

ADUBAÇÃO NITROGENADA DO MILHO EM UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO EM LINHA

Fernando Campos Mendonça^{1*}; Roberto Dantas de Medeiros²; Tarlei Arriel Botrel³; José Antonio Frizzone³

¹Depto. de Agronomia - UFU, C.P. 593 - CEP: 38400-902 - Uberlândia, MG.

²Embrapa Agroflorestal de Roraima, BR -174, Km 8 - Distrito Industrial - CEP: 69301-970 - Boa Vista, RR.

³Depto. de Engenharia Rural - ESALQ/USP, C.P. 9 - CEP: 13418-900 - Piracicaba, SP.

*e-mail: fcmendon@ufu.br

RESUMO: Foi avaliado o efeito do nitrogênio na cultura do milho através da fertirrigação, utilizando um sistema de irrigação por aspersão em linha e uréia como fonte de N. O sistema de aspersão em linha foi constituído por 3 linhas com cinco aspersores cada uma, cujo espaçamento foi de 6 metros entre si e 12 metros entre as linhas. O fertilizante foi aplicado nas linhas externas e a linha central aplicou apenas água. A lâmina de água total aplicada durante o ciclo foi de 650 mm. Essa aplicação foi feita de forma uniforme, e as doses de nitrogênio foram decrescentes na direção perpendicular às linhas externas de aspersores, variando de 353 a 30 kg/ha de N. Os resultados obtidos mostraram que as diferentes dosagens de nitrogênio afetaram os seguintes parâmetros medidos: altura das plantas, altura de inserção das espigas, produtividade, comprimento das espigas, peso de mil grãos e teor de nitrogênio nos grãos. O ponto de máxima produtividade de grãos (7634 kg/ha) foi estimado através de uma função de produção da cultura em relação ao fator doses de nitrogênio. A máxima produtividade estimada pode ser atingida com uma dose de 262,6 kg/ha de N.

Palavras-chave: fertirrigação, adubação nitrogenada, milho, aspersão em linha

NITROGEN FERTILIZATION OF CORN IN A LINE SOURCE SPRINKLER SYSTEM

ABSTRACT: The nitrogen effect on a corn crop, applied by fertigation through a line source sprinkler system was evaluated, using urea [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$] as nitrogen source. The line source sprinkler system had three pipelines with five sprinklers each. The sprinkler spacing was six meters, and the lateral spacing, twelve meters. Fertigation and irrigation were made by the external lines, and the central line was used only for irrigation. The total water depth applied during the crop cycle was 650 mm. This water application was made in an uniform way along the experimental area, and nitrogen levels decreased along the perpendicular direction to the central sprinkler line, ranging from 353 to 30 kg N/ha. Results showed that different nitrogen levels affected the following crop production factors: plant height, corn cob insertion height, corn yield, corn cob length, thousand grain weight, and nitrogen content of grains. The point of maximum grain yield (7634 kg/ha) was estimated by a crop production function in relation to nitrogen levels. The maximum grain yield was obtained with 262.6 kg N/ha.

Key words: fertigation, nitrogen fertilization, corn, line source

INTRODUÇÃO

O termo "fertirrigação" define a aplicação de fertilizantes através da água de irrigação. Viets Jr. et al (1967) afirmaram que a fertirrigação teve um grande avanço a partir do desenvolvimento de alguns equipamentos de irrigação (pivô central e irrigação localizada) e com o advento dos adubos líquidos, principalmente com o fertilizante amoniacal (amônia anidra). Frey (1981) afirmou que a fertirrigação pode reduzir o custo dos fertilizantes à metade ou à terça parte em relação a outros

métodos. A fertirrigação possibilita a diminuição do trânsito de máquinas na área irrigada e uma economia de combustível e mão-de-obra em relação à aplicação tradicional de fertilizantes.

No caso de nutrientes muito móveis, como o nitrogênio, a fertirrigação possibilita maior divisão da aplicação do fertilizante, reduzindo as perdas por lixiviação. Dentre os fertilizantes nitrogenados, a uréia tem sido bastante utilizada na fertirrigação. Seu pH em solução é 7,6; permite mistura com vários fertilizantes e apresenta baixa corrosividade em diversos materiais.

A uniformidade de distribuição do sistema de irrigação determina a qualidade da fertilização. Em sistemas de irrigação por aspersão convencional a uniformidade de distribuição de água e fertilizantes é definida pelo perfil de distribuição dos aspersores utilizados e pela disposição do equipamento no campo.

