

ESTRATÉGIAS ÓTIMAS DE IRRIGAÇÃO DO FEIJOEIRO: ÁGUA COMO FATOR LIMITANTE DA PRODUÇÃO¹

CARLOS BRANCILDES M. CALHEIROS², JOSÉ ELENILDO QUEIROZ³,
JOSÉ ANTONIO FRIZZONE⁴ e PAULO CÉSAR SILVEIRA PESSOA⁵

RESUMO - Desenvolveu-se um estudo sobre estratégias ótimas de irrigação, examinando-se os aspectos econômicos da irrigação com déficit. Foram estudadas as relações entre produção de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), lâmina total de água, doses de nitrogênio e preço do produto. Para analisar as relações de tais fatores com os aspectos econômicos da irrigação com déficit, foram utilizadas funções de custo linear e funções de produção quadráticas, obtidas de um experimento conduzido em Ilha Solteira, SP. Nas doses de nitrogênio estudadas, a lâmina ótima de irrigação resultou em economias de água entre 0,5 e 42% da lâmina para máxima produtividade. A dose de nitrogênio de 90 kg/ha proporcionou as maiores rendas líquidas. O preço do produto foi o fator mais importante na determinação da estratégia ótima de irrigação.

Termos para indexação: manejo de irrigação, irrigação com déficit.

OPTIMAL IRRIGATION STRATEGIES: WATER AS A LIMITING FACTOR OF PRODUCTION

ABSTRACT - A study on optimal strategies for irrigation management is presented here based on economics of deficit irrigation. The relationships between bean (*Phaseolus vulgaris* L.) yields and season water depths, nitrogen dosis and crop prices were studied. The analysis involved quadratic production functions and linear cost functions. Results from previous experimental procedures developed at Ilha Solteira, SP, Brazil, were used to determine how the above factors are interrelated and how they affect the economics aspects of deficit irrigation. According to N dose, the optimal water depth resulted in savings of water at 0.5 and 42 % of full irrigation. The highest net incomes were achieved with nitrogen dose of 90 kg/ha. Crop price was the most important factor determining the optimal irrigation strategy.

Index terms: irrigation management, deficit irrigation.

INTRODUÇÃO

A teoria da produção, entre outras análises, determina as condições segundo as quais se verifica a utilização ótima dos recursos produtivos e indica os

meios e métodos a serem utilizados para se alcançar essa otimização (Noronha, 1986; Hoffmann et al., 1987). Para efeito de análises, esses autores consideram relações físicas e econômicas. A base dessas relações é a função de resposta da produção de uma determinada cultura ao(s) fator(es) considerado(s) nas análises.

Essas relações sofrem o efeito de inúmeros fatores, inerentes ao ambiente, à técnica de irrigação, ao agricultor, ao nível de tecnologia empregado, às condições de economia e mercado, além de outros casuais. A interação entre esses fatores modifica a magnitude dos coeficientes e a forma das funções de resposta da produção, determinando a

¹ Aceito para publicação em 4 de abril de 1996.

² Eng. Agr., M.Sc., Prof. Ass., Dep. de Agron./CeCA/UFAL, BR 104 Norte, Km 14, CEP 57072-970 Maceió, AL.

³ Eng. Agríc., Dr., Prof. Adj., Dep. de Engen. Florestal/Câmpus VII/UFPB, Caixa Postal 64, CEP 58700-970 Patos, PB.

⁴ Eng. Agr., Dr., Prof., Dep. de Engenharia Rural/ESALQ/USP, Av. Pádua Dias, 11, CEP 13418-900 Piracicaba, SP.

⁵ Eng. Agr., M.Sc., Dep. de Engenharia Rural, ESALQ/USP.

significância e a consistência das análises e as interpretações delas decorrentes. Hargreaves & Samani (1984) já evidenciavam isto quando apresentaram várias considerações econômicas sobre a produção de diversas culturas, em função de níveis de preços, ambientes, métodos de irrigação, magnitude da altura de chuva e tipos de fontes de um determinado fator (nitrogênio mineral ou orgânico, por exemplo), entre outros. Colwell (1986) também discutiu os mesmos aspectos, considerando os efeitos do clima e dos solos sobre os níveis ótimos dos fertilizantes.

