,84; 0,98; 0,59; 0,31 e 0,07 unidades de água (mm), nos limites das doses 0; 40; 80; 120 e 160 kg de N ha^{-1}, respectivamente.

Quadro 11 – Doses de nitrogênio (N) e produtividades máximas física (Y_{fis}) e econômica (Y_{eco}) nas lâminas totais de água, cultivar Nantes, Rio Paranaíba, MG.

	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov
P_Y[1]	112,60	110,50	179,80	203,60	85,60	136,10
P_W[2]	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
P_N[3]	0,40	0,47	0,47	0,47	0,43	0,43
	Produtividade Máxima Física					
W (mm)	438,05	438,05	438,05	438,05	438,05	438,05
N (kg ha^{-1})	173,39	173,39	173,39	173,39	173,39	173,39
Y_{fis} (t ha^{-1})	57,91	57,91	57,91	57,91	57,91	57,91
RL[4]	**1.268,51**	**1.146,90**	**5.151,04**	**6.538,32**	**- 295,06**	**2.620,38**
	Produtividade Máxima Econômica					
W (mm)	432,08	431,97	434,31	434,75	430,20	433,11
N (kg ha^{-1})	170,08	170,02	171,06	171,56	169,04	170,31
Y_{eco} (t ha^{-1})	57,89	57,89	57,90	57,90	57,88	57,90
RL	**1.270,89**	**1.149,32**	**5.152,65**	**6.539,63**	**- 291,93**	**2.622,50**

[1] preço do produto em R$ t^{-1}; [2] preço do fator água em R$ mm ha^{-1}; [3] preço do fator nitrogênio em R$ kg^{-1}; [4] receita líquida em R$ ha^{-1}

Analisando os Quadros 12 e 13, percebe-se que é maior a possibilidade de substituição do fator W pelo N nos níveis mais baixos de produtividade. Fato também observado por FRIZZONE (1987), trabalhando com feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivar carioca, e OLIVEIRA (1993), trabalhando com milho-doce (*Zea mays* L.) cultivar doce cristal (BR 402). Esse comportamento pode ser explicado pela exigência nutricional da cultura, na qual, para baixas produtividades, pequenas doses de nitrogênio são suficientes e, ao se adicionar esse nutriente, a fisiologia da planta permite a redução na quantidade do outro fator de produção, mantendo o mesmo nível de produtividade.

Quadro 12 – Combinações de lâminas totais de água e doses de nitrogênio e as correspondentes taxas marginais de substituição da água pelo nitrogênio, para níveis fixos de produtividade para a cenoura, cultivar Brasília. Rio Paranaíba, MG.

	Produtividade comercial (t ha^{-1})									
	20		25		30		35		40	
N (kg/ha)	W (mm)	TMS	W (mm)	TMS	W (mm)	TMS	W (mm)	TMS	W (mm)	TMS
0	375	-0,33	392	-0,45	419	-0,94	-	-	-	-
40	364	-0,22	378	-0,27	396	-0,37	431	-1,43	-	-
80	357	-0,14	369	-0,17	385	-0,21	407	-0,33	-	-
120	352	-0,08	364	-0,09	379	-0,11	397	-0,15	436	-0,98
160	350	-0,02	362	-0,02	376	-0,02	394	-0,03	424	-0,08
200	351	0,04	363	0,05	377	0,06	395	0,08	426	0,22
240	354	0,10	366	0,12	381	0,15	400	0,21	-	-
280	359	0,17	373	0,20	389	0,27	413	0,49	-	-
320	368	0,26	383	0,33	404	0,50	-	-	-	-

Para a obtenção de altas produtividades, por exemplo, 40 e 55t ha^{-1}, próximo aos limites das cultivares Brasília e Nantes, respectivamente, encontradas nas condições desta pesquisa, as exigências da cultura também são extremas, não permitindo qualquer variação nas quantidades de um dos fatores, com conseqüente redução no nível da produtividade.

Quadro 13 – Combinações de lâminas totais de água e doses de nitrogênio e as correspondentes taxas marginais de substituição da água pelo nitrogênio, para níveis fixos de produtividade para a cenoura, cultivar Nantes. Rio Paranaíba, MG.

	Produtividade (t ha^{-1})									
	35		40		45		50		55	
N (kg/ha)	W (mm)	TMS	W (mm)	TMS	W (mm)	TMS	W (mm)	TMS	W (mm)	TMS
0	316	-1,84	381	-3,96	-	-	-	-	-	-
40	262	-0,98	300	-1,25	352	-2,02	-	-	-	-
80	231	-0,59	262	-0,69	300	-0,88	352	-1,41	-	-
120	214	-0,31	242	-0,35	275	-0,42	316	-0,57	382	-1,23
160	206	-0,07	233	-0,08	264	-0,10	302	-0,13	357	-0,21
200	208	0,15	235	0,17	266	0,20	305	0,26	361	0,45
240	218	0,39	247	0,45	281	0,55	325	0,76	405	2,60
280	240	0,70	272	0,83	313	1,10	376	2,21	-	-
320	276	1,18	318	1,59	388	3,77	-	-	-	-

4.3. Função de produção para cenoura nas classes Extra A, AA e AAA

De acordo com a classificação das raízes de cenoura utilizada pela COOPADAP, nas classes Extra AAA, Extra AA e Extra A, ajustaram-se equações de regressão aplicando-se a metodologia de superfície de resposta aos dados de produtividade das cultivares Brasília e Nantes.

Nos Quadros 14 e 15, encontram-se as estimativas dos coeficientes de regressão ajustados aos dados de produtividade comercial das cenouras 'Brasília' e 'Nantes', respectivamente, classificadas como Extra AAA, AA e A, em função das lâminas totais de água e doses de nitrogênio aplicadas. Para as classes Extra AAA e Extra AA, cultivar Nantes, os modelos de superfície de resposta de segunda ordem adotados apresentaram os coeficientes de regressão significativos ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t e os coeficientes de determinação (R^2) de 0,8254 e 0,8635. A produtividade da classe Extra AA, cultivar Brasília, apresentou os coeficientes significativos ao nível de 20% de probabilidade pelo teste t para o efeito W e de 1% de probabilidade para o efeito N e R^2 igual a 0,7576. Para as duas cultivares estudadas, a classe Extra A, na qual se encontram as raízes mais finas e curtas, próximas do descarte, qualquer nível dos fatores água e nitrogênio dará uma produtividade média, pois ocorreu a falta de significância dos coeficientes de regressão, aplicando-se o teste t ao nível de até 20% de probabilidade, e baixo valor do R^2, ocorrendo o mesmo com a classe Extra AAA da cultivar Brasília. Assim, nas condições em que o experimento foi realizado, a produtividade média de 14,64t ha^{-1} e de 12,43t ha^{-1}, da classe Extra A, para as cultivares Brasília e Nantes, respectivamente, e de 2,98t ha^{-1} da classe Extra AAA da cultivar Brasília, pode ser considerada como a produtividade obtida para qualquer combinação dos fatores água e nitrogênio dentro da faixa estudada. Para essas classes de raízes de cenoura foi adotada a superfície de resposta de segunda ordem para análise estatística descritiva.

Os valores estimados para as três classificações das cenouras Brasília e Nantes estão nos Quadros 16 e 17. Analisando o Quadro 16, observa-se que grande parte das raízes da cenoura Brasília está enquadrada nas classes Extra AA

e A. Comparando-se os Quadros 16 e 17, observa-se que a cultivar Nantes produziu cerca de quatro vezes mais raízes na classe Extra AAA do que a cenoura Brasília. A análise dos Quadros 16 e 17 mostra, também, que a cultivar Nantes produziu raízes mais bem distribuídas nas três classes do que a cultivar Brasília. De acordo com VIEIRA et al. (1999) a temperatura é o fator climático mais importante para a produção de raízes de cenoura, ocorrendo estímulo para a formação de raízes curtas, grossas e com coloração deficiente quando em condições de temperatura média do ar superior a 21ºC. Nas condições experimentais, a cenoura 'Brasília' foi cultivada no verão com temperaturas mínima e máxima do ar médias iguais a 17,5ºC e 25,7ºC, respectivamente. A cenoura 'Nantes' foi cultivada no inverno com valores dessas temperaturas iguais a 14,1ºC e 24,6ºC, respectivamente. Segundo o mesmo autor, temperatura média do ar variando entre 10 e 15ºC favorecem o alongamento das raízes e o desenvolvimento de coloração característica.

Nas Figuras de 16 a 18 e de 19 a 21, são apresentadas as superfícies de resposta para os níveis dos fatores em estudo com os componentes lineares e quadráticos, para as cultivares Brasília e Nantes, respectivamente. A análise dessas figuras mostra comportamento semelhante ao da produção comercial das duas cultivares, com exceção da Extra A, para a cultivar Nantes, na qual a superfície de resposta apresenta um formato mais achatado com tendência para uma relação linear, resultando em baixo coeficiente de determinação.

Os Quadros 18 e 19 apresentam as produtividades máxima física e econômica da cenoura, considerando a produtividade comercial da cultura, e o seu desmembramento nas classes Extra AAA, Extra AA e Extra A, para as cultivares Brasília e Nantes, respectivamente. Na análise desses Quadros, observa-se que a lâmina total de água aplicada para obter as produtividades máxima física e econômica das raízes de cenoura comercial e das classificadas como Extra AAA, AA e A são praticamente iguais; o mesmo aconteceu na dose de nitrogênio para a produtividade máxima física. Para a produtividade máxima econômica, a dose de nitrogênio para as raízes de cenoura dessas classes foi inferior à produtividade comercial. Essa pequena diferença dos fatores lâmina total de água e dose de nitrogênio entre as produtividades máximas física e

econômicas deve-se ao alto valor comercial das raízes de cenoura e ao baixo custo relativo dos fatores estudados.

Quadro 14 – Estimativas dos coeficientes do modelo de superfície de resposta de segunda ordem para estimar a produtividade de cenoura da cultivar Brasília, para as classes Extra AAA, AA e A em função de lâmina total de água aplicada e dose de nitrogênio (N). Rio Paranaíba, MG.

Efeito	Coeficientes	Extra AAA	Extra AA	Extra A
	$_0$	- 139,302	- 208,281	-94,5471
W	$_1$	$6,43126\ x10^{-1*}$	$9,81296x10^{-1****}$	$5,08667\ x10^{-1ns}$
W^2	$_{11}$	$- 7,27544x10^{-4*}$	$- 1,08058x10^{-3****}$	$- 5,94511x10^{-4ns}$
N	$_2$	$1,26624x10^{-3***}$	$8,27617x10^{-2**}$	$1,49655x10^{-2ns}$
N^2	$_{22}$	$- 3,14088x10^{-5****}$	$- 2,51166x10^{-4**}$	$- 3,91706x10^{-5ns}$
	R^2	0,2649	0,7576	0,1257
	F	$1,80^{ns}$	$15,63^{**}$	$0,72^{ns}$

** – significativo em nível de 1% de probabilidade; * – significativo em nível de 5% de probabilidade;

*** – significativo em nível de 10% de probabilidade; **** – significativo em nível de 20% de probabilidade; ns – não significativo.

Quadro 15 – Estimativas dos coeficientes do modelo de superfície de resposta de segunda ordem para estimar a produtividade de cenoura da cultivar Nantes, para as classes Extra AAA, AA e A em função de lâmina total de água aplicada e dose de nitrogênio (N). Rio Paranaíba, MG.

Efeito	Coeficientes	Extra AAA	Extra AA	Extra A
	$_0$	- 33,6095	- 23,4749	12,8308
W	$_1$	$2,07164\ x10^{-1**}$	$1,95493\ x10^{-1**}$	$1,21608\ x10^{-2ns}$
W^2	$_{11}$	$- 2,44884\ x10^{-4**}$	$- 2,24887\ x10^{-4**}$	$- 2,26587\ x10^{-5ns}$
N	$_2$	$8,41794\ x10^{-2**}$	$9,27461\ x10^{-2**}$	$1,08373\ x10^{-3ns}$
N^2	$_{22}$	$- 2,41161\ x10^{-4**}$	$- 2,67241\ x10^{-4**}$	$- 3,20446\ x10^{-5ns}$
	R^2	0,8254	0,8635	0,1523
	F	$23,63^{**}$	$31,64^{**}$	$0,90^{ns}$

** – significativo em nível de 1% de probabilidade; ns – não significativo

Quadro 16 – Produtividades médias observadas das raízes de cenoura, cultivar Brasília classificada como Extra AAA, AA e A em t ha^{-1}, para doses de nitrogênio (N) e lâminas totais de água aplicadas(W). Rio Paranaíba, MG.

W	N (kg ha^{-1})				
(mm)	0	80	160	240	320
	Produtividade observada – Extra AAA				
397,67	1,95	3,80	1,82	1,30	2,36
409,85	0,89	4,21	4,28	3,25	1,85
431,83	2,81	1,03	4,01	5,69	3,25
445,54	3,84	2,70	5,38	2,91	4,38
479,81	1,98	0,68	4,79	2,91	3,60
	Produtividade observada – Extra AA				
397,67	12,12	16,95	19,39	15,38	10,69
409,85	12,16	15,85	18,90	17,50	15,10
431,83	12,40	19,28	19,39	18,43	12,74
445,54	14,59	21,03	24,73	21,23	14,35
479,81	12,98	19,96	18,53	21,23	18,39
	Produtividade observada – Extra A				
397,67	12,05	13,94	14,79	16,71	15,07
409,85	13,25	13,42	17,57	14,97	14,97
431,83	15,10	16,59	17,50	13,08	18,53
445,54	14,90	11,75	14,86	12,60	15,89
479,81	10,37	15,65	16,34	12,60	9,80

Quadro 17 – Produtividades médias observadas das raízes de cenoura, cultivar Nantes classificada como Extra AAA, em t ha^{-1}, para doses de nitrogênio (N) e lâminas totais de água aplicadas (W). Rio Paranaíba, MG.

W	N (kg ha^{-1})				
(mm)	0	80	160	240	320
	Produtividade observada – Extra AAA				
311,45	8,62	13,31	12,33	12,84	9,55
369,94	9,80	16,70	16,00	14,68	13,35
429,64	7,54	14,99	16,32	17,39	10,66
482,31	8,93	16,36	19,56	14,96	12,59
545,10	5,34	13,14	12,82	11,59	9,61
	Produtividade observada – Extra AA				
311,45	15,31	22,66	23,58	22,48	16,33
369,94	18,43	26,82	24,78	23,22	21,68
429,64	17,36	24,35	26,94	24,70	22,52
482,31	17,56	25,13	28,99	23,28	21,42
545,10	16,21	21,80	24,21	21,90	19,98
	Produtividade observada – Extra A				
311,45	8,91	12,46	14,99	12,84	9,06
369,94	11,51	13,49	11,70	11,36	11,28
429,64	13,10	12,47	14,16	9,74	16,21
482,31	11,51	11,70	12,58	11,08	11,79
545,10	14,51	11,53	15,21	13,77	13,80

Quadro 18 – Produtividades máximas física e econômica nas lâminas totais de água (W) e doses de nitrogênio (N) aplicadas, cultivar Brasília, Rio Paranaíba, MG.