O sistema de irrigação por aspersão em linha ("line source sprinkler system") é muito empregado em pesquisas. Esse sistema tem sido utilizado em diversos estudos sobre lâmina de irrigação e produtividade, tais como os de Faria (1981), Lauer (1983) e Frizzone (1986), contribuindo grandemente para a determinação de funções de produção das culturas para o fator água. Constitui-se de uma linha de aspersores estreitamente espaçados entre si, aplicando água em doses decrescentes na direção perpendicular à tubulação. Se o fertilizante for diluído na água de irrigação, sua distribuição acompanhará o perfil de distribuição de água do emissor utilizado. Assim, o sistema de aspersão em linha também pode ser utilizado para estudos de fertilização e produtividade das culturas.

Trabalhos realizados com o sistema de aspersão em linha indicaram que seu uso pode estender-se ao estudo de diferentes doses de produtos químicos aplicadas através do sistema de irrigação (quimigação). Lauer(1983) utilizou um sistema denominado "triple line source" no estudo da distribuição de fertilizantes nitrogenados, injetando o fertilizante na linha central de aspersores do sistema. As duas outras linhas, uma de cada lado da central, proporcionaram homogeneidade da lâmina de água na área experimental, enquanto a dose de fertilizante nitrogenado variou perpendicularmente com a distância da linha central de aspersores. Morkoc et al (1985) fizeram uma análise da produção de sorgo irrigado por um sistema de aspersão em linha, utilizando modelagem matemática. Uma linha aplicou água pura e a outra, água salinizada. A lâmina de água foi homogênea na área experimental, enquanto o teor de salinidade variou perpendicularmente com a distância da linha de aspersores que aplicou água salina.

Faria (1981) e Frizzone (1986) citaram as seguintes vantagens da utilização do sistema de aspersão em linha: economia de área, equipamento e mão-de-obra; facilidade de instalação e operação e maior número de tratamentos em área menor que no sistema de aspersão convencional. Hanks et al (1980)

afirmaram que o objetivo da utilização do sistema de aspersão em linha é viabilizar a obtenção de dados quantitativos para a determinação de funções de produção de água, aliada ou não a outros fatores (fertilizantes e/ou variedades, principalmente).

A cultura do milho tem sido alvo de vários estudos, visando a determinação dos níveis ótimos de diversos fatores que influenciam sua produção, como fenologia, área foliar, pragas, doenças, exigências hídricas e nutricionais. Ignatief & Page (1958) afirmaram que uma tonelada de milho remove do solo, cerca de 27,9 kg de N (2,79%); 20,5 kg de K (2,05%); 10,3 kg de P (1,03%); 1,6 kg de Ca (0,16%); e 1,3 kg de S (0,13%). Resende et al (1990), entretanto, afirmaram que a extração de nutrientes varia em percentagem com a produtividade. Este fato é confirmado por Arnon (1975), que apresentou a absorção de nutrientes pela cultura do milho em diversos níveis de produtividade (TABELA 1).

TABELA 1 - Extração de nutrientes pelo milho em diferentes níveis de produtividade.

Produtividade	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
-----	-----	-----	-----
kg/ha			
5.000	125	50	75-100
6.000	135	55	90-120
8.000	175	75	150
9.500	187	85	230

FONTE: Arnon (1975)

Este trabalho objetivou estudar o efeito de diferentes doses de nitrogênio na cultura do milho, utilizando um sistema de irrigação por aspersão em linha para a aplicação do fertilizante.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado no *campus* da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", município de Piracicaba, SP. O solo foi classificado como Terra Roxa Estruturada série Luiz de Queiroz (Ranzani et al., 1966), ou como Oxic Paleudalf, segundo a classificação norte-americana. A caracterização química e física do solo é apresentada na TABELA 2.

Utilizou-se a cultura do milho (*Zea mays* L.), cultivar AG-303 (híbrido duplo de ciclo precoce). A recomendação seguida para a adubação de plantio é apresentada na TABELA 3, visando a produção de quatro a seis toneladas de grãos de milho por hectare.

A TABELA 4 apresenta os parâmetros da equação de Van Genuchten (Genuchten, 1980), que relaciona a umidade atual do solo com a tensão da água no mesmo, sendo utilizada para a determinação da lâmina de água a aplicar por irrigação. A equação de Van Genuchten é apresentada a seguir:

$$q_a = q_r + \frac{q_s - q_r}{\left[1 + (a \cdot |\psi_m|)^n\right]^m}$$

onde,

θ_a - umidade atual (cm^3/cm^3)

θ_r - umidade residual (cm^3/cm^3)

θ_s - umidade de saturação (cm^3/cm^3)

Ψ_m - potencial matricial (m.c.a.; 1 mca = 9,809 kPa)

α , m , n : - coeficientes empíricos obtidos por regressão polinomial

O controle da irrigação foi feito com o auxílio de tensiômetros, com aferição por um tanque Classe A. Na área experimental foram instaladas quatro baterias de dois tensiômetros, à profundidade de 15 e 30 cm em cada bateria.