Na maioria das situações, principalmente em regiões secas, uma condição particularmente importante a ser considerada no planejamento da irrigação é a limitação de água. Nessas regiões, é necessário a otimização dos recursos hídricos disponíveis para se maximizar a renda líquida por unidade de volume de água utilizado. Para tanto, a expressão matemática que relaciona a produção ao fator de produção, as funções de custo e de renda líquida para as condições de interesse devem ser conhecidas.

Em situações em que a água é limitante, a utilização de irrigação com déficit permite maior retorno econômico do que a de irrigação completa (Hargreaves & Samani, 1984; James & Lee, 1971 e English & Nuss, 1982, citados por English, 1990). A definição de um intervalo de manejo da irrigação, a partir de uma função de produção conhecida, permite a utilização racional da irrigação com déficit (English, 1990).

Vale lembrar que, numa economia instável, os preços reais sofrem amplas oscilações, influenciando na definição da estratégia ótima de irrigação.

Este trabalho tem como objetivo definir estratégias ótimas de irrigação, considerando a água como fator limitante da produção e diferentes valores para o preço do produto.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido tomando-se por base as funções de produção do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) ao uso de nitrogênio e água de irrigação, obtidas por Frizzone (1986).

As funções de produção com doses de nitrogênio de 60, 90 e 120 kg/ha, respectivamente, em função de diferentes lâminas de irrigação, foram:

$$Y(w) = -574,228 + 9,477W - 0,00833W^2 \quad (1)$$

$$Y(w) = -624,123 + 10,187W - 0,00849W^2 \quad (2)$$

$$Y(w) = -649,905 + 10,442W - 0,00935W^2 \quad (3)$$

onde,

Y(W) - produção de grãos em kg/ha
W - lâmina total de irrigação (mm).

De acordo com informações de Preços... (1994), os preços reais do feijão, recebidos pelos produtores no período de janeiro a dezembro de 1993, variaram de US\$21,07 a US\$41,28 por saca de 60 kg, com média, nos doze meses, de US\$31,51. O preço da água estimado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1994), no período de fevereiro à outubro de 1993, para as áreas irrigadas sob pivô-central na região de Guaira, (SP), variou de US\$0,32 à US\$0,74/mm.ha, com média de US\$0,5/mm.ha. Com base em tais informações, neste trabalho foram utilizados os preços médios do produto (Pi) e da água (Pw) de US\$0,5/kg e US\$0,5/mm.ha, respectivamente. Para análise da influência da variação de preços na definição de estratégias ótimas de irrigação, considerou-se uma variação de Pi de US\$0,2 a US\$1,0/kg.

Na definição da estratégia ótima de irrigação, considerou-se que:

(1) as funções de produção são polinômios do segundo grau da forma:

$$Y(w) = R_0 + R_1W + R_2W^2 \quad (4)$$

onde,

Y - produção em kg/ha

R_i - coeficientes empíricos (i = 0, 1, 2)

W - lâmina de água (mm).

(2) existe limitação de água;

(3) a lâmina ótima (W_w^{*}) corresponde à lâmina que proporciona a máxima renda líquida por unidade de volume de água aplicado, para um dado preço do produto (Pi) e um dado preço da água (Pw);

(4) a lâmina máxima (W_m) corresponde à lâmina que proporciona a máxima produtividade fisiológica;

(5) a lâmina equivalente (W_{ew}) corresponde à lâmina que proporciona uma renda líquida igual à lâmina máxima (W_m);

(6) a função de custo é linear e expressa da seguinte forma:

$$C_t = C_0 + C_wW \quad (5)$$

sendo C_t o custo total de produção por unidade de área irrigada (US\$/ha), C_o a soma dos custos fixos e custos independentes da irrigação (US\$/ha) e C_w o custo da água de irrigação, incluindo os custos relativos à aplicação de água (US\$/mm.ha).