	Mês	Parâmetros	Classificação da cenoura			
			Comercial	Extra AAA	Extra AA	Extra A
Produtividade Máxima Física		W (mm)	443,35	443,91	443,91	443,91
		N (kg ha^{-1})	171,52	171,58	171,58	171,58
		Y (t ha^{-1})	40,98	4,07	21,2	15,52
Produtividade Máxima Econômica	Janeiro	W (mm)	443,1	443,17	443,17	443,17
		N (kg ha^{-1})	169,94	166,96	166,96	166,96
		Y (t ha^{-1})	40,98	4,06	21,19	15,53
	Fevereiro	W (mm)	443,16	443,31	443,31	443,31
		N (kg ha^{-1})	170,32	167,84	167,84	167,84
		Y (t ha^{-1})	40,98	4,06	21,19	15,52
	Março	W (mm)	443,18	443,41	443,41	443,41
		N (kg ha^{-1})	170,49	168,47	168,47	168,47
		Y (t ha^{-1})	40,98	4,06	21,19	15,52
	Abril	W (mm)	443,08	443,37	443,37	443,37
		N (kg ha^{-1})	169,84	166,96	166,96	166,96
		Y (t ha^{-1})	40,98	4,06	21,2	15,52
	Maio	W (mm)	442,92	442,91	442,91	442,91
		N (kg ha^{-1})	168,84	165,33	165,33	165,33
		Y (t ha^{-1})	40,98	4,06	21,19	15,53
	Novembro	W (mm)	442,61	442,75	442,75	442,75
		N (kg ha^{-1})	166,88	163,48	163,48	163,48
		Y (t ha^{-1})	40,97	4,06	21,18	15,53
	Dezembro	W (mm)	442,92	442,95	442,95	442,95
		N (kg ha^{-1})	168,86	164,27	164,27	164,27
		Y (t ha^{-1})	40,98	4,06	21,19	15,52

Quadro 19 – Produtividades máximas física e econômica nas lâminas totais de água (W) e doses de nitrogênio (N) aplicadas, cultivar Nantes, Rio Paranaíba, MG.

	Mês	Parâmetros	Classificação da cenoura			
			Comercial	Extra AAA	Extra AA	Extra A
Produtividade Máxima Física		W (mm)	438,05	438,05	438,05	438,05
		N (kg ha^{-1})	173,39	173,39	173,39	173,39
		Y (t ha^{-1})	57,91	17,50	27,06	12,76
Produtividade Máxima Econômica	Junho	W (mm)	432,92	428,66	428,66	428,66
		N (kg ha^{-1})	170,08	168,15	168,15	168,15
		Y (t ha^{-1})	57,89	17,53	27,04	12,70
	Julho	W (mm)	432,39	428,23	428,23	428,23
		N (kg ha^{-1})	170,02	167,86	167,86	167,86
		Y (t ha^{-1})	57,89	17,53	27,04	12,69
	Agosto	W (mm)	434,57	429,84	429,84	429,84
		N (kg ha^{-1})	171,06	168,62	168,62	168,62
		Y (t ha^{-1})	57,90	17,53	27,05	12,71
	Setembro	W (mm)	434,98	430,99	430,99	430,99
		N (kg ha^{-1})	171,56	169,29	169,29	169,29
		Y (t ha^{-1})	57,9	17,53	27,05	12,71
	Outubro	W (mm)	430,75	430,61	430,61	430,61
		N (kg ha^{-1})	169,04	168,99	168,99	168,99
		Y (t ha^{-1})	57,88	17,53	27,05	12,71
	Novembro	W (mm)	433,46	430,48	430,48	430,48
		N (kg ha^{-1})	170,31	168,89	168,89	168,89
		Y (t ha^{-1})	57,90	17,53	27,05	12,71

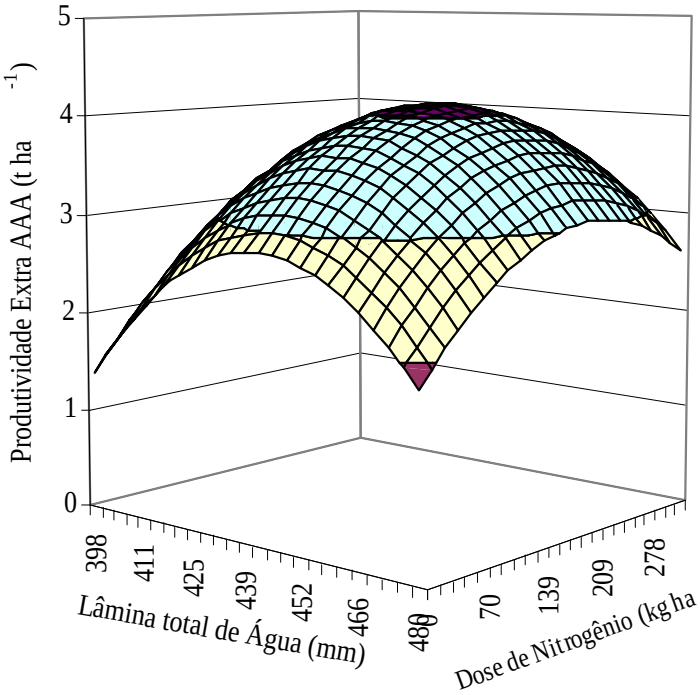

Figura 16 – Estimativa da produtividade da cenoura ‘Brasília’ classificada como Extra AAA, em função de doses de nitrogênio e de lâminas totais de água. Rio Paranaíba, MG.

$$Y = -208,281 + 0,981296^{****} W + 0,0827617^{**} N - 0,00108058^{****} W^2 - 0,000251166^{**} N^2$$

$$R^2 = 0,7576$$

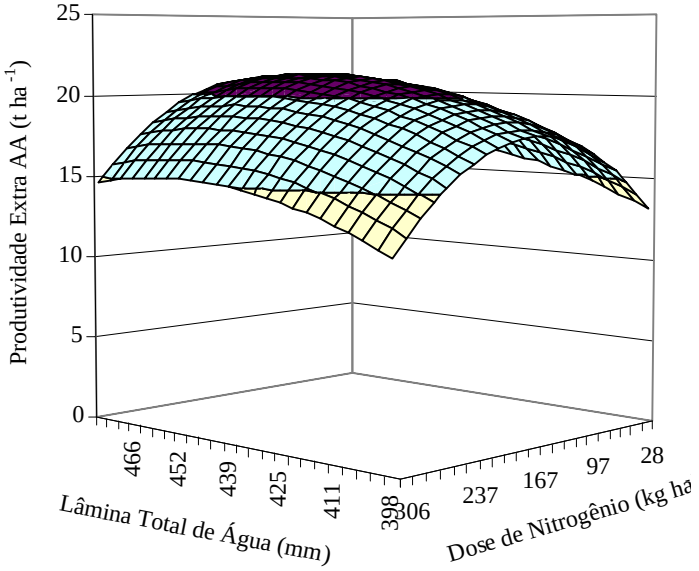

Figura 17 – Estimativa da produtividade da cenoura ‘Brasília’ classificada como Extra AA, em função de doses de nitrogênio e de lâminas totais de água. Rio Paranaíba, MG.

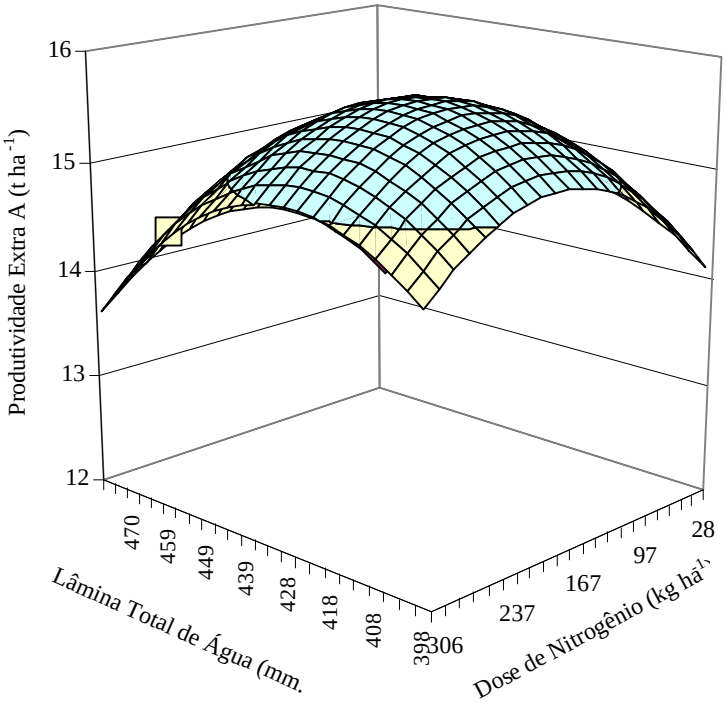

Figura 18 – Estimativa da produtividade da cenoura ‘Brasília’ classificada como Extra A, em função de doses de nitrogênio e de lâminas totais de água. Rio Paranaíba, MG.

$$Y = -33{,}6095 + 0{,}207164^{**}W + 0{,}0841794^{**}N - 0{,}000244884^{**}W^2 - 0{,}000241161^{**}N^2$$

$$R^2 = 0{,}8254$$

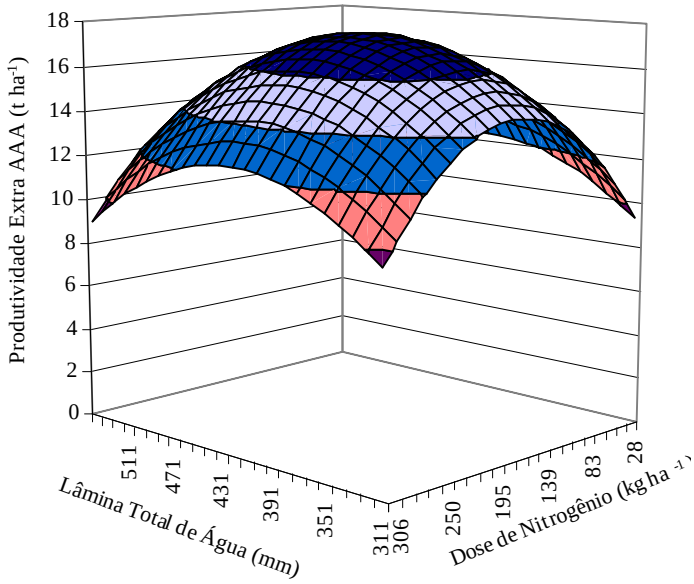

Figura 19 – Estimativa da produtividade da cenoura ‘Nantes’ classificada como Extra AAA, em função de doses de nitrogênio e de lâminas totais de água. Rio Paranaíba, MG.

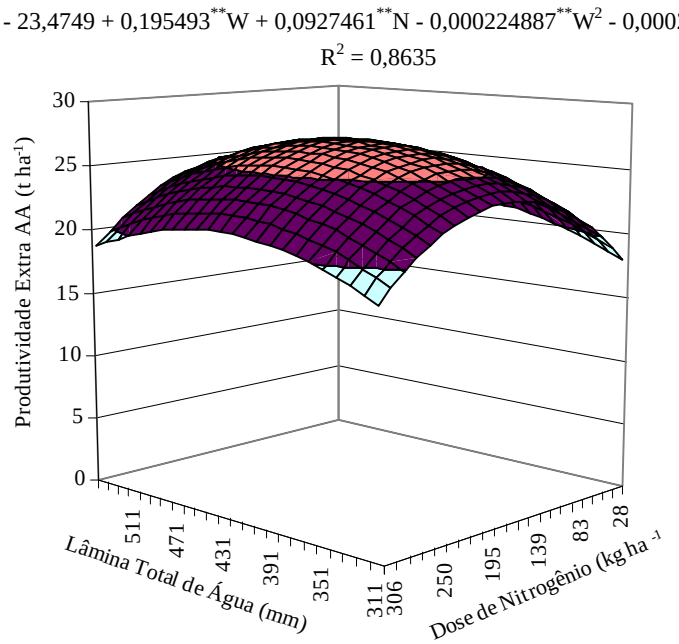

Figura 20 – Estimativa da produtividade da cenoura ‘Nantes’ classificada como Extra AA, em função de doses de nitrogênio e de lâminas totais de água. Rio Paranaíba, MG.

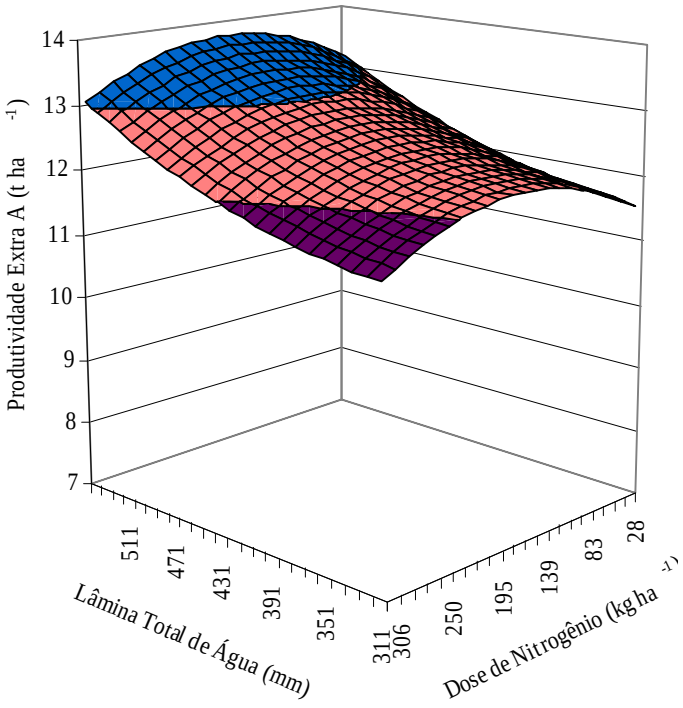

Figura 21 – Estimativa da produtividade da cenoura ‘Nantes’ classificada como Extra A, em função de doses de nitrogênio e de lâminas totais de água. Rio Paranaíba, MG.

4.4. Estratégias ótimas de irrigação

4.4.1. Sob restrição de água

Nos Quadros 20 e 21, encontram-se os intervalos de manejo racional de água para a cenoura, cultivares Brasília e Nantes, respectivamente. São considerados os aspectos econômicos da irrigação com déficit, visando à necessidade de otimização dos recursos hídricos disponíveis para maximizar a receita líquida (RL) por unidade de volume de água utilizado. O intervalo de manejo racional de água é delimitado pela lâmina de água aplicada equivalente (Wwe) que corresponde à lâmina que proporciona uma receita líquida igual à lâmina de água máxima (Wmax), e, entre elas, encontra-se a lâmina de água ótima (Ww^*) que corresponde à lâmina de água que proporciona a máxima receita líquida por unidade de volume de água aplicado, para um dado preço do produto (P_Y) e um dado preço da água (P_W) (ENGLISH, 1990; FRIZZONE, 1998). Foram levados em conta os meses em que as duas cultivares de cenoura são comercializadas, com a dose de nitrogênio que promove o maior retorno econômico, preço da água de irrigação para pivô de 80 ha (P_W) e a soma dos custos fixos e independentes da irrigação (C).

Observa-se, nesses Quadros, que os intervalos de manejo racional de água estão diretamente relacionados com o preço do produto (P_Y), ou seja, quanto menor for o seu valor menor será o intervalo de manejo indicando para que se consiga produzir próximo da produtividade máxima física, isto é, aplicando-se a lâmina de água máxima (Wmax).

Nas Figuras 22 e 23, estão plotadas as lâminas Wmax, Ww^* e Wwe das cultivares Brasília e Nantes, respectivamente. Observa-se que a lâmina de água ótima para o manejo da irrigação depende do preço do produto; na medida em que P_Y aumenta Ww* diminui; comportamento similar acontece com Wwe. Com aumento de P_Y, os valores de Wwe tendem a distanciar-se de Ww*, aumentando

o intervalo de manejo racional de água. Os valores de W_w* para diferentes valores de P_Y indicam que, estando o preço do produto elevado, é recomendável economizar água para aumentar a área cultivada, com conseqüente aumento da produção. No entanto, um P_Y baixo indica que não é recomendável aumentar a produção, devendo a água disponível ser utilizada na área já cultivada, sem incremento da área de cultivo.

Quadro 20 – Valores das lâminas máxima (Wmax), ótima (Ww*) e equivalente (Wwe) em função do preço do produto (P_Y), dos custos fixos e independentes da irrigação (Co) e do preço da água de irrigação para um pivô de 80 ha (P_W), para a cenoura 'Brasília', durante os períodos de janeiro a maio e novembro e dezembro de 2002.