O tanque Classe A que forneceu as leituras está localizado a cerca de dois mil metros de distância da área experimental, em um posto agrometeorológico. A leitura de ambos foi feita diariamente e o momento de irrigar foi determinado através da medição da tensão da água no solo. A cultura foi irrigada sempre que o potencial matricial da água no solo atingiu a faixa de -50,66 a -81,06 kPa (-0,5 a -0,8 atm, respectivamente).

A equação de Van Genuchten foi utilizada para determinar a lâmina de água a aplicar em cada irrigação. Conhecendo-se a tensão da água no solo, aplica-se essa equação para determinar a umidade volumétrica atual ($\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O}/\text{cm}^3$ solo). Estabelecendo-se os níveis mínimo e máximo de umidade volumétrica em cada camada, determina-se a lâmina de água disponível no solo através da equação:

TABELA 2 - Resultados das análises química e física do solo.

pH	M.O.	P	K	Ca	Mg	H+Al	SB	T	V	Areia	Silte	Argila
(CaCl_2)	(g/kg)	(mg/dm^3)	(mmol $_e$ /dm 3)			-----			(%) -----			
5,0 B	1,7	6 MB	4,3A	49	15A	25	68	93	73A	20	15	65

dg = 1,4 g/cm 3 ; VIB = 12 mm/h; Classificação do solo: muito argiloso.

Obs.: MB= muito baixo; B= baixo; M= médio; A= alto; MA= muito alto.

TABELA 3 - Recomendações técnicas para adubação de plantio de milho.

Cultura	Calcário t/ha	Adubação de Plantio (kg/ha)					
		N	P $_2$ O $_5$	K $_2$ O	S*	B	Zn
Milho	0,0	15	80	20	30	-----	4,0

* Aplicar somente se a formulação NPK não contiver o elemento

TABELA 4 - Parâmetros de ajuste da curva de retenção à equação de Van Genuchten.

Profundidade (cm)	a	m	n	θ_r (cm^3/cm^3)	θ_s (cm^3/cm^3)	R 2
0-10	0,2268	0,2375	1,3116	0,204	0,482	0,978
10-20	0,2722	0,2107	1,2669	0,213	0,453	0,967
20-30	0,1460	0,2012	1,2520	0,244	0,449	0,935
30-40	0,1743	0,2049	1,2578	0,271	0,502	0,944

FONTE: Moura(1992)

$$hd = (q_{cc} - q_{crit.}) \cdot z$$

onde,

h_d = lâmina máxima de água disponível (mm);

θ_{cc} = umidade volumétrica máxima, ou capacidade de campo (cm^3/cm^3)

$\theta_{crit.}$ = umidade volumétrica mínima, denominada umidade crítica (cm^3/cm^3);

z = profundidade da camada de solo (mm)

A lâmina de água reposta através de irrigações foi calculada através da seguinte equação:

$$h_i = \frac{(q_{cc} - q_a) \cdot z}{E_i}$$

onde,

h_i - lâmina de água reposta pela irrigação (mm);

θ_a - umidade atual do solo (cm^3/cm^3);

E_i - eficiência de irrigação

Os tratamentos foram dispostos em quatro blocos na área experimental, dispostos paralelamente às curvas em nível do terreno. Os tratamentos constituíram-se de oito dosagens de nitrogênio ($N_1=319,47$ kg/ha; $N_2=262,59$ kg/ha; $N_3=176,38$ kg/ha; $N_4=149,84$ kg/ha; $N_5=97,38$ kg/ha; $N_6=85,51$ kg/ha; $N_7=53,77$ kg/ha e $N_8=48,79$ kg/ha), dispostos em direção perpendicular às linhas de aspersores, perfazendo um total de trinta e duas parcelas, conforme mostra a Figura 1.

Cada unidade experimental teve dimensões de três metros de comprimento e seis metros de largura, com área de $18 m^2$, conforme mostra a Figura 2. A área útil das unidades experimentais, destinada à colheita de grãos, foi de $8 m^2$ ($2,0 \times 4,0$ m). A semeadura foi manual, logo após a primeira irrigação, para que a umidade estivesse próxima da capacidade de campo (potencial matricial de $-5,07$ kPa, ou $-0,05$ atm).