Para o cálculo dos custos por unidade de volume aplicado (C_{tu} , US\$/m³), utilizou-se a seguinte expressão:

$$C_{tu} = \frac{C_t}{10W} \quad (6)$$

Com base nos custos de produção para cultura do feijoeiro irrigado por pivô-central na região de Guaira, SP (Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1994), para o uso de nitrogênio na base de 60 kg por hectare, o custo médio de produção, excetuando-se o custo da água de irrigação, foi de US\$400/ha (período de fevereiro a outubro de 1993). Com base em tais informações, para este período, foram estimadas as seguintes funções de custo total:

$$C_t = 400 + 0,5W \quad (7)$$

$$C_t = 420 + 0,5W \quad (8)$$

$$C_t = 440,2 + 0,5W \quad (9)$$

O cálculo das lâminas W_m , W_w^* e W_{ew} foi feito a partir das equações (10) a (12), apresentadas por English (1990):

$$W_m = \frac{-R_o}{2R_2} \quad (10)$$

$$W_m^* = \sqrt{\frac{P_i R_o - C_o}{P_i R_2}} \quad (11)$$

$$W_{ew}^* = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (12)$$

Os valores de A, B e C da equação (12) são obtidos pelas equações (13), (14) e (15), respectivamente:

$$A = P_i R_2 \quad (13)$$

$$B = \frac{4P_i R_o R_2 + P_i R_1^2 - 4R_2 C_o}{2R_1} \quad (14)$$

$$C = P_i R_o - C_o \quad (15)$$

O cálculo das rendas bruta e líquida unitárias (US\$/m³) foi feito pelas equações (16) e (17), respectivamente:

$$IB_{W_i} = \frac{P_i Y_{(W_i)}}{10W_i} \quad (16)$$

$$IL_{W_i} = \frac{P_i Y_{(W_i)} - (C_o + C_{W_i} W_i)}{10W_i} \quad (17)$$

onde,

$IB_{(W_i)}$ - renda bruta obtida com a aplicação da lâmina W_i (US\$/m³);

$IL_{(W_i)}$ - renda líquida obtida com a aplicação da lâmina W_i (US\$/m³);

P_i - preço do produto (US\$/kg);

$Y_{(W_i)}$ - produção obtida com a aplicação de W_i (kg/ha);

W_i - lâmina de irrigação (mm);

C_o - custos fixos (US\$/ha);

C_{wi} - custos da água (US\$/mm.ha).

A partir da equação (18), calculou-se a rentabilidade esperada (R_e , %) em função da lâmina de água aplicada:

$$R_e(\%) = \frac{IL_{W_i}}{C_t} 100 \quad (18)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A representação gráfica das funções de produção utilizadas neste trabalho, obtidas para três doses de nitrogênio (60, 90 e 120 kg/ha), é mostrada na Fig. 1. As lâminas máximas e as correspondentes produtividades são 567 mm e 2.121 kg/ha, 600 mm e 2.432 kg/ha, 558 mm e 2.266 kg/ha. Esta situação corresponde à irrigação sem déficit. Observa-se que a lâmina de 600 mm, para a dose de 90 kg/ha de N, proporcionou a máxima produtividade em relação às demais. Com o aumento da dose de N de 60 para 90 kg/ha, a lâmina requerida para produção máxima aumentou. Shalhevet et al., citados por Hargreaves & Samani (1984), afirmaram que o aumento da disponibilidade de N aumenta o requeri-

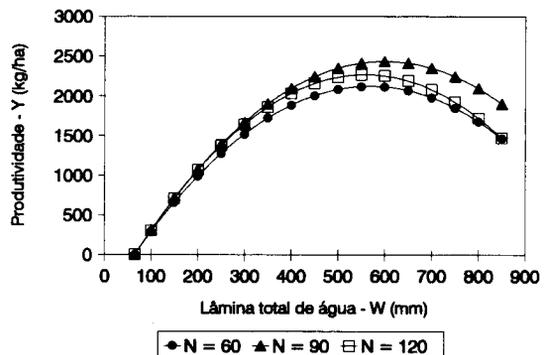


FIG. 1. Funções de resposta da produção de feijão à água, com doses de 60, 90 e 120 kg/ha de N.

mento da lâmina de água para atingir a máxima produção. Observa-se, entretanto, que isto ocorre enquanto a dose de N não for excessiva para a planta, conforme se observa no aumento da dose de 90 para 120 kg/ha de N (Frizzone, 1986).

Observa-se ainda na Fig. 1 que, para o período e nas condições em que os dados foram obtidos, não há produção sem o uso de irrigação, sendo necessária uma lâmina superior a 65 mm, aproximadamente, para haver produção.