	P_Y (R\$ t^{-1} ha^{-1})	Co (R\$ ha^{-1})	P_W (R\$ mm^{-1} ha^{-1})	Wmax (mm)	Ww* (mm)	Wwe (mm)
Jan	400,80	5267,20	0,49	443,35	430,22	417,47
Fev	526,60	5276,39	0,49	443,35	428,71	414,56
Mar	614,30	5276,76	0,49	443,35	428,03	413,23
Abr	376,70	5275,39	0,49	443,35	430,63	418,27
Mai	235,40	5273,22	0,49	443,35	434,63	426,08
Nov	136,10	5308,85	0,49	443,35	442,44	441,53
Dez	237,30	5346,79	0,49	443,35	434,69	426,20

Nas Figuras 24 e 25, são apresentadas as variações na receita líquida (R\$ $m^{-3}ha^{-1}$) em função da lâmina total de irrigação (mm) para diferentes valores de P_Y com dose de nitrogênio que resulta na produtividade máxima econômica das cultivares Brasília e Nantes, respectivamente. A análise dessas figuras permite observar que baixos valores de P_Y levam a receita líquida a tornar-se muito pequena ou até negativa, qualquer que seja o valor da lâmina de irrigação; por exemplo, P_Y = R\$136,10t^{-1} ha^{-1} e P_Y = R\$85,60t^{-1} ha^{-1} para as cultivares Brasília e Nantes, respectivamente. Desse modo, nas condições analisadas, P_Y de R\$136,10t^{-1} ha^{-1} e R\$100,00t^{-1} ha^{-1} podem ser considerados como um valor mínimo na análise de decisão sobre a viabilidade econômica da irrigação, para as cultivares Brasília e Nantes, respectivamente.

Na Figura 25, pode-se observar que, para os diferentes valores de P_Y, um mesmo incremento de lâmina de água proporciona efeitos diferentes em termos

de receita líquida. Até atingir Ww* obtém-se um incremento da receita líquida, ocorrendo sua diminuição no caso da aplicação de lâminas superiores. No caso de um valor elevado de P_Y, o decrescimento na receita líquida é mais acentuado, porém o seu valor é superior ao que seria obtido com valores de P_Y mais baixos.

Quadro 21 – Valores das lâminas máxima (Wmax), ótima (Ww*) e equivalente (Wwe) em função do preço do produto (P_Y), dos custos fixos e independentes da irrigação (Co) e do preço da água de irrigação para um pivô de 80 ha (P_W), para a cenoura 'Nantes', durante o período de junho a novembro de 2002.

	P_Y (R$ t^{-1} ha^{-1})	Co (R$ ha^{-1})	P_W (R$ mm^{-1} ha^{-1})	Wmax (mm)	Ww* (mm)	Wwe (mm)
Jun	112,60	5.280,10	0,53	438,05	407,35	378,80
Jul	110,50	5.279,98	0,53	438,05	409,92	383,60
Ago	179,80	5.324,88	0,53	438,05	353,82	285,79
Set	203,60	5.326,03	0,53	438,05	342,11	267,18
Out	85,60	5.320,23	0,53	438,05	449,40	438,05
Nov	136,10	5.323,15	0,53	438,05	384,17	336,93

4.4.2. Sob restrição de terra

Nos Quadros 22 e 23, encontram-se os intervalos de manejo racional de água para cenoura, cultivares Brasília e Nantes, respectivamente, considerando os aspectos econômicos da irrigação com déficit sendo a disponibilidade de terra limitante da produção. Assim, a estratégia ótima de irrigação consiste em maximizar a receita líquida por unidade de área, levando-se em conta a época de comercialização da cenoura com a dose de nitrogênio que promova o maior retorno econômico, o preço da água de irrigação para um pivô de 80ha (P_W) e a soma dos custos fixos e independentes da irrigação (Co). Como no item anterior, o intervalo de manejo racional de água é delimitado pela lâmina de água aplicada equivalente (Wte), que corresponde à lâmina que proporciona uma receita líquida igual à lâmina de água máxima (Wmax), e a Wmax, entre elas encontra-se a lâmina de água ótima (Wt^*) que corresponde à lâmina de água que proporciona a máxima receita líquida por unidade de área disponível, para um dado preço do

produto (P_Y) e um dado preço da água (P_W) (ENGLISH, 1990; FRIZZONE, 1998).

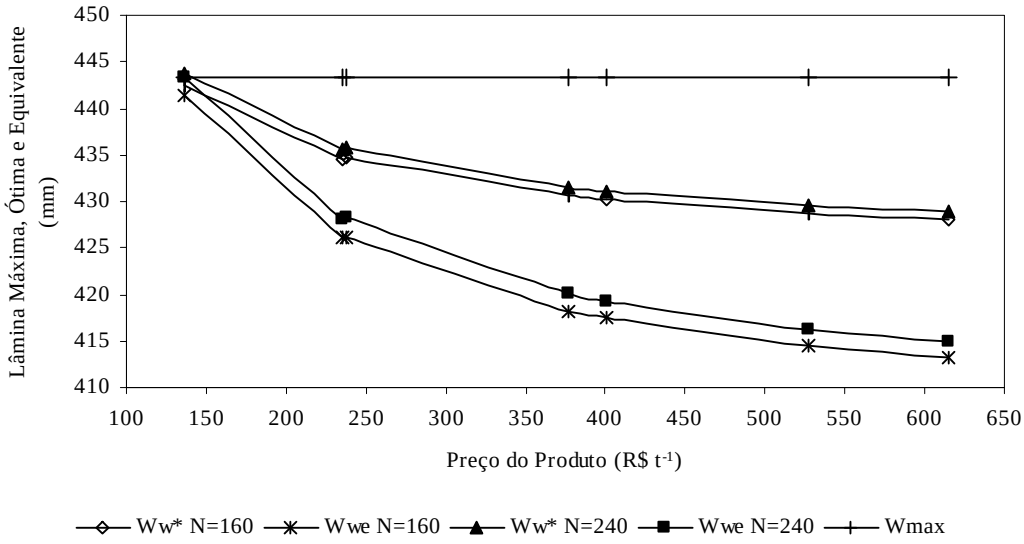

Figura 22 – Lâminas de água total máxima (Wmax), ótima (Ww*) e equivalente (Wwe), em função do preço do produto (P_Y), com doses de 160 e 240 kg de N ha^{-1}, cultivar Brasília, considerando a água como fator limitante da produção.

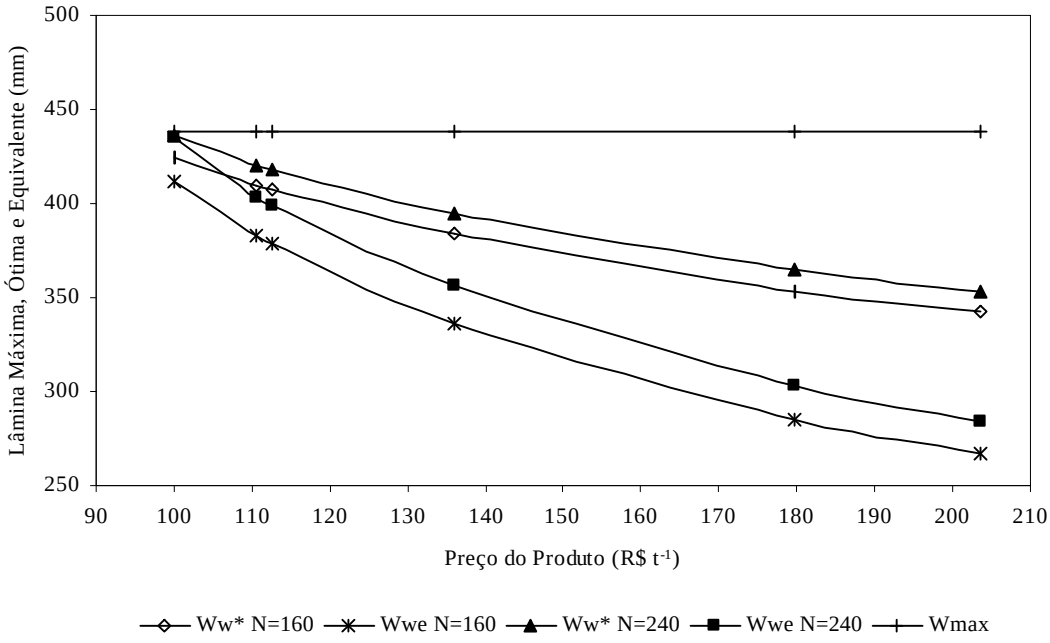

Figura 23 – Lâminas de água total máxima (Wmax), ótima (Ww*) e equivalente (Wwe), em função do preço do produto (P_Y), com doses de 160 e 240 kg de N ha^{-1}, cultivar Nantes, considerando a água como fator limitante da produção.

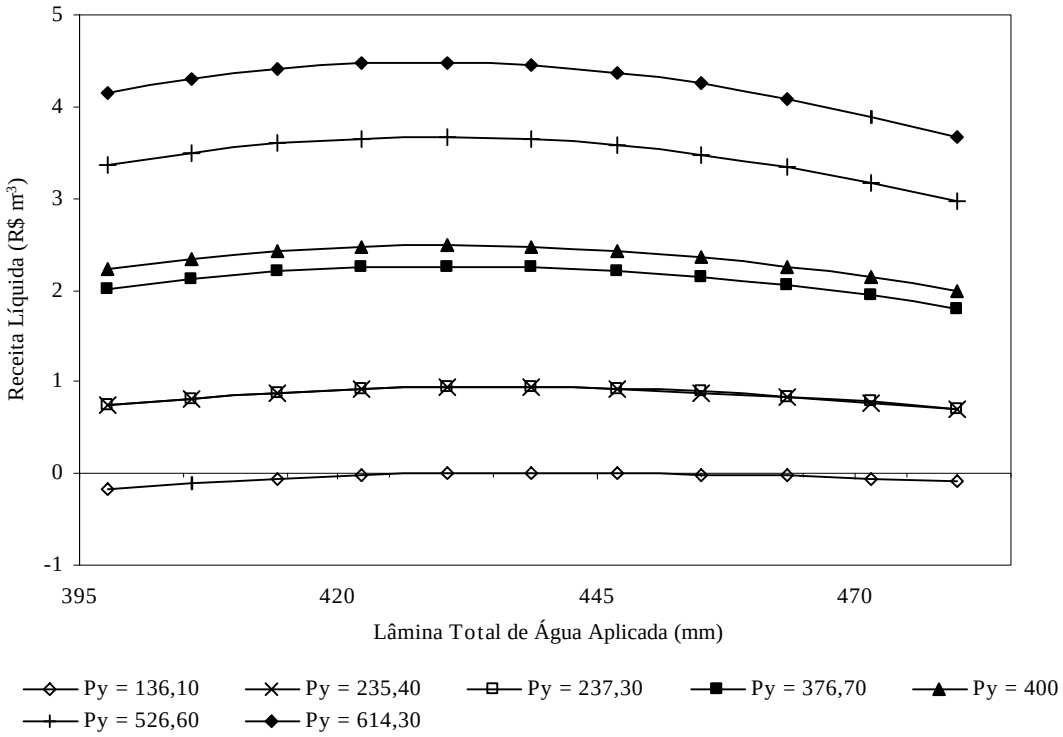

Figura 24 – Receita líquida em função da lâmina total de água e do preço do produto, com dose de nitrogênio que resulta na produtividade máxima econômica, cultivar Brasília, considerando a água como fator limitante da produção.

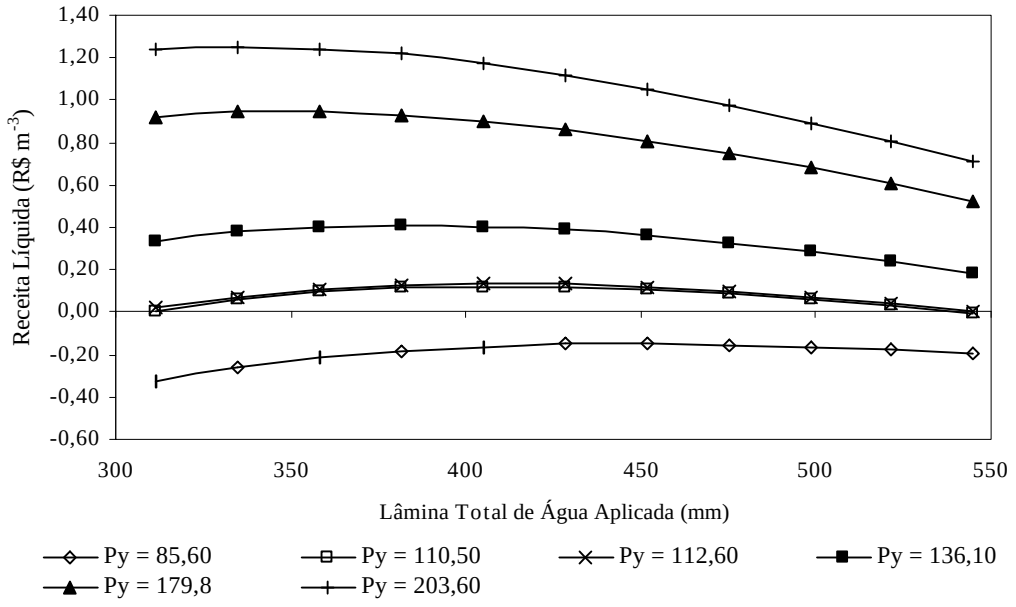

Figura 25 – Receita líquida em função da lâmina total de água e do preço do produto, com dose de nitrogênio que resulta na produtividade máxima econômica, cultivar Nantes, considerando a água como fator limitante da produção.

Quadro 22 – Valores das lâminas máxima (Wmax), ótima (Wt*) e equivalente (Wte) em função do preço do produto (P_Y), dos custos fixos e independentes da irrigação (Co) e do preço da água de irrigação para um pivô de 80 ha (P_W), para a cenoura 'Brasília'.

	P_Y (R$ t^{-1} ha^{-1})	Co (R$ ha^{-1})	P_W (R$ mm^{-1} ha^{-1})	Wmax (mm)	Wt* (mm)	Wte (mm)
Jan	400,80	5267,20	0,49	443,35	443,08	442,80
Fev	526,60	5276,39	0,49	443,35	443,14	442,93
Mar	614,30	5276,76	0,49	443,35	443,17	442,99
Abr	376,70	5275,39	0,49	443,35	443,06	442,77
Mai	235,40	5273,22	0,49	443,35	442,88	442,42
Nov	136,10	5308,85	0,49	443,35	442,54	441,74
Dez	237,30	5346,79	0,49	443,35	442,89	442,43

Nas Figuras 26 e 27, estão plotadas as lâminas Wmax, Wt^* e Wte das cultivares Brasília e Nantes, respectivamente. Observa-se, nessas figuras, que, quando se considera a terra como fator limitante da produção, a lâmina ótima para o manejo da irrigação depende do preço do produto, isto é, na medida em que P_Y aumenta Wt* também aumenta; comportamento similar acontece com Wte, diminuindo o intervalo de manejo racional de água. Os valores de Wt* para diferentes valores de P_Y indicam que, estando o preço do produto elevado, é recomendável produzir próximo da produtividade máxima física, tirando o máximo rendimento da área. No entanto, um P_Y baixo indica que não é recomendável aumentar a produtividade.

Quadro 23 – Valores das lâminas máxima (Wmax), ótima (Wt*) e equivalente (Wte) em função do preço do produto (P_Y), dos custos fixos e independentes da irrigação (Co) e preço da água de irrigação para um pivô de 80 ha (P_W), para a cenoura 'Nantes'.