A emergência das plântulas ocorreu quatro dias após a semeadura, e aos quinze dias após a germinação (15 d.a.g.) realizou-se o desbaste para atingir a população desejada de 60.000 plantas/ha. A colheita manual ocorreu aos 127 dias após a germinação (127 d.a.g.), coletando-se as espigas da área útil das unidades experimentais.

No experimento houve três linhas de aspersores, sendo que as externas foram utilizadas para fertirrigação e irrigação, enquanto que a linha do meio foi utilizada apenas para irrigação, conforme mostra a Figura 3.

A aplicação do fertilizante foi feita através de um tanque de derivação, conforme mostra a Figura 4. Um registro de gaveta na tubulação proporcionou a diferença de pressão necessária para que a água passasse pela tubulação de entrada do tanque, saindo pela outra tubulação e levando o fertilizante contido no tanque até os aspersores, que o distribuíram na área experimental.

A fonte de N utilizada foi a uréia (45% N), devido à sua elevada solubilidade em água. A aplicação do fertilizante foi parcelada em quatro

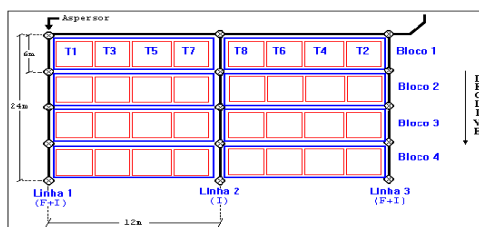


Figura 1 - Área experimental e equipamento de irrigação.

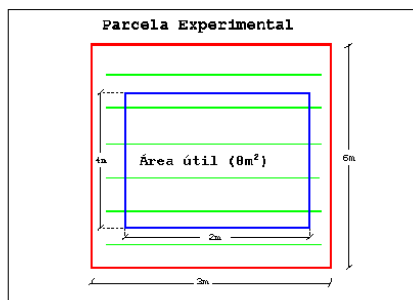


Figura 2 - Esquema da unidade experimental com área total e área útil.

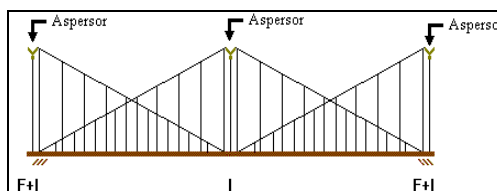


Figura 3 - Perfil de distribuição de água e fertilizante.

épocas, determinadas de acordo com o estágio fenológico da cultura: plantas com 7-8 folhas (23 d.a.g.); plantas com 10-11 folhas (34 d.a.g.); plantas com 13-14 folhas (42 d.a.g.) e plantas com 15-16 folhas (49 d.a.g.).

As doses de uréia aplicadas em cada época foram iguais em uma mesma linha de aspersores utilizada para fertirrigação. O tanque de derivação recebeu 3,5 kg de uréia, em cada aplicação feita pela Linha 1, e 3,0 kg de uréia, nas aplicações feitas pela linha 3. Para a aplicação de fertilizantes de forma diferenciada, conectou-se apenas uma linha de fertirrigação de cada vez. Para manter a lâmina de água homogênea em toda a área, aplicou-se água através da linha central por um espaço de tempo igual ao utilizado para a fertirrigação.

As doses de fertilizante em cada tratamento foram determinadas através da lâmina de água coletada por uma linha de recipientes com diâmetro médio de 103,1 mm, espaçados de dois metros entre si, conforme mostra a Figura 5.

A população final de plantas em cada bloco foi analisada para verificar possíveis diferenças que pudessem afetar a análise do experimento. Foi determinada através da média da população de plantas em cada tratamento, obtida através da contagem de três fileiras de plantas, perfazendo um total de nove metros lineares por tratamento.

Foram escolhidas e marcadas três plantas em cada tratamento, para as medições de sua altura em três fases do ciclo: plantas com 7 a 8 folhas (23 d.a.g.); plantas com

inflorescência masculina (53 d.a.g.); plantas com espigas (80 d.a.g.). Na fase vegetativa, mediu-se a altura das plantas até a última folha desenrolada. A partir da fase reprodutiva, mediu-se a altura de plantas até a inserção da última folha. Na última medição de altura de plantas foi também incluída a medição da altura das espigas nas plantas em cada tratamento.