As curvas de produto físico marginal da água (PFMw), apresentadas na Fig. 2, comportam-se linearmente em decorrência de as funções de produção utilizadas serem da forma polinomial quadrática. O produto físico marginal da água (PFMw), em função da lâmina de irrigação, diminui com o aumento da lâmina aplicada. Quando $PFMw = 0$, as lâminas de irrigação correspondem ao máximo rendimento. Os maiores valores de PFMw com a dose de 90 kg/ha de N indicam que essa dose proporcionou melhor resposta da cultura à aplicação de água. Os valores de $PFMw < 0$, com essa dose de N, indicam que é irracional a aplicação de lâminas superiores a 600 mm. Este fato está de acordo com a lei dos rendimentos marginais decrescentes, que estabelece que o efeito de um insumo depende da quantidade já utilizada de outros insumos (Noronha, 1986).

A Fig. 3 mostra as curvas de renda bruta (IB, US\$/m³) e os custos (C_i, US\$/m³), para um preço fixo do produto igual a US\$0,5/kg e um preço da

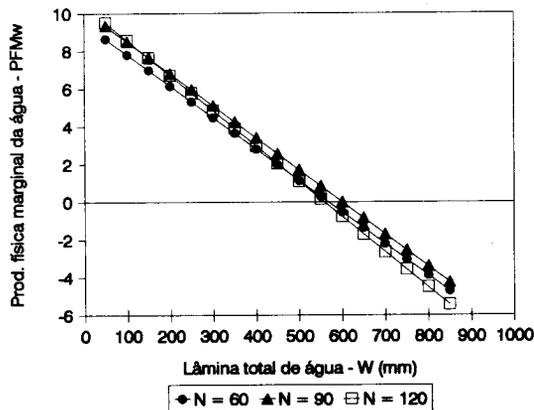


FIG. 2. Produtividade física marginal da água (PFMw), com doses de 60, 90 e 120 kg/ha de N.

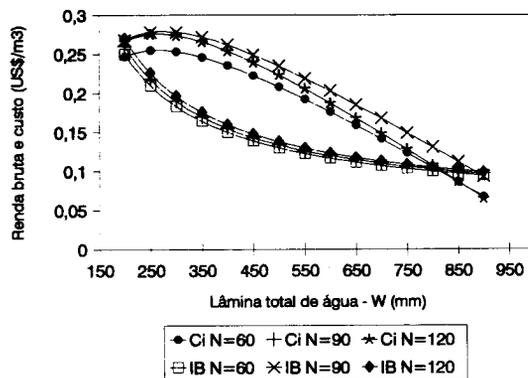


FIG. 3. Renda bruta (IB) e custo (C_i) em função da lâmina de água, com doses de 60, 90 e 120 kg/ha de N.

água igual a US\$0,5/mm.ha. Observa-se que os valores de renda bruta correspondentes às três doses de N são superiores aos custos para lâminas no intervalo de 200 a 800 mm, aproximadamente, indicando que, nesse intervalo, a renda líquida é sempre positiva. As curvas de custo apresentam um comportamento decrescente em virtude da diluição dos custos com o aumento do volume de água aplicado. Do mesmo modo, a renda bruta diminui com o aumento da lâmina aplicada, a partir de 300 mm, aproximadamente. Isso é explicado pelo fato de que a resposta da produção ao volume de água aplicado diminui com o incremento de lâmina. Observa-se ainda na Fig. 3 que a renda líquida corresponde à diferença vertical entre os pontos das funções de renda bruta e das respectivas funções de custo, com uma mesma dose de N. O ponto de máxima renda líquida é dado pela maior distância vertical entre as curvas, a qual ocorre exatamente onde suas declividades são iguais, isto é, onde os decrementos de renda bruta e de custos por unidade de lâmina são os mesmos. Considerações idênticas a esse respeito foram feitas por Barrett & Skogerboe (1980).