	P_Y (R$ t^{-1} ha^{-1})	Co (R$ $há^{-1}$)	P_W (R$ mm^{-1} ha^{-1})	Wmax (mm)	Wt* (mm)	Wte (mm)
Jun	112,60	5280,10	0,53	438,05	432,50	426,95
Jul	110,50	5279,98	0,53	438,05	432,39	426,74
Ago	179,80	5324,88	0,53	438,05	434,57	431,10
Set	203,60	5326,03	0,53	438,05	434,98	431,91
Out	85,60	5320,23	0,53	438,05	430,75	423,45
Nov	136,10	5323,15	0,53	438,05	433,46	428,87

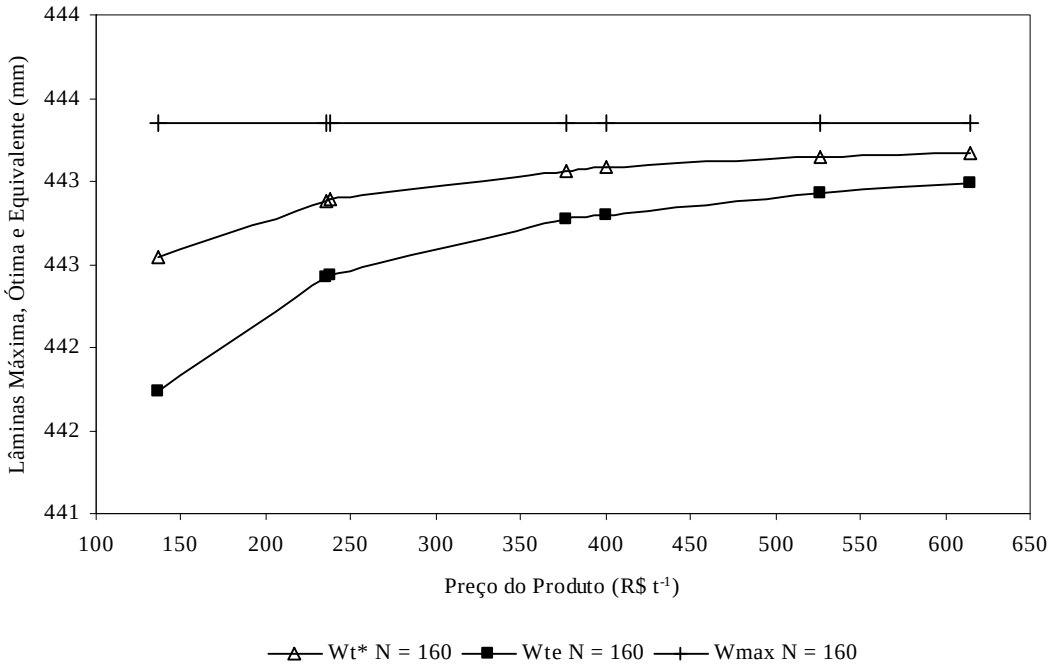

Figura 26 – Lâminas de água total máxima (Wmax), ótima (Wt*) e equivalente (Wte), em função do preço do produto (P_Y), com dose de 160 kg/ha^{-1} de nitrogênio, cultivar Brasília, considerando a terra como fator limitante da produção.

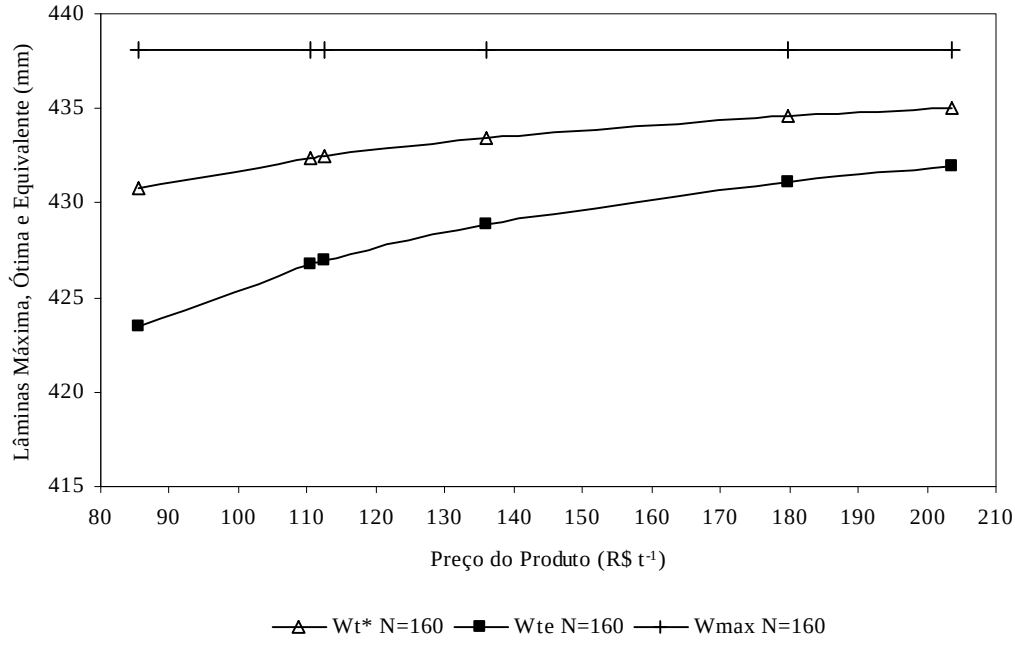

Figura 27 – Lâmina de água total máxima (Wmax), ótima (Wt*) e equivalente (Wte), em função do preço do produto (P_Y), com dose de 160 kg ha^{-1} de nitrogênio, cultivar Nantes, considerando a terra como fator limitante da produção.

Considerando que RL(W) possui um máximo e que o insumo água é o único fator variável, foram obtidos os produtos físicos marginais da água para a dose de nitrogênio de maior retorno econômico, para as duas cultivares, Brasília e Nantes, respectivamente:

$$\hat{Y}(W) = -435846{,}0 + 2150{,}83\,W - 2{,}42567\,W^2 = \frac{P_W}{P_Y} \qquad (73)$$

$$\hat{Y}(W) = -23616{,}05 + 371{,}776\,W - 0{,}42436\,W^2 = \frac{P_W}{P_Y} \qquad (74)$$

em que,

$\hat{Y}$ = produtividade da cultura estimada, kg/ha^{-1}.

Convém ressaltar que foi necessário fazer um ajuste de unidades nos parâmetros da equação e no preço do produto para realizar esta análise, isto é, a produtividade estimada da cenoura está em kg ha^{-1} e o preço do produto em centavos, por exemplo, no mês de março, a cenoura foi vendida a R\$0,61kg^{-1}.

As Figuras 28 e 29 representam os valores obtidos de receita líquida (RL) em função da lâmina total de água (W), para diferentes relações P_W/P_Y, para as cenouras 'Brasília' e 'Nantes', respectivamente. Observa-se ampla variação na receita líquida em função dessas relações. Na medida em que essa relação aumenta, ocorre diminuição na receita líquida, que pode atingir valores sempre negativos para valores elevados de P_W/P_Y. Nas condições em que foi realizada esta pesquisa, podem ser tomados como referenciais de tomada de decisão, quanto à viabilidade econômica da irrigação, os valores de P_W/P_Y = 3, para 'Brasília', e de P_W/P_Y = 4, para 'Nantes'. Assim, a condição na qual a relação P_W/P_Y é menor que 3 e 4 é um indicativo da viabilidade econômica do uso da irrigação, para as cultivares Brasília e Nantes, respectivamente. Observa-se ainda que a aplicação de lâminas crescentes até Wt* proporciona incremento de receita líquida, que será tanto maior quanto menor for a relação P_W/P_Y, e que, para valores acima de Wt*, ocorre uma diminuição na receita líquida.

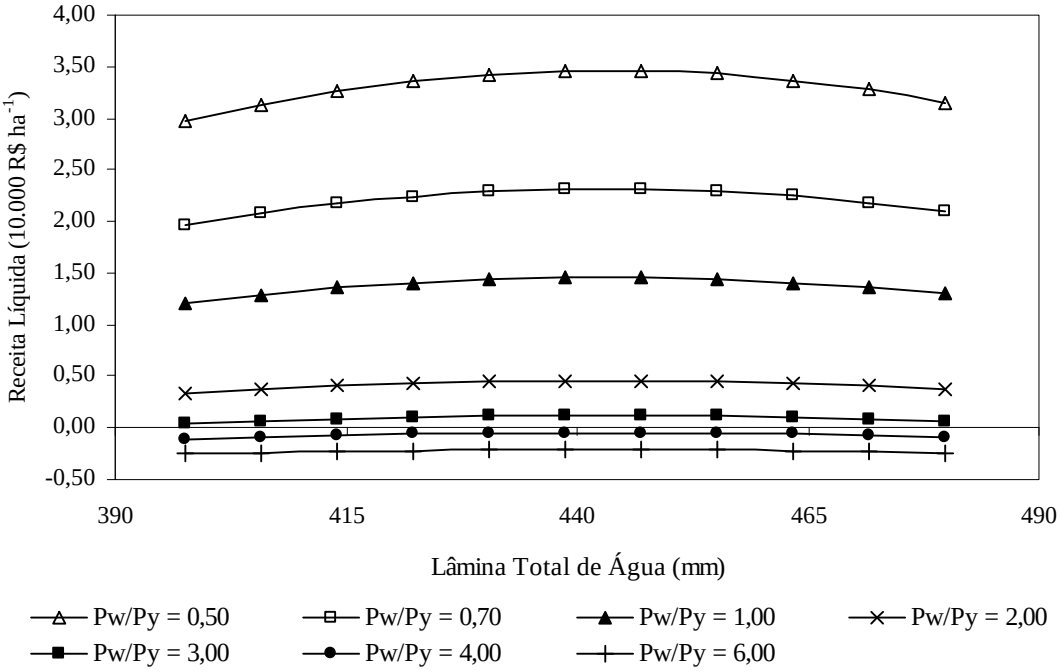

Figura 28 – Receita líquida em função de P_W/P_Y e da lâmina total de água, para a cultivar Brasília.

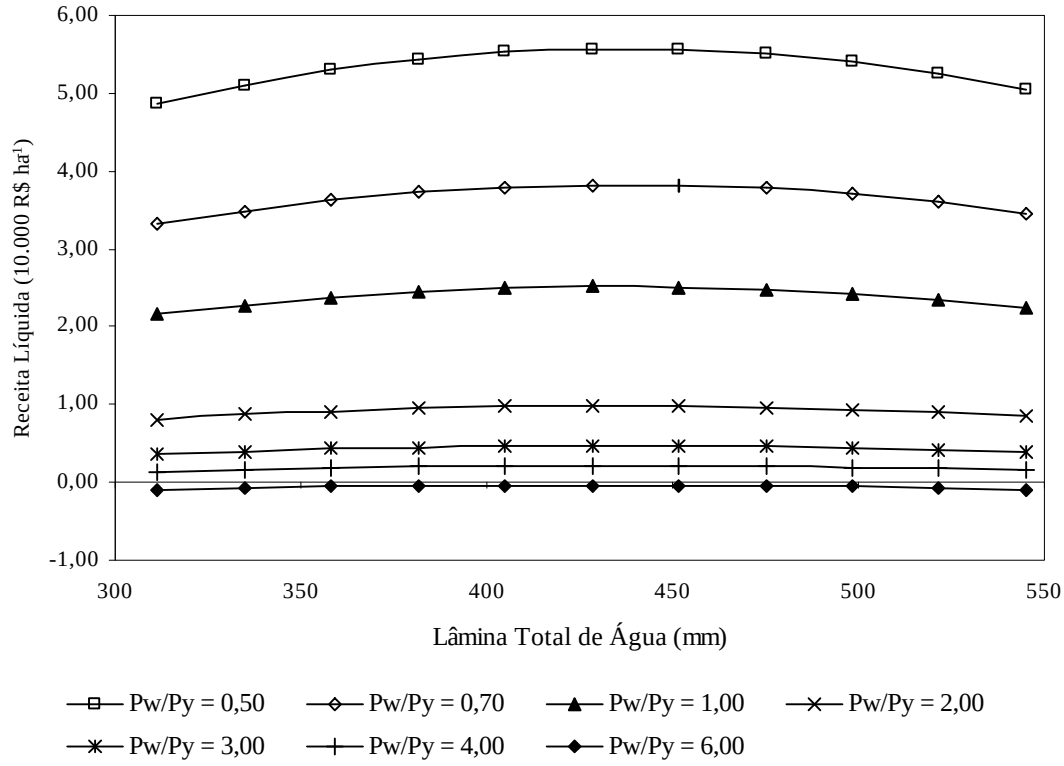

Figura 29 – Receita líquida em função de P_W/P_Y e da lâmina total de água, para a cultivar Nantes.

4.5. Estimativa do coeficiente de cultura

No Quadro 24, encontram-se os valores da evapotranspiração da cultura de referência (ETo), estimada pelo método de Penman-Monteith, e do coeficiente de cultura da cenoura, cultivares Brasília e Nantes, nos três estádios de desenvolvimento, obtidos seguindo-se a metodologia proposta no Boletim FAO 56 (ALLEN et al., 1998). Os valores foram totalizados para períodos de 10 dias e expressos em mm de lâmina de água. O valor de Kc sempre esteve próximo da unidade, em razão da alta freqüência da irrigação, que foi diária até o estabelecimento da cultura, passando para um turno de rega de dois dias e, finalmente, de três dias, um mês antes da colheita, conforme recomendação de MAROUELLI e SILVA (1998) para a cultura da cenoura e de BERNARDO (2002) para o sistema de irrigação do tipo pivô central.

Nas Figuras 31 e 32, é mostrada a variação do Kc ao longo do ciclo da cultura para as cultivares Brasília e Nantes. Observa-se que, devido à alta freqüência da irrigação e da precipitação pluvial no período de primavera-verão, os valores do Kc ajustado ficaram sempre próximos da unidade.

Para dividir o ciclo da cultura da cenoura em três estádios de desenvolvimento, de acordo com os parâmetros propostos por DOORENBOS e PRUITT (1975), a cultura foi fotografada semanalmente, com vistas à posterior determinação do sombreamento do solo, ao qual se chegou com o crescimento da área foliar, utilizando o programa MATLAB R12 pelo método interativo. Na Figura 32, são mostradas a foto normal da cultura e a mesma em contraste para determinação do sombreamento, para a cultivar Nantes. As durações dos estádios de desenvolvimento da cultura, para as cultivares Brasília e Nantes, respectivamente, foram assim divididos: estádio inicial (da semeadura até 10% da cobertura do solo) = 28 e 35 dias; estádio I (de 10% de cobertura do solo até 80% de cobertura do solo) = 30 e 35 dias e estádio II (de 80% de cobertura do solo até a colheita) = 49 e 55 dias, respectivamente.

No Quadro 25, encontram-se os valores de coeficiente de cultura da cenoura, para as cultivares Brasília e Nantes, nos três estádios de

desenvolvimento, encontrados em diferentes fontes de literatura e determinados no presente estudo conforme FAO 56. As diferenças entre os valores de Kc podem ser em decorrência do manejo da irrigação, clima do local onde foram determinados e a da cultivar utilizada no experimento.

Os valores médios de Kc, ajustados para os estádios de desenvolvimento da cultura, obtidos nas condições em que se realizou este experimento, para os cultivares Brasília e Nantes, respectivamente, foram: estádio inicial (da semeadura até 10% da cobertura do solo) = 1,07 e 1,07; estádio I (de 10% de cobertura do solo até 80% de cobertura do solo) = 1,14 e 1,13 e estádio II (de 80% de cobertura do solo até a colheita) = 1,10 e 1,09. A metodologia proposta no Boletim FAO 56 leva em consideração o umedecimento da camada superficial do solo, afetando as estimativas do Kc dos dois primeiros estádios, em comparação com os outros resultados que foram baseados no Boletim FAO 24.