A produção foi determinada através da pesagem dos grãos colhidos (kg/ha) na área útil de cada parcela experimental (8m²) e correção posterior de peso para a umidade padrão (13%). O procedimento foi similar para a determinação do peso de mil grãos, mas com a diferença da unidade de medida (kg/ha para a produção e gramas, para peso de mil grãos). Em relação às espigas foram medidos o comprimento, o diâmetro e o diâmetro dos sabugos. O comprimento dos grãos foi determinado através da diferença entre os diâmetros da espiga e do sabugo, medidos com um paquímetro. O teor de nitrogênio total dos grãos foi determinado através do método de digestão e destilação de Kjeldahl.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A população final de plantas foi submetida à análise de variância e não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos, permitindo uma análise dos resultados admitindo-se uma competição homogênea entre as plantas na área experimental. Foram feitas correções da população de plantas nas parcelas para determinação da produtividade em um nível populacional padronizado (60.000 plantas/ha).

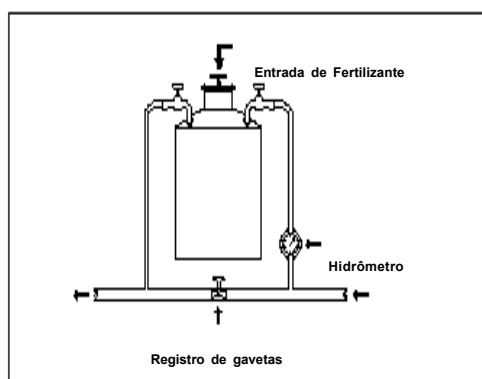


Figura 4 - Tanque de aplicação de fertilizantes.

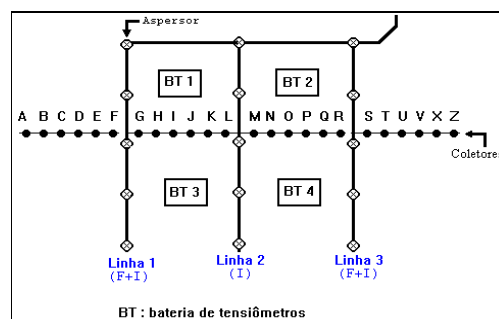


Figura 5 - Distribuição de coletores na área experimental.

Os resultados obtidos demonstraram que o nitrogênio tem grande influência sobre a produtividade, devido às modificações ocorridas na planta pela quantidade absorvida desse nutriente.

A TABELA 5 e a Figura 6 mostram a evolução da altura das plantas ao longo do ciclo, nas três épocas de medição pré-definidas. Não foram detectadas diferenças significativas na primeira medição de altura (7-8 folhas, 23 d.a.g.). A primeira aplicação de fertirrigação foi feita no dia da primeira medição, estabelecendo uma homogeneidade de adubação na área experimental até esse momento.

A partir da segunda medição das plantas (54 d.a.g., plantas com inflorescência masculina, a análise estatística indicou diferenças significativas para as médias dos tratamentos. Os tratamentos N1 e N2 foram superiores aos tratamentos N7 e N8, enquanto o tratamento N2 diferiu de todos, exceto de N1. Nesse período do experimento já se havia aplicado todo o fertilizante nitrogenado (aplicações feitas aos 23 d.a.g., 34 d.a.g., 42 d.a.g. e 49 d.a.g.). A época

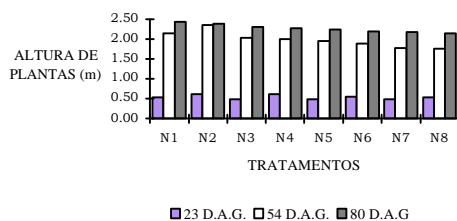


Figura 6 - Evolução da altura de plantas ao longo do ciclo.

da segunda medição de altura das plantas marcou justamente o fim do período vegetativo e o início do período reprodutivo.

Observando-se as colunas de altura relativa (%) das plantas é possível perceber que no tratamento N2 as plantas praticamente atingiram sua altura máxima na época da segunda medição (98,53% do máximo), enquanto as plantas dos tratamentos N7 e N8 tiveram cerca de 18,5% do seu crescimento durante o período de florescimento e formação dos grãos (54 a 80 d.a.g.). Pode-se inferir que nesse período as plantas dos tratamentos N7 e N8 transferiram parte significativa de suas reservas para o crescimento vegetativo, enquanto as plantas do tratamento N2 utilizaram suas reservas para fins reprodutivos, ou seja, formação e início do enchimento de