A Fig. 4 representa a renda líquida (US\$/m³) em função da lâmina de irrigação (mm), com as três doses de N utilizadas. Para $P_w = US\$0,05/m^3$ e $P_i = US\$0,5/kg$, encontrou-se, com as doses de 60, 90 e 120 kg/ha de N, respectivamente, os seguintes intervalos de manejo racional de água: 290 a 567 mm, 287 a 600 mm, e 293 a 558 mm. Os limites

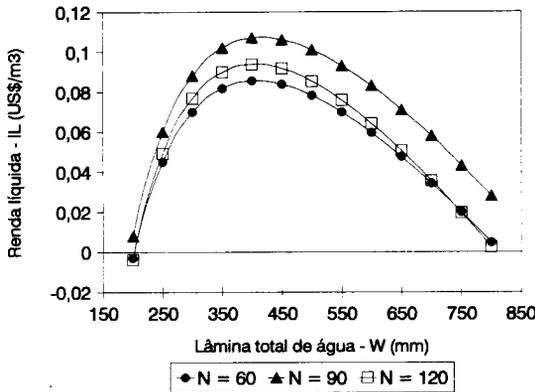


FIG. 4. Renda líquida em função da lâmina de água, com doses de 60, 90 e 120 kg/ha de N.

inferiores de cada intervalo representam a lâmina equivalente (W_{ew}), a qual proporciona uma significativa economia de água em relação à lâmina de máxima produção (51, 49 e 53% da lâmina máxima). Os limites superiores correspondem à lâmina que maximiza o rendimento. As lâminas ótimas (W_w^*), obtidas com as três doses de N, foram 406, 415 e 405 mm, respectivamente, as quais correspondem a 72, 69 e 73% da lâmina máxima (W_m). Portanto, a aplicação de W_w^* representa uma economia significativa de água, com aumento da renda líquida de 30,0, 29,5 e 26,8%, com as doses de 60, 90 e 120 kg/ha de N, quando comparado com W_m . Os resultados mostram que a dose de 90 kg/ha de N proporcionou uma maior renda líquida quando comparada com as demais doses.

Para os valores de $P_w = US\$0,05/m^3$ e $P_i = US\$0,5/kg$, observa-se na Fig. 5 que o cultivo do feijão, nas condições estudadas, só é rentável com a aplicação de lâminas entre 200 e 800 mm, aproximadamente. As rentabilidades máximas calculadas são obtidas com as lâminas de 444, 468 e 445 mm, respectivamente, com as doses de 60, 90 e 120 kg/ha de N. Verifica-se, portanto, que a lâmina correspondente à máxima rentabilidade é superior àquela que proporciona a máxima renda líquida por unidade de volume. Com a aplicação da lâmina W_w^* , as rentabilidades obtidas com as três doses de N correspondem a 58, 70 e 59%, respectivamente, enquanto, para as lâminas de máxima rentabilidade, os valores obtidos foram de 60, 75 e 62%. Verifica-

-se que a dose de 90 kg/ha de N proporciona a maior rentabilidade.

Para diferentes valores de preço do produto (P_i), obteve-se o gráfico de W_w^* e W_{ew} , conforme mostra a Fig. 6. Observa-se que a lâmina ótima para manejo da irrigação depende de P_i . À medida que P_i aumenta, W_w^* diminui. Um comportamento similar é observado na mesma figura, para W_{ew} . Com o aumento de P_i , os valores de W_{ew} tendem a distanciarem-se de W_w^* , aumentando o intervalo de manejo racional de água.

Os valores de W_w^* para diferentes valores de P_i indicam que, estando o preço do produto elevado, é recomendável economizar água para aumentar a área cultivada, com conseqüente aumento da produção.

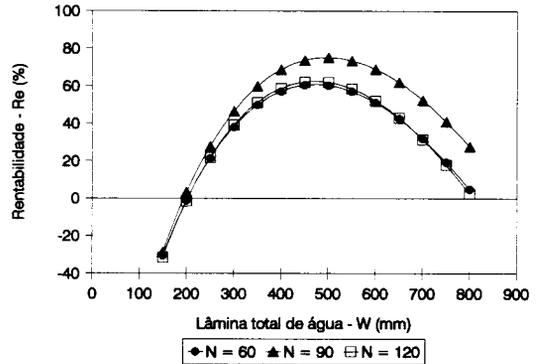


FIG. 5. Rentabilidade em função da lâmina de água, com doses de 60, 90 e 120 kg/ha de N.