No transcorrer dos estádios inicial e de crescimento da cultura, o manejo da irrigação foi conduzido com turno de rega de dois dias até o desbaste, efetuado aos 40 dias após o plantio. Assim, a superfície do solo permaneceu úmida e relativamente exposta nesse período, aumentando o valor do coeficiente de evaporação do solo (Ke) e mantendo o coeficiente de estresse hídrico (Ks) igual à unidade; isto contribuiu para que o valor do coeficiente Kc, determinado com aplicação da metodologia FAO 56, fosse maior que o Kc médio estimado de acordo com a metodologia recomendada no Boletim FAO 24, como pode ser observado nas Figuras 30 e 31. Nessas Figuras, a curva Kcb corresponde aos valores mínimos da evapotranspiração da cultura para condições adequadas de umidade do solo. As elevações bruscas que ocorrem na curva Kcb + Ke correspondem aos períodos nos quais ocorreu irrigação ou chuva, umedecendo a superfície do solo e aumentando, temporariamente, o valor da evapotranspiração da cultura.

Nos estádios intermediário e final, as irrigações foram feitas com menor freqüência e lâmina maior. Na região do Vale do Alto Paranaíba é usual efetuar-se a irrigação da cultura da cenoura, nesses estádios, com turno de rega máximo de três dias, quando se usa sistema pivô central. Embora a superfície do solo

tenha ficado umedecida, a evaporação de água do solo foi atenuada pelo sombreamento exuberante proporcionado pela parte aérea das plantas.

Quadro 24 – Valores da evapotranspiração de referência (ETo) estimada pelo método de Penman-Monteith, evapotranspiração da cultura (ETc) e de coeficiente de cultura (Kc) da cenoura estimados com uso da metodologia proposta pelo Boletim FAO 56, para as cultivares Brasília e Nantes.

Cultivar Brasília				Cultivar Nantes			
Períodos (dias)	ETo (mm)	ETc (mm)	Kc	Períodos (dias)	ETo (mm)	ETc (mm)	Kc
01 – 10	33,98	37,04	1,09	01 – 10	29,96	31,72	1,06
11 – 20	46,17	44,32	0,96	11 – 20	31,09	32,11	1,03
21 – 30	45,23	52,47	1,16	21 – 30	26,36	28,74	1,09
31 – 40	38,47	44,24	1,15	31 – 40	27,78	31,21	1,12
41 – 50	32,25	37,09	1,15	41 – 50	26,43	29,62	1,12
51 – 60	49,92	55,41	1,11	51 – 60	26,58	29,91	1,13
61 – 70	42,57	47,25	1,11	61 – 70	26,79	30,23	1,13
71 – 80	35,33	40,28	1,14	71 – 80	27,45	30,30	1,10
81 – 90	43,16	47,04	1,09	81 – 90	33,96	39,09	1,15
91 – 100	38,16	41,98	1,10	91 – 100	42,32	46,83	1,11
101 – 106	20,00	19,80	0,99	101 – 110	41,71	46,97	1,13
				111 – 120	36,27	39,35	1,08
				121 – 126	31,69	29,39	0,93
Total (mm)	425,24	466,92			408,39	445,48	
Consumo Médio (mm d^{-1})	4,01	4,40			3,24	3,54	

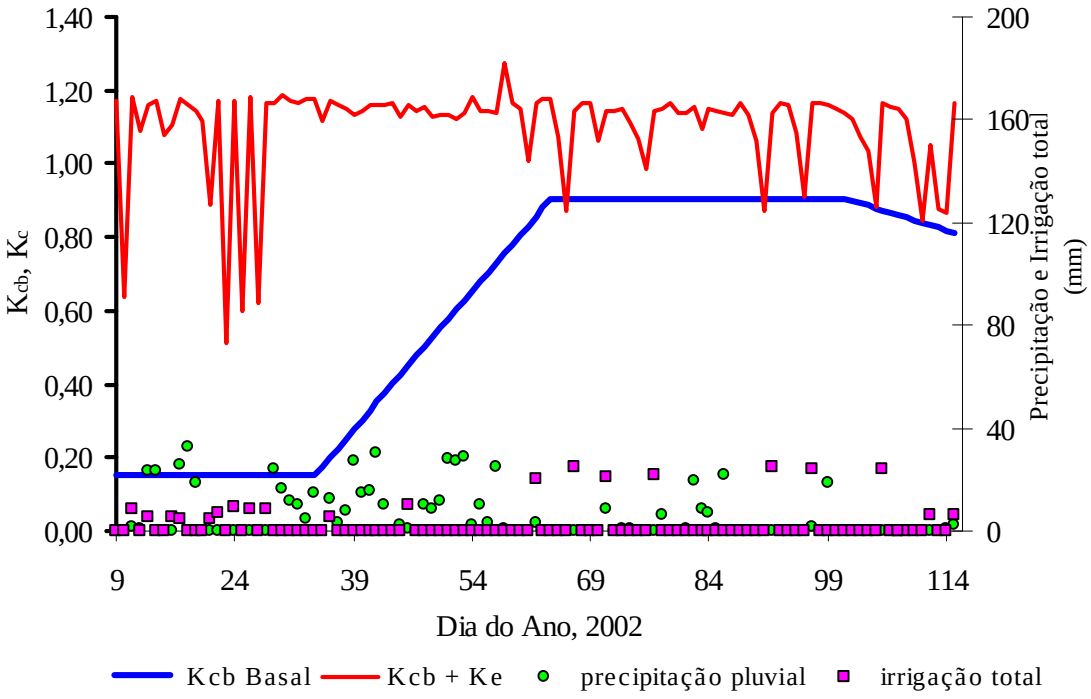

Figura 30 – Variação dos coeficientes Kcb_b e Kc (Kcb + Ke), da precipitação pluvial e da lâmina de irrigação, ao longo do ciclo da cultura da cenoura, cultivar Brasília.

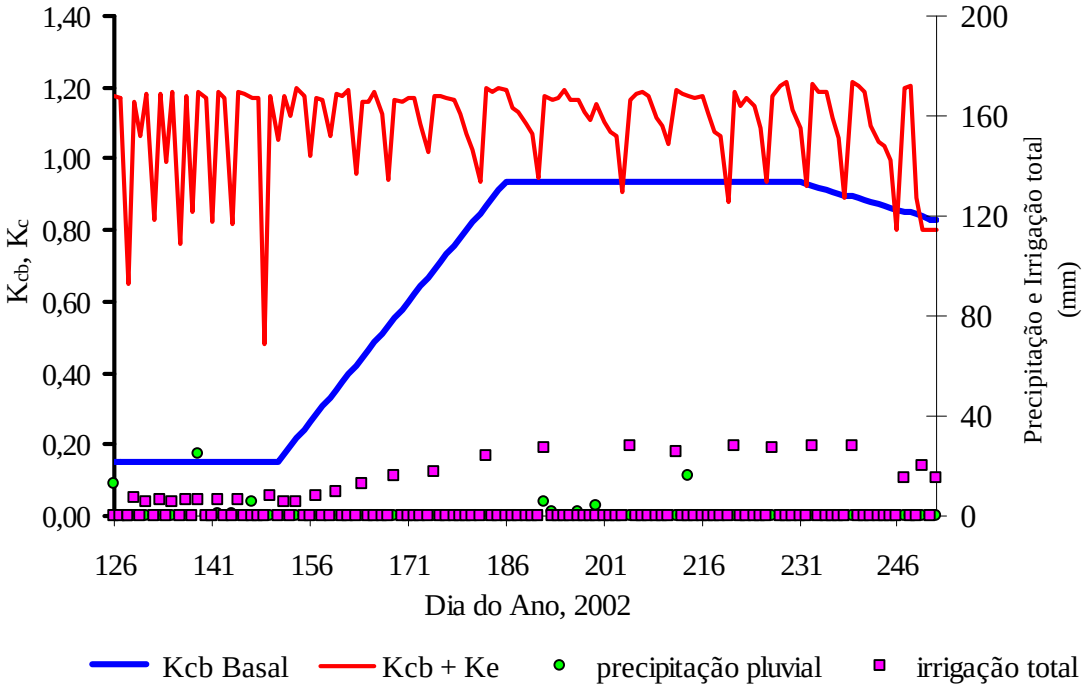

Figura 31 - Variação dos coeficientes Kcb e Kc (Kcb + Ke), da precipitação pluvial e da lâmina de irrigação, ao longo do ciclo da cultura da cenoura, cultivar Nantes.

Quadro 25 – Valores de coeficiente de cultura (K_c) da cenoura nos estádios de desenvolvimento, obtidos em diferentes fontes de literatura e ajustado para o experimento de acordo com uso do Boletim FAO 56 para as cultivares Brasília e Nantes.

Estádios de desenvolvimento	Kc[1]	Kc[2]	Kc[3]	Kc[4]	Kc[5] (Brasília)	Kc[5] (Nantes)
Inicial	-	1,03	0,48	0,50 – 0,60	1,07	1,07
I	0,77	0,80	0,77	0,70 – 0,85		
II	0,99	1,16	1,47	1,00 – 1,15	1,14	1,13
III	0,86	1,61	1,56	0,70 – 0,85	1,10	1,09

[1]ARAGÃO JÚNIOR et al. (1983) [2]CARVALHO (1994) [3]GIACÓIA NETO (1996) [4]MAROUELLI e SILVA (FAO-24) [5] valores ajustados para o experimento conforme Boletim FAO-56

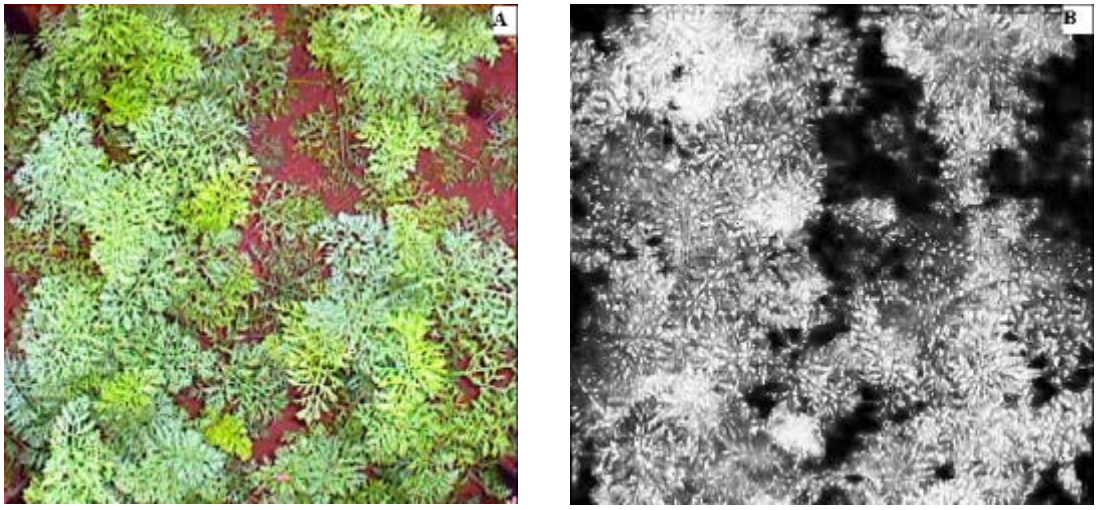

Figura 32 – Foto da cultura da cenoura, cultivar Nantes, normal (A) e em contraste (B), para determinação do sombreamento do solo pela parte aérea das plantas.

4.6. Análise do crescimento da cultura da cenoura em função dos graus-dia acumulados e da lâmina de irrigação

No Quadro 26, apresentam-se os valores de graus-dia (GD) e dias após a semeadura (DAS) para os vários estádios de desenvolvimento da cultura para as

duas cultivares estudadas. Observa-se que há uma diferença nos valores dos ciclos das cultivares em DAS, mas em GD os valores estão bastante próximos.

Em relação a cultivar Brasília, CARVALHO (1994) trabalhando com a mesma cultivar em Viçosa, MG, encontrou para o ciclo total 1.445GD e 100DAS. Tais valores são muito diferentes daqueles encontrados nesta pesquisa: 1.672GD e 106 dias.

Comparando as duas cultivares, desde a semeadura até a emergência das plântulas, que ocorreu em sete dias para a cenoura 'Brasília' e em 10 dias para a 'Nantes', em termos de graus-dia os valores foram de 101 e 100, respectivamente, considerados bastante próximos. O mesmo ocorreu em relação aos estádios, sendo as diferença no estádio inicial de três graus-dia e nos estádios I e II iguais a 31 e 30 graus-dia, respectivamente. Essas diferenças em GD e DAS no ciclo da cenoura podem ser explicadas por vários fatores, pois, segundo VIEIRA et al. (1999), as raízes devem ser arrancadas de 80 a 120 dias após o plantio, dependendo da cultivar, da época do ano e da preferência do mercado consumidor.

Quadro 26 – Valores dos graus-dia acumulados (GD) e dias após a semeadura (DAS) nos diversos estádios de desenvolvimento da cultura, para as cultivares Brasília e Nantes. Rio Paranaíba, MG.

Estádios de desenvolvimento	Cultivar Brasília		Cultivar Nantes	
	GD	DAS	GD	DAS
Inicial	470	30	473	35
I	463	30	432	35
II	739	46	769	56
Total	1.672	106	1.674	126

4.7. Eficiência do uso da água

De acordo com OLIVEIRA (1993), as relações obtidas entre as lâminas de água aplicadas e as eficiências do uso da água (EUA) permitem o

conhecimento da forma como a planta está utilizando a água em seu processo de transformação em produto comercializável.

Nas Figuras 33 e 34, são mostradas as superfícies de resposta tendo como variável dependente a EUA e, como variáveis independentes, os fatores lâminas totais de água e doses de nitrogênio, para as cultivares Brasília e Nantes, respectivamente. Os modelos ajustados foram os da superfície de resposta de segunda ordem, indicando os efeitos quadráticos para os dois fatores de produção estudados (Quadro 27). Resultados semelhantes foram obtidos por FRIZZONE (1986) com a cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivar carioca, OLIVEIRA (1993) com a cultura do milho doce (*Zea mays* L.) cultivar Doce Cristal (BR 402), e CARVALHO (1994) com a cultura da cenoura (*Daucus carota* L.) cultivar Brasília.

Analisando os efeitos dos fatores lâmina total de água aplicada e dose de nitrogênio sobre EUA, obtiveram-se, com as lâminas de 427,07 e 311,45mm e doses de nitrogênio de 171,34 e 172,05kg de N ha^{-1}, as EUA máximas de 9,42g m^{-2} mm^{-1} e de 15,88g m^{-2} mm^{-1}, para as cultivares Brasília e Nantes, respectivamente. CARVALHO (1994) obteve para a cultivar Brasília o valor de 16,4g m^{-2} mm^{-1}, superior ao obtido neste experimento para a mesma cultivar e praticamente igual ao obtido pela cultivar Nantes.

Os valores de EUA, obtidos para as lâminas totais de água e doses de nitrogênio de máximo retorno econômico, para o mês de menor preço do produto, novembro e outubro (442,61 e 430,75mm; 166,88 e 169,04kg de N ha^{-1}), e máxima produtividade física (443,35 e 438,05mm; 171,52 e 173,39 kg de N ha^{-1}), para as cultivares Brasília e Nantes, respectivamente, foram iguais a 9,29 e 13,56g m^{-2} mm^{-1} e 9,28 e 13,38g m^{-2} mm^{-1}, não havendo praticamente diferença entre a EUA para a produtividade máxima física e a econômica. Comparando esses resultados com a lâmina de água total que proporcionou máxima EUA (W_{maxEUA}), verifica-se que W_{maxEUA} é menor do que as recomendações para que se obtenha a máxima produtividade física ou a maior receita líquida, sendo relevante em determinadas circunstâncias quando o fator água for limitante no processo de produção agrícola.

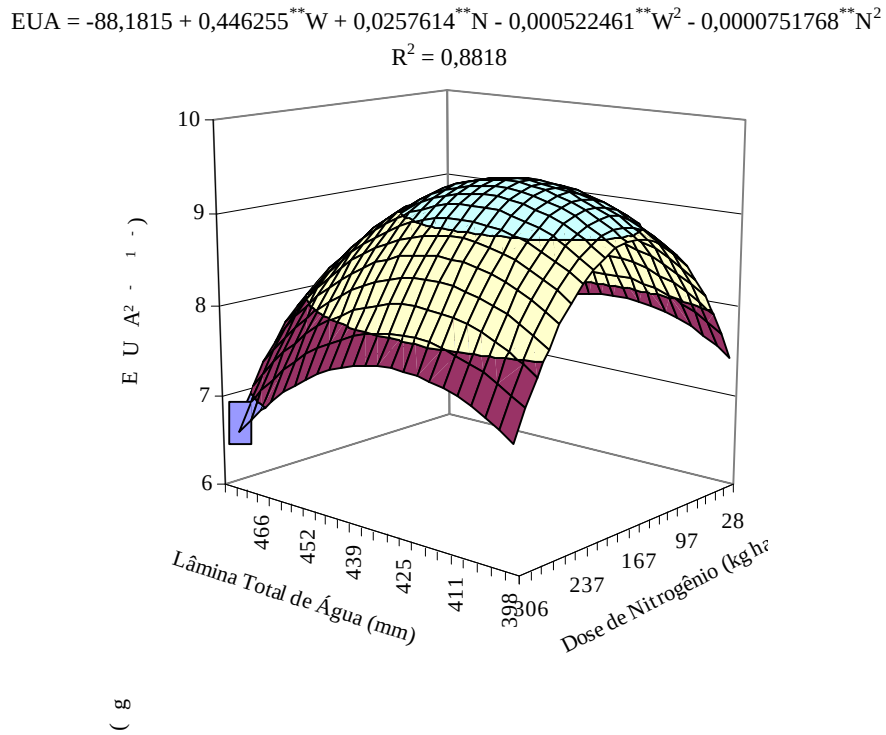

Figura 33 – Eficiência do uso da água pela cenoura, cultivar Brasília, em função das lâminas totais de água e de doses de nitrogênio.

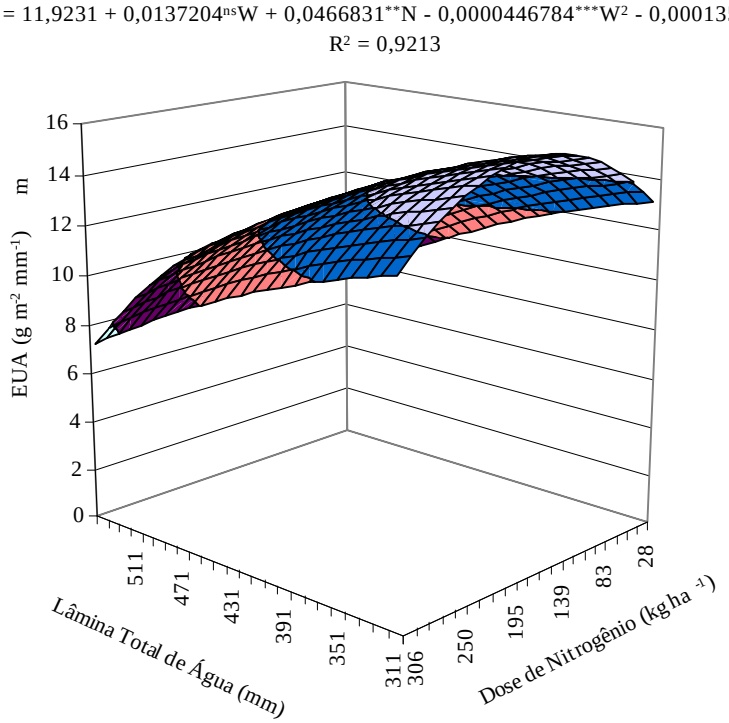

Figura 34 – Eficiência do uso da água pela cenoura, cultivar Nantes, em função das lâminas totais de água e de doses de nitrogênio.

Quadro 27 – Estimativas dos coeficientes do modelo de superfície de resposta de segunda ordem para estimar eficiência de uso da água (EUA) das cultivares Brasília e Nantes, em função da lâmina total de água aplicada (W) e doses de nitrogênio (N).

Efeito	Coeficientes	Cultivar Brasília	Cultivar Nantes
	$_0$	-88,0801	11,9231
W	$_1$	$4{,}46255 \times 10^{-1**}$	$1{,}37204 \times 10^{-2ns}$
W^2	$_{11}$	$-5{,}22461 \times 10^{-4**}$	$-4{,}46784 \times 10^{-5***}$
N	$_2$	$2{,}57614 \times 10^{-2**}$	$4{,}66831 \times 10^{-2**}$
N^2	$_{22}$	$-7{,}51768 \times 10^{-4**}$	$-1{,}35669 \times 10^{-4**}$
	R^2	0,8818	0,9213
	F	$37{,}31^{**}$	$58{,}57^{**}$

** – significativo em nível de 1% de probabilidade, *** – significativo em nível de 10% de probabilidade, ns – não significativo

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Este trabalho foi conduzido na Estação Experimental Rio Paranaíba, da Cooperativa Agropecuária do Alto Paranaíba (COOPADAP), Rio Paranaíba, MG, com coordenadas geográficas de 19º 12’ 26’’S de latitude, 46º 09’ 46’’W de longitude e altitude de 1.159m. O solo é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, fase argilosa, e o clima da região é, segundo Köppen, do tipo Cwb. As médias anuais de temperatura do ar e de precipitação pluvial são de 19,0ºC e 1.534mm, respectivamente. As maiores precipitações ocorrem nos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março, com média mensal de 241mm, verificando-se a menor precipitação no mês de junho com 9,19mm. Os objetivos foram determinar para a cenoura (*Daucus carota* L.), cultivares Brasília e Nantes, cultivadas no verão e no inverno, respectivamente, as combinações dos níveis de água e de nitrogênio que alcancem produtividade capaz de gerar receita líquida máxima e estimar os coeficientes de cultura (Kc) que permitam o manejo racional da irrigação na região. Dois experimentos foram montados segundo um esquema fatorial 5x5, no delineamento blocos ao acaso, com três repetições. No primeiro experimento, com a cultivar Brasília, foram aplicados cinco níveis de lâmina total de água: W_1 = 397,67mm; W_2 = 409,85mm; W_3 = 431,83mm; W_4 = 445,54mm e W_5 = 479,81mm. No segundo experimento, com a cultivar Nantes, os cinco níveis de lâminas foram: W_1 = 311,45mm; W_2 = 369,94mm; W_3 = 429,64mm; W_4 = 482,31mm e W_5 = 545,10mm. Para aplicação das lâminas de

irrigação utilizou-se um tubo de PVC perfurado de 25mm acoplado por meio de mangueiras a uma caixa de fibra de vidro com área de 1,0m^2 e 1,10m de altura. Os cinco níveis de doses de nitrogênio foram: N_0 = 0kg ha^{-1}, N_1 = 80kg ha^{-1}, N_2 = 160kg ha^{-1}, N_3 = 240kg ha^{-1} e N_4 = 320kg ha^{-1}, com distribuição a lanço, sendo aplicados 40% na semeadura e mais duas aplicações de 30% cada, em cobertura, aos 30 e 50 dias após a semeadura. As semeaduras foram realizadas nos dias 9 de janeiro de 2002 (Brasília) e 6 de maio de 2002 (Nantes). A adubação básica constou de 220kg de K_2O ha^{-1}, na forma de cloreto de potássio, 15 dias antes da semeadura, e de 66kg ha^{-1}, em cobertura, aos 20 e 40 dias após a semeadura, e de 2.222kg de P_2O_5 ha^{-1}, na forma de superfosfato simples, juntamente com o cloreto de potássio, na semeadura. Foi feita a incorporação de 3 t de calcário dolomítico por hectare, 3 meses antes da semeadura de verão. As irrigações foram aplicadas seguindo o turno de rega de 1 dia, da semeadura até o desbaste; de dois dias, do desbaste até o final do estádio I (80% de cobertura do solo); e de três dias, do final do estádio I até a colheita.

Os resultados obtidos permitem concluir:

A produtividade máxima econômica estimada para a cultivar Brasília foi 40,98t ha^{-1}, obtida com a lâmina total de água de 443,17mm e dose de nitrogênio de 170,49kg de N ha^{-1}, proporcionando receita líquida de R$ 19.941,81ha^{-1} para o mês de março de 2002.

A produtividade máxima econômica estimada para a cultivar Nantes foi 57,90t ha^{-1}, obtida com lâmina de 434,75mm e 171,56kg de N ha^{-1} e receita líquida de R$ 6.539,63ha^{-1} para o mês de setembro de 2002.

A produtividade máxima física estimada para a cultivar Brasília foi 40,98t ha^{-1}, obtida com lâmina total de água de 443,35mm e dose de 171,52kg de N ha^{-1}.

A produtividade máxima física estimada para a cultivar Nantes foi 57,91t ha^{-1}, obtida com lâmina total de água de 438,05mm e dose 173,39kg de N ha^{-1}.

A produtividade máxima econômica foi praticamente igual à produtividade máxima física para as cultivares Brasília e Nantes.

Os fatores de produção lâmina total de água e doses de nitrogênio não

mostraram ser substitutos nos limites de produtividade física e econômica máxima da cultura de cenoura.

A variação do preço do produto influencia na definição de estratégias ótimas de irrigação.

Tendo a água como fator limitante da produção, na medida em que o preço do produto diminuiu, resulta em maior economia de água o manejo da irrigação com a aplicação de lâmina total de água próxima da lâmina, que proporciona a máxima receita líquida por unidade de volume de água aplicado (lâmina ótima).

Sendo a terra o fator limitante da produção, a relação entre o preço do fator água e o preço do produto menor do que quatro é um indicativo da viabilidade econômica da irrigação.

A evapotranspiração da cultura da cenoura, estimada segundo a metodologia do Boletim FAO 56, durante todo o ciclo, foi de 446,92mm, com consumo médio de 4,40mm d^{-1}, para a cultivar Brasília, e de 445,48mm e 3,54 mm d^{-1} para a cultivar Nantes.

Os coeficientes de cultura (Kc), ajustados segundo a metodologia do Boletim FAO 56, foram: estádio inicial = 1,07 e 1,07; estádio I = 1,14 e 1,13 e estádio II = 1,10 e 1,09, para as cultivares Brasília e Nantes, respectivamente.

As durações dos estádios fenológicos, em unidades térmicas, para a cultivar Brasília, foram de 470, 463 e 739 para os estádios inicial, I e II, respectivamente, e no ciclo foi 1.672 GD; para a cultivar Nantes foram de 473, 432 e 769 GD nos estádios inicial, I, II e no ciclo 1.674 GD.

Os valores de eficiência do uso da água (EUA) obtidos com as lâminas totais de água aplicadas e doses de nitrogênio que promovem a produtividade máxima econômica, para o período de menor preço do produto (novembro e outubro), e máxima física, para as cultivares Brasília e Nantes, respectivamente, foram de: 9,29 e 13,56 g m^{-2} mm^{-1} e 9,28 e 13,38 g m^{-2} mm^{-1}.

As máximas eficiências de uso de água, obtidas com as lâminas total de água de 427,07 e 311,45 mm e doses de nitrogênio de 171,34 e 172,05 kg de N ha^{-1}, foram 9,42 e 15,88 g m^{-2} mm^{-1}, para as cultivares Brasília e Nantes, respectivamente.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G. PEREIRA, L. S. RAES, D. SMITH, M. **Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements**. FAO Irrigation and Drainage. Rome: FAO, 1998. 319p. (Paper 56).

AL-JAMAL, M. S.; SAMMIS, T. W.; BALL, S.; SMEAL, D. Computing the crop water production function for onion. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.46, p.29-41, 2000.

ANDRADE JÚNIOR, A. S. de; FRIZZONE, J. A.; BASTOS, E. A.; CARDOSO, M. J.; RODRIGUES, B. H. N. Estratégias ótimas de irrigação para a cultura da melancia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.2, p.301-305, fev. 2001.

ARAGÃO JÚNIOR, T. C. **Determinação do coeficiente de cultura (Kc) para a cenoura (***Daucus carota* **L.) pelo método do balanço hídrico**. Fortaleza, CE: UFC, 1983. 45p. (Dissertação Mestrado)

AZEVEDO, J. A. **Níveis de tensão de água no solo e supressão da irrigação em três períodos de crescimento do trigo (***Triticum aestivum* L**) irrigado em solo de cerrado: efeito sobre a produtividade, componentes da produção, desenvolvimento e uso de água**. Piracicaba: ESALQ-USP, 1988. 1988. 157p. (Tese de Doutorado)

BARBANO, M. T.; WUTKE, E. B.; BRUNINI, O.; AMBROSANO, E. J.; CASTRO, J. L.; GALLO, P. B.; PEREIRA, J. C. V. N. A. Determinação da temperatura-base e soma de graus-dia, da emergência ao florescimento, em cultivares de ervilha no Estado de São Paulo. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA. III REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA. Fortaleza, 2001. **Anais...** Fortaleza, CE: v.II, p.825-6, 2001.

BARRETT, J. W. H.; SKOGERBOE, G. V. Crop production function and the allocation and use of irrigation water. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.3, p.53-64, 1980.

BEGG, J. E.; TURNER, N. C. Crop water deficits. **Advances in Agronomy**, New York: Academic Press, v.28, p.161-217, 1976.

BUCKS, D. A.; HUNSAKER, D. J. Water use variability in irrigated level basins. **Transactions of the American Society Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.30, p.1090-570, 1991.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6ed. Viçosa: UFV, Imp. Univ., 2002. 657p.

BERNARDO, S. Irrigação e produtividade. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.6, n.3, p.186-196. jul./set., 1998.

CARDOSO, M. J.; SOARES JÚNIOR, A.; BASTOS, E. A. Graus-dia na determinação do ciclo de variedades de milho. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA. III REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA. Fortaleza, 2001. **Anais...** Fortaleza, CE: v.II, p.631-2, 2001.

CALHEIROS C. B. M.; QUEIROZ, J. E.; FRIZZONE, J. A.; PESSOA, P. C. S.; Estratégias ótimas de irrigação do feijoeiro: água como fator limitante da produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.31, n.7, p.509-515, jul. 1996.

CAMARGO, M. B. P.; BRUNINI, O. , MIRANDA, M. A. C. Temperatura-base para cálculo dos graus-dia para cultivares de soja em São Paulo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 22(2): 115-121, fev. 1987.

CARVALHO, J. de A. **Coeficiente de cultura, avaliação econômica da produção e análise do crescimento da cenoura (***Daucus carota* L.**) irrigada**. Viçosa, MG: UFV, 1994. 78p. (Tese de Doutorado).

CASALI, V. W. D.; PINTO, C. M. F.; PÁDUA, J. G. Origem e botânica da cenoura. Umbelíferas. **Informe agropecuário**, Belo Horizonte, v.10, n.120, p.8, 1984.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendação do uso de corretivos e fertilizantes no estado de Minas Gerais**, 5ª aproximação. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999. 359p.

DALVI, V. B.; TIWARI, K. N.; PAWADE, M. N.; PHIRKE, P. S. Response surface analysis of tomato production under microirrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.41, p.11-19, 1999.

D'ANTONINO, L. **Efeito de densidades de semeadura e do desbaste no crescimento e na produção de cenouras (***Daucus carota* L.**) cv. Brasília**. Viçosa, MG: UFV, 1992, 94p. (Dissertação de Mestrado)

DILLON, J. L. **The analysis of response in crop and livestock production**. 2ed. Oxford: Pergamon Press, 1977. 213p.

DOORENBOS, J. e PRUIT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1975. 179p. (Irrigation and Drainage, Paper 24).

ENGLISH, M. J. Deficit irrigation. I: Analytical framework. **Journal of the Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.116, n.3, p.399-412. 1990.

FARIA, R. T.; CARAMORI, P. H.; SIQUEIRA, R. Simulação do crescimento vertical do cafeeiro. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA. III REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA. Fortaleza, 2001. **Anais...** Fortaleza, CE: v.II, p.545-6, 2001.