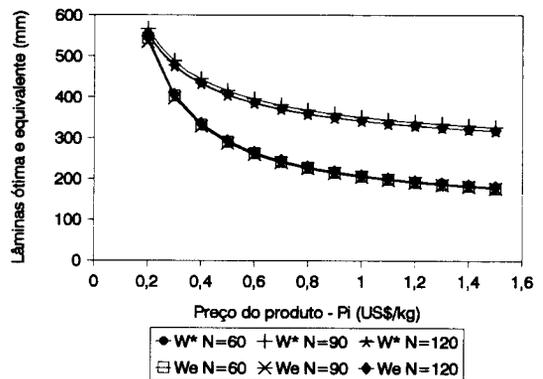


FIG. 6. Lâminas de água ótima (W^*) e equivalente (W_e), em função do preço do produto (P_i), com doses de 60, 90 e 120 kg/ha de N.

No entanto, um P_i baixo indica que não é recomendável aumentar a produção, devendo a água disponível ser utilizada na parcela, sem incremento de área cultivada.

As Figs. 7, 8 e 9 apresentam a variação na renda líquida (US\$/m³) em função da lâmina de irrigação (mm), para diferentes valores de P_i . Observa-se nessas figuras que o intervalo de manejo racional de água varia amplamente conforme a variação de P_i . Tomando-se, por exemplo, a função de produção obtida para uma quantidade fixa de 60 kg/ha de N, para $P_i = \text{US}\$0,5/\text{kg}$, W_{ew} e W_w^* correspondem a 51 e 72% de W_m , respectivamente. Se P_i aumenta para 1,0, W_{ew} e W_w^* são 36 e 60% de W_m . Percebe-se, portanto, que, à medida que o preço do produto au-

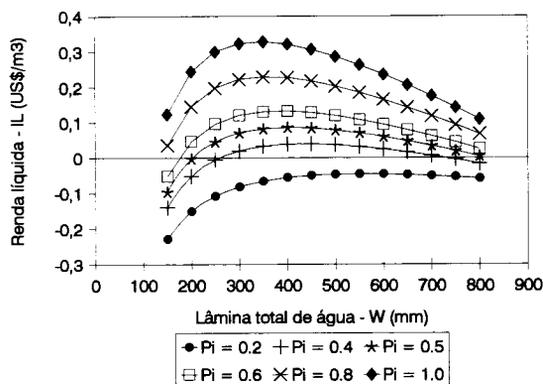


FIG. 7. Renda líquida em função da lâmina de água e do preço do produto, com dose de 60 kg/ha de N.

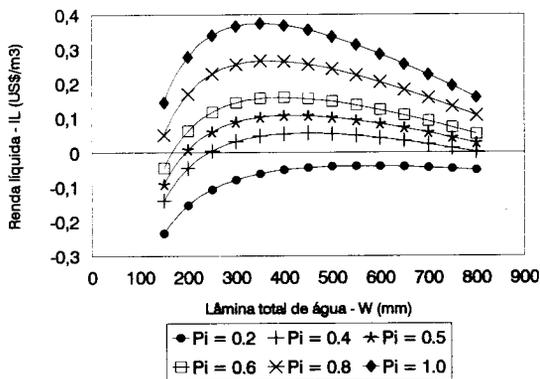


FIG. 8. Renda líquida em função da lâmina de água e do preço do produto, com dose de 90 kg/ha de N.

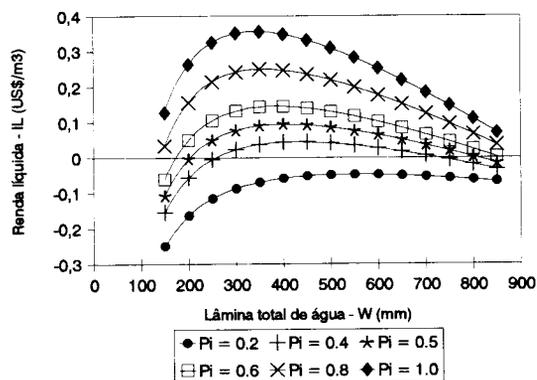


FIG. 9. Renda líquida em função da lâmina de água e do preço do produto, com dose de 120 kg/ha de N.

menta, as lâminas W_{ew} e W_w^* diminuem em relação à lâmina máxima, havendo um conseqüente aumento no intervalo de manejo racional de água. Portanto, a economia de água com a aplicação de W_{ew} ou W_w^* depende do preço do produto. Considerando as doses de 90 e 120 kg/ha de N, para uma variação de P_i de US\$0,5/kg para US\$1,0/kg, os valores de W_{ew} são reduzidos de 48 para 34% e de 53 para 37% de W_w . Nesse caso, os valores de W_w^* também seriam reduzidos de 69 para 58% e de 72,5 para 61%.