FERREIRA, E. A. **Avaliação e teste do modelo expolinear aplicado à cultura da soja [***Glycine max* **(L.) Merrill] cultivada em diferentes condições de disponibilidade hídrica e de intensidade de radiação**. Viçosa, MG: UFV, 2000. 51p. (Dissertação de Mestrado).

FERREIRA, W. P. M. **Desenvolvimento e teste de um modelo agrometeorológico de simulação para a cultura da soja [***Glycine max* **(L.) Merrill]**. Viçosa, MG: UFV, 1997. 84p. (Dissertação de Mestrado).

FERREIRA, R. S. A.; SILVA, C. L.; VASCONCELOS, V. L. D. Análise econômica do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em relação a diferentes lâminas de água. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA. III REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA. Fortaleza, 2001. **Anais...** Fortaleza, CE: v.II, p.397-8, 2001.

FRIZZONE, J. A. Funções de resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) ao uso de nitrogênio e lâmina de irrigação. In: SIMPÓSIO SOBRE O MANEJO DE ÁGUA NA AGRICULTURA. Campinas, 1987. **Anais...** Campinas, SP: s. ed., p.123-133, 1987.

FRIZZONE, J. A. Função de produção. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas, MG: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998. p.87.

GIACOIA NETO, J. **Efeito da profundidade do lençol freático na evapotranspiração e na produtividade da cultura de cenoura (***Daucus carota* **L.)**. Viçosa, MG: UFV, 1996. 56p. (Dissertação Mestrado)

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Economic considerations of deficit irrigation. **Journal of the Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.110, n.4, p.343-358. 1984.

HART, W. E.; NORUM, D. I.; PERI, G. Optimal seasonal irrigation application analysis. **Journal of the Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.106, n.3, p.221-235. 1980.

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

HILLEL, D. The field water balance and water use efficiency. In: HILLEL, D. **Optimizing the soil physical environment toward greater crop yields**. Academic Press, New York and London, 1972. p.79-100.

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

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. **Evapotranspitation and irrigation water requirements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1990. 332p. (Manuals and Reports on Engineering Practice – No. 70).

QUEIROZ, J. E.; CALHEIROS C. B. M.; PESSOA, P. C. S.; FRIZZONE, J. A. Estratégias ótimas de irrigação do feijoeiro: terra como fator limitante da produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.31, n.1, p.55-61, jan. 1996.

KIPKORIR, E. C.; RAES, D.; MASSAWE, B. Seasonal water production functions and yield response factors for maize and onion in Perkerra, Kenya. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.56, p.229-240, 2002.

LOZADA, B. I.; ANGELOCCI., L. R. Determinação da temperatura-base e de graus-dia para estimativa da duração do subperíodo da semeadura à floração de um híbrido de milho (*Zea mays* L.). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, 7(1): 236-7, fev., 1999.

LANA, M. M.; VIEIRA, J. V. **Fisiologia e manuseio pós-colheita de cenoura**. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Hortaliças, 2000. 16p. (Circular Técnica, 21).

LI, Y.-L.; CUI, J.-Y.; ZHANG, T.-H., ZHAO, H.-L. Measurement of evapotranspiration of irrigated spring wheat and maize in a semi-arid region of north China. **Agricultural Water Management**, Lanzhou, China, v.61, p.1-12, 2003.

LIU W. L.; HUNSAKER, D. J.; LI, Y. S.; XIE, X. Q.; WALL, G. W. Interrelations of yield, evapotranspiration, and water use efficiency marginal analysis of water productions functions. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.56, p.143-151, 2002.

LOPES, A. S.; COX, F. R. Cerrado vegetacion in Brazil: An edaphic gradient. **Agronomy Journal**, Madison, v.69, p.828-831, 1977.

MANTOVANI, E. C. SOARES, A. A. Manejo de irrigação in: COSTA, L. C., MANTOVANI, E. C., SOARES, A. A. Sistema de suporte à decisão agrícola: Manejo da cultura e dos recursos hídricos. Workshop internacional sobre manejo integrado das culturas e dos recursos hídricos. Brasília/DF, 02 a 04 de junho, 1998, 153p.

MAROUELLI, W. A. SILVA, W. L. C. Manejo da irrigação em hortaliças no campo e em ambientes protegidos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas, MG: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998. p.311.

MARTINS, D. P. **Resposta do maracujazeiro amarelo (***Passiflora edulis* Sins var. *flavicarpa* Deg.**) a lâminas de irrigação e doses de nitrogênio e de potássio**. Campos dos Goytacazes, RJ: UENF, 1998. 84p. (Tese de Doutorado).

McMAHON, M. A.; GOEDERT, W. J. The cerrados, future wheat production and limitations. In: INTERNACIONAL SYMPOSIUM OF WHEAT FOR MORE TROPICAL ENVIRONMENTS, 1984, México. **Proceedings**… México: CIMMYT, 1985. p.239-249.

MOTA, F. S. **Meteorologia Agrícola**. 7ed. São Paulo: Nobel, 1987. 376p.

OLIVEIRA, S. L. **Funções de resposta do milho doce ao uso de irrigação e nitrogênio**. Viçosa, MG: UFV, 1993. 91p. (Tese de Doutorado).

OLIVEIRA, I. C.; VELLOSO, M. F. A.; SÁ, R. V.; CATALDI, M. Estimativa de graus-dia para diferentes culturas na região de Itatiaia. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA. III REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA. Fortaleza, 2001. **Anais...** Fortaleza, CE: v.II, p. 607-8, 2001.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo, SP: Ed. Agronômica Ceres, 1981. 440p.

PÁDUA, J. G.; CASALI, V. W. D.; PINTO, C. L. F. Efeitos climáticos sobre a cenoura. Umbelíferas. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.10, n.120, p.11, 1984.

RADIN, B.; BERGAMASCHI, H.; ROSA, L. M. G. Estimativa do coeficiente de cultura (Kc) do milho em função do índice de área foliar (IAF). In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA. II REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA. Florianópolis, 1999. **Anais...** [CD-Rom]. Florianópolis, SC. p.2492-95, 1999.

SANS, L. M. A. **Estimativas do regime de umidade pelo método de Newhall de um Latossolo vermelho-escuro álico da região de Sete Lagoas, MG**. Viçosa, MG: UFV, 1986. 190p. (Dissertação de Mestrado)

SCALOPPI, E. J.; SANTOS, I. A. Determinação de coeficientes de cultura para estimativa da evapotranspiração sob restrições hídricas. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA. II REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA. Florianópolis, 1999. **Anais...** [CD-Rom]. Florianópolis, SC. p.2394-98, 1999.

SILVA, J. A. **Influência da umidade do solo nas exigências térmicas de três cultivares de milho (*Zea mays* L.)** Viçosa, MG: UFV, 1989. 79p. (Dissertação de Mestrado)

SILVA, J. B. C.; VIEIRA, J. V.; LIMA, M. M.; LIMA, D. B. **Produção de minicenouras dos tipos cenourete e catetinho**. http://www.cnph.embrapa.br. Mar. 2003.

SOUZA, A. de Caracterização fenológica de três cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.), utilizando o conceito de graus-dia. VII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Viçosa, 1991. **Resumos**. Viçosa, MG, p.85-7, 1991.

TREBEJO, I.; OMETTO, J. C.; ANGELOCCI, L. R. Determinação da temperatura-base e exigência de graus-dia para cultivares de batata (*Solanum tuberosum* L.). VII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Viçosa, 1991. **Resumos**. Viçosa, MG, p.210-12, 1991.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV, 2000. 448p.

VAUX, H. J.; PRUITT, W. 0. **Crop-water production functions**. In: HILLEL, D. (ed.). Advances in irrigation**.** New York: Academic Press, v.2, 1983. p.61-97.

VIEIRA, J. V.; PESSOA, H. B. S. V.; MAKISHIMA, N. **A cultura da cenoura**. Embrapa Hortaliças. Brasília: Embrapa Comunicação para transferência de tecnologia, 1999. 77p. (Coleção Plantar, 43).

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

WRIGHT, J.L. New evapotranspiration crop coefficients. **Journal Irrigation and Drainage**, New York, ASCE 108(IR2):57-74, 1982.

ANEXOS

ANEXO A

QUADRO A1 – Evapotranspiração de referência (ETo) e lâminas de irrigação aplicadas durante o experimento com a cultivar Brasília, Rio Paranaíba, MG, 09.01 a 23.04.2002

Dias Após Semeadura	ETo (mm)	Lâmina de Água Aplicada (mm)				
		W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
0	—	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
7	24,78	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0
14	26,07	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
21	34,22	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
28	32,90	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
35	23,03	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
42	28,82	8,0	11,0	14,0	16,0	19,0
49	23,38	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
56	32,65	11,0	15,0	19,0	23,0	26,0
63	34,45	21,0	28,0	35,0	42,0	49,0
70	28,29	12,0	16,0	20,0	24,0	28,0
77	23,29	4,0	5,0	6,0	8,0	9,0
84	30,18	11,0	14,0	18,0	21,0	25,0
91	29,10	18,0	25,0	31,0	37,0	43,0
98	25,96	11,0	14,0	18,0	22,0	25,0
105	26,54	16,0	22,0	27,0	33,0	38,0

QUADRO A2 – Evapotranspiração de referência (ETo) e lâminas de irrigação aplicadas durante experimento com a cultivar Nantes, Rio Paranaíba, MG, 06.05 a 09.09.2002

Dias Após Semeadura	ETo (mm)	Lâmina de Água Aplicada (mm)				
		W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
0	—	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
7	21,13	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
14	27,24	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0
21	16,98	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0
28	20,16	12,0	16,0	20,0	24,0	28,0
35	18,22	11,0	15,0	18,0	22,0	26,0
42	19,56	10,0	14,0	17,0	21,0	24,0
49	18,33	12,0	17,0	21,0	25,0	29,0
56	19,09	11,0	15,0	19,0	23,0	27,0
63	19,01	11,0	15,0	19,0	23,0	27,0
70	19,41	5,0	7,0	9,0	11,0	13,0
77	18,17	9,0	11,0	14,0	17,0	20,0
84	22,60	14,0	18,0	23,0	27,0	32,0
91	25,28	11,0	14,0	18,0	21,0	25,0
98	30,06	18,0	24,0	30,0	36,0	42,0
105	29,95	18,0	24,0	30,0	36,0	42,0
112	28,95	17,0	23,0	29,0	35,0	41,0
119	23,56	14,0	19,0	24,0	28,0	33,0
126	28,85	17,0	23,0	29,0	35,0	40,0

ANEXO B

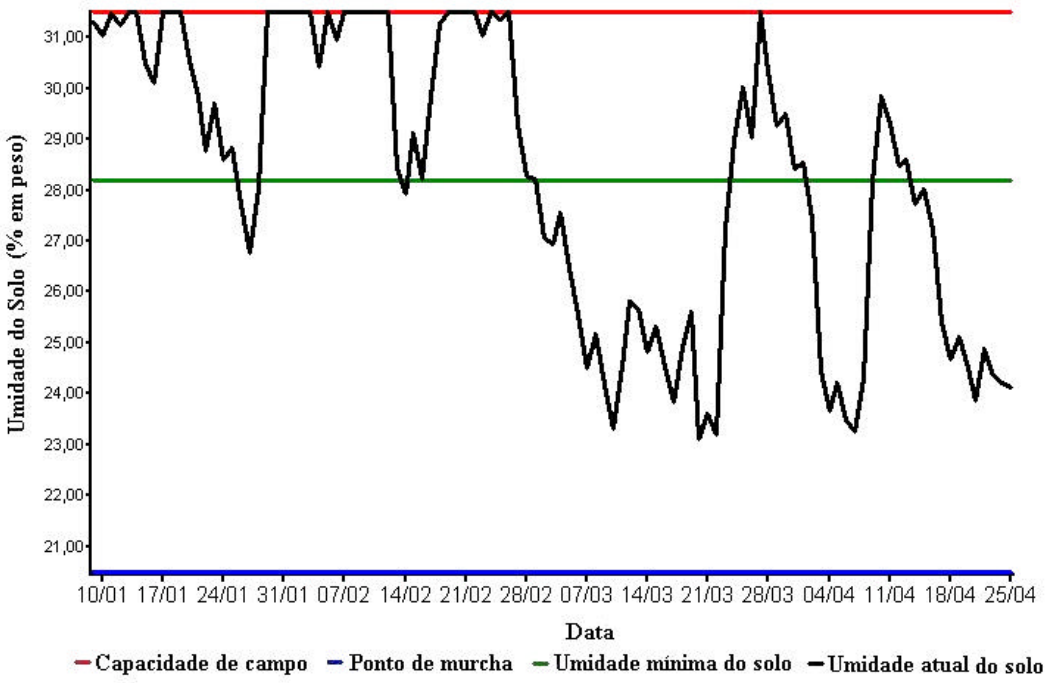

FIGURA B1 – Variação da umidade do solo durante o ciclo da cenoura, cultivar Brasília, do tratamento W_1, apresentado pelo programa computacional SISDA.

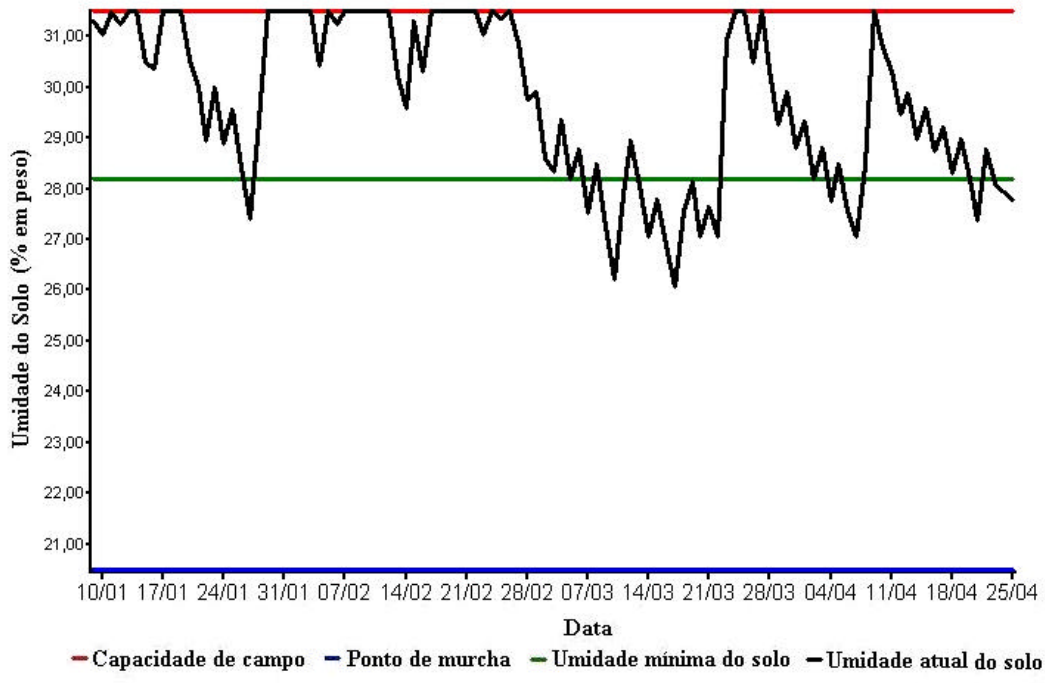

FIGURA B2 – Variação da umidade do solo durante o ciclo da cenoura, cultivar Brasília, do tratamento W_2, apresentado pelo programa computacional SISDA