A análise das Figs. 7, 8 e 9 permite ainda observar que, para baixos valores de P_i , a renda líquida pode-se tornar muito pequena ou ainda sempre negativa qualquer que seja o valor da lâmina de irrigação (por exemplo, $P_i = \text{US}\$0,2/\text{kg}$). Desse modo, nas condições analisadas, um preço aproximado de US\$0,4/kg pode ser considerado como um valor mínimo na análise de decisão sobre a viabilidade econômica da irrigação.

Para os diferentes valores de P_i , um mesmo incremento de lâmina de água proporciona efeitos diferentes em termos de renda líquida. Até a lâmina ótima, obtém-se um incremento de renda, ocorrendo um decremento no caso da aplicação de lâminas superiores. No caso de um elevado valor de P_i , o decremento na renda líquida é mais acentuado, porém, dado o elevado preço do produto, são obtidas rendas sempre superiores às que seriam obtidas com valores de P_i mais baixos.

CONCLUSÕES

1. A irrigação com déficit em situações em que a água é fator limitante é uma estratégia importante no planejamento da irrigação, representando grande economia de água e de capital e proporcionando produção e rendas líquidas economicamente satisfatórias.

2. O manejo da irrigação com a aplicação da lâmina ótima, para o intervalo considerado de variação de preços do produto, resulta numa economia de água de 0,5 a 42% da lâmina máxima, dependendo da dose de N utilizada. O uso da lâmina equivalente proporciona uma economia de água de 2 a 66%.

3. A aplicação da lâmina ótima resulta na máxima renda líquida, porém não significa máxima rentabilidade.

4. Entre as doses de N utilizadas, a de 90 kg/ha proporciona melhor resposta em termos de produção e de renda líquida.

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

6. À medida que o preço do produto diminui, o manejo da irrigação com a aplicação de lâminas próximas da ótima resulta em maior economia de água.

REFERÊNCIAS

- BARRETT, J.W.H.; SKOGERBOE, G.V. Crop production functions and the allocation and use of irrigation water. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.3, n.1, p.53-64, July 1980.
- COLWELL, J. Estudo dos efeitos de solo e clima sobre a resposta de culturas a fertilizantes. In: CONTINI, E.; ARAÚJO, J.D.; OLIVEIRA, A.J.de; GARRIDO, W.E. **Planejamento da propriedade agrícola: modelos de decisão**. 2.ed. Brasília: EMBRAPA-DDT, 1986. p.67-100. (EMBRAPA-DEP. Documentos, 7).
- ENGLISH, M.J. Déficit irrigation. I. Analytical framework. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.116, n.3, p.339-412, 1990.
- FRIZZONE, J.A. **Funções de resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) ao uso de nitrogênio e lâmina de irrigação**. Piracicaba: ESALQ, 1986. 133p. Tese de Doutorado.
- HARGREAVES, G.H.; SAMANI, Z.A. Economic considerations of deficit irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.110, n.4, p.343-358, 1984.
- HOFFMANN, R.; ENGLER, J.J.C.; SERRANO, O.; THAME, A.C.M.; NEVES, E.M. Teoria da produção. In: HOFFMANN, R.; ENGLER, J.J. C.; SERRANO, O.; THAME, A.C.M.; NEVES, E.M. **Administração da empresa agrícola**. 5.ed. São Paulo: Pioneira, 1987. cap.4, p.71-116. (Biblioteca Pioneira de Ciências Sociais. Economia. Série Estudos Agrícolas).
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (São Paulo, SP). Racionalização do uso da água de irrigação nos municípios de Guaíra e Casa Branca SP. **Relatório Técnico**, São Paulo, v.2, n.30254, 27p., 1994.
- NORONHA, J.F. Teoria da produção aplicada à análise econômica de experimentos. In: CONTINI, E.; ARAÚJO, J.D.; OLIVEIRA, A.J. de; GARRIDO, W.E. **Planejamento da propriedade agrícola: modelos de decisão**. 2.ed. Brasília: EMBRAPA-DDT, 1986. p.23-65. (EMBRAPA-DEP. Documentos, 7).
- PREÇOS AGRÍCOLAS, Piracicaba, n.87, p.10-52, jan. 1994.