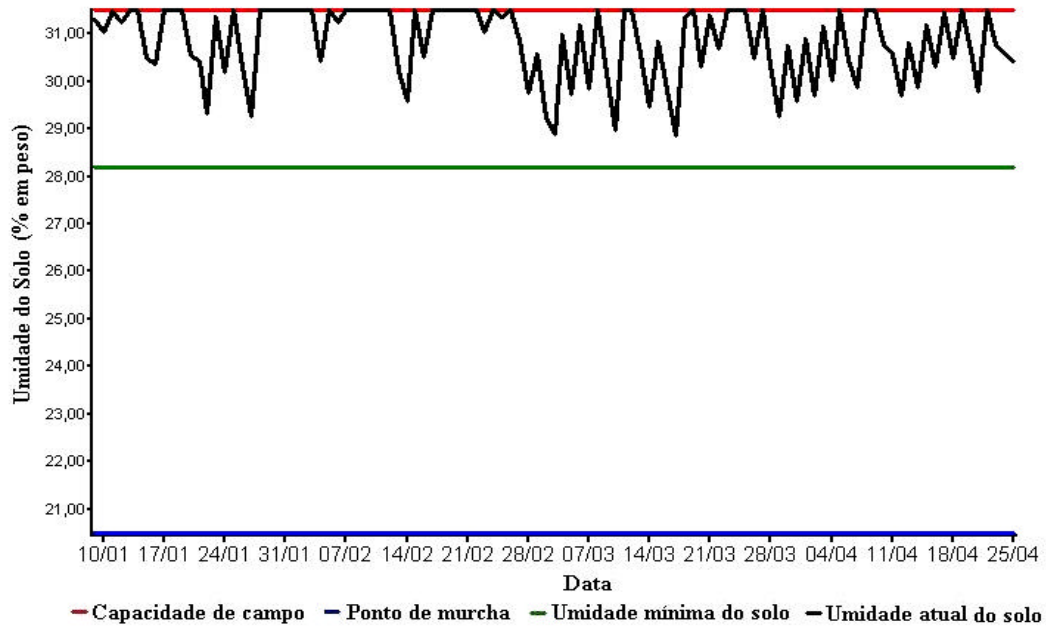

FIGURA B3 – Variação da umidade do solo durante o ciclo da cenoura, cultivar Brasília, do tratamento W_4, apresentado pelo programa computacional SISDA

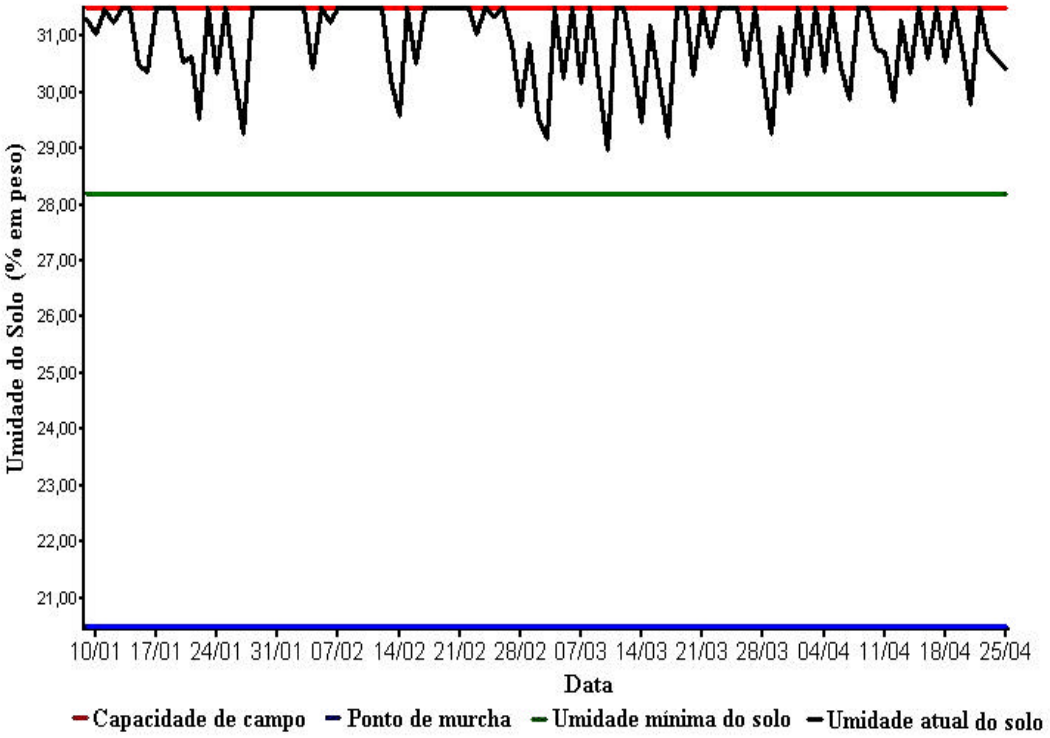

FIGURA B4 – Variação da umidade do solo durante o ciclo da cenoura, cultivar Brasília, do tratamento W_5, apresentado pelo programa computacional SISDA.

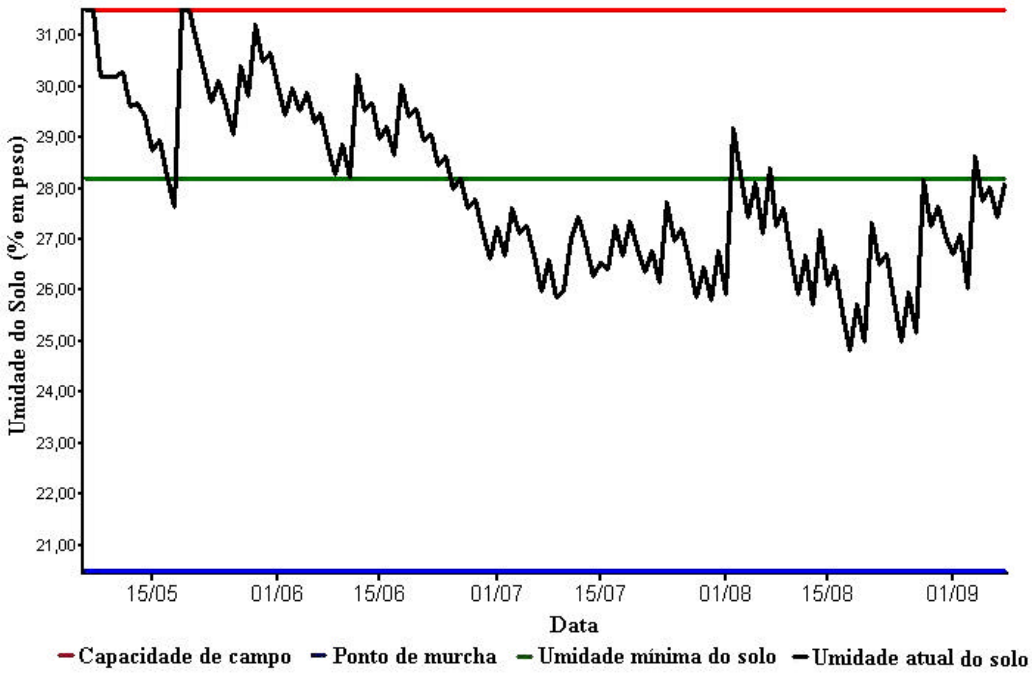

FIGURA B5 – Variação da umidade do solo durante o ciclo da cenoura, cultivar Nantes, do tratamento W_1, apresentado pelo programa computacional SISDA

FIGURA B6 – Variação da umidade do solo durante o ciclo da cenoura, cultivar Nantes, do tratamento W_2, apresentado pelo programa computacional SISDA

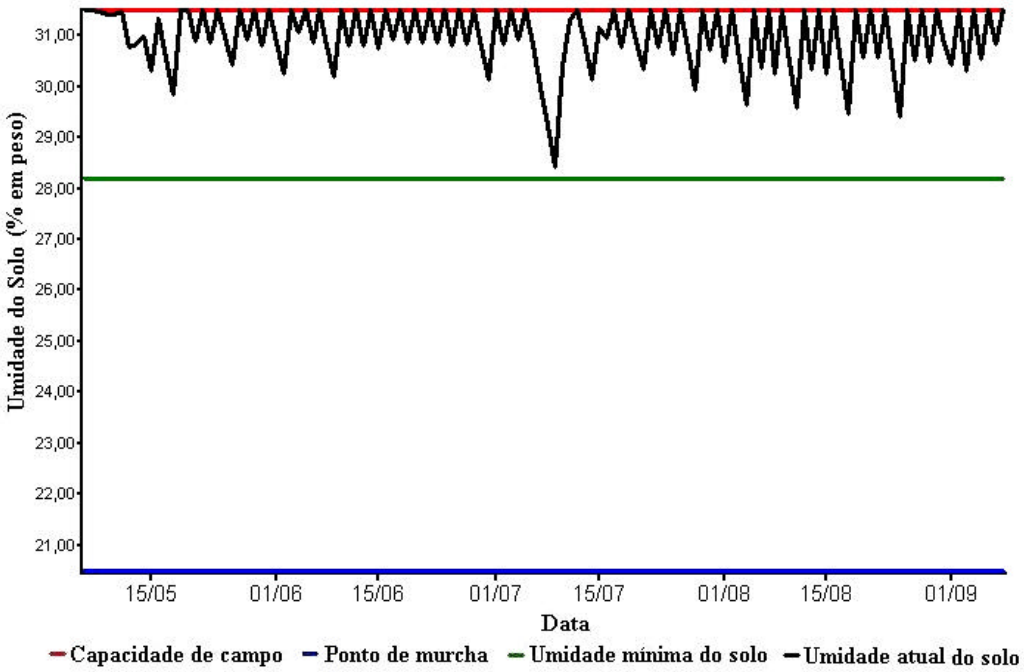

FIGURA B7 – Variação da umidade do solo durante o ciclo da cenoura, cultivar Nantes, do tratamento W_4, apresentado pelo programa computacional SISDA

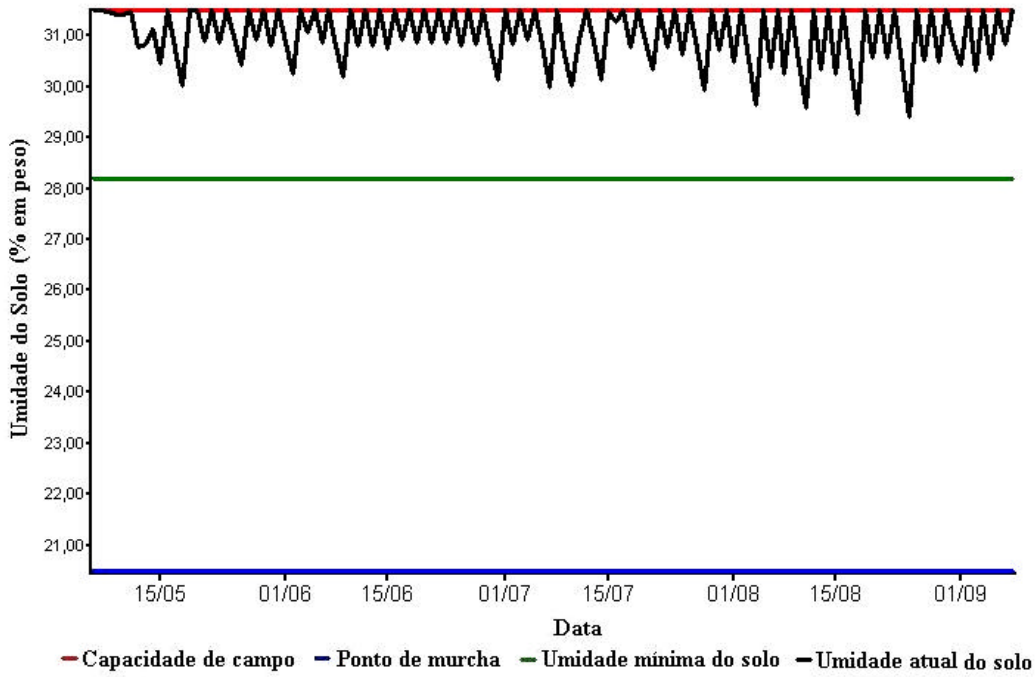

FIGURA B8 – Variação da umidade do solo durante o ciclo da cenoura, cultivar Nantes, do tratamento W_5, apresentado pelo programa computacional SISDA

ANEXO C

Na região do Alto Paranaíba, o sistema de irrigação do tipo pivô central é o mais utilizado. Neste estudo, considerou-se o equipamento de 80ha por ser o mais representativo. O custo do fator água foi estimado considerando toda a infra-estrutura para instalação do pivô central, sendo o preço médio, na região, de R$3.121,00$ha^{-1}$; o valor residual foi estimado em 20% do valor de aquisição, o que equivale a R$ 624,20ha^{-1}; assim, tem-se a composição desse fator:

Depreciação do sistema de irrigação (Dp):

Dp = (Valor de compra – Valor residual) / Vida útil

Dp = (R$3.121,00 – R$624,20) / 15 anos

Dp = R$166,45 ha^{-1} por ano

Considerando a utilização do equipamento em quatro cultivos ao ano, tem-se:

Dp = R$166,45 / 4 = R$41,61 ha^{-1} por ciclo da cultura

Custo anual de manutenção e operação do sistema (MO) foi considerado igual a 2% do valor de aquisição:

MO = (R$3.121,00 x 0,02) / 4 = R$15,61ha^{-1} por ciclo da cultura

Na região do Alto Paranaíba, um pivô-central de 80ha tem, em média, potência instalada de 164kW. No cálculo do custo de energia para o bombeamento (CEB), foram usados os valores das tarifas cobradas pela concessionária Cemig, em 2002, iguais a: tarifa de demanda = R$7,512223 kW^{-1}, tarifa diurna = R$0,062217$kW^{-1}$ h^{-1} e tarifa noturna = R$0,013822$kW^{-1}$ h^{-1}. Os tempos de irrigação durante os ciclos das cultivares Brasília e Nantes foram 1.851h e 2.070h, respectivamente, sendo que, deste total, 60% ocorrem durante o período diurno e 40% durante o período noturno.

Assim, o custo de energia para a cultivar Brasília foi:

Custo de Demanda = R$7,512223$kW^{-1}$ h^{-1} x 164kW x 4 meses = R$4.928,02

Custo diurno = R$0,062217$kW^{-1}$ h^{-1} x 164kW x 1851h x 0,6 = R$11.332,10

Custo noturno = R$ 0,013822kW^{-1} h^{-1} x 164kW x 1851h x 0,4 = R$ 1.678,34

Custo Total = R$4.928,02 + R$11.332,10 + R$1.678,34 = R$17.938,46ha^{-1} por ciclo da cultura.

Para a cultivar Nantes, o custo de energia foi:

Custo de Demanda = R$ 7,512223kW^{-1} h^{-1} x 164kW x 4 meses = R$4.928,02

Custo diurno = R$0,062217$kW^{-1}$ h^{-1} x 164kW x 2070h x 0,6 = R$12.672,86

Custo noturno = R$0,013822$kW^{-1}$ h^{-1} x 164kW x 2070h x 0,4 = R$ 1.876,92

Custo Total = R$4.928,02 + R$12.672,86 + R$1.876,92 = R$19.477,80ha^{-1} por ciclo da cultura.

Ao volume unitário de água não foi atribuído qualquer custo, caracterizando captação de represa ou córrego.

O custo total (CT) é o somatório:

a – para a cultivar Brasília:

CT = R$41,61 + R$15,61 + R$17.938,46 = R$17.995,68 ha^{-1} por ciclo da cultura

b – para a cultivar Nantes:

CT = R$41,61 + R$15,61 + R$19.477,80 = R$19.535,02 ha^{-1} por ciclo da cultura

O custo por milímetro de lâmina de água aplicada foi calculado dividindo-se o CT pela lâmina total de água aplicada no nível W_3, considerada como referência para os demais níveis. Para as cultivares Brasília e Nantes, as lâminas totais foram 431,83mm e 429,64mm, respectivamente. Assim, tem-se:

a – para a cultivar Brasília:

P_W = R$17.995,68 ha^{-1} por ciclo da cultura / 80ha / 431,83mm = R$0,52$ha^{-1}$ mm^{-1}

b – para a cultivar Nantes:

P_W = R$19.535,02 ha^{-1} por ciclo da cultura / 80ha / 429,64mm = R$ 0,57 ha^{-1} mm^{-1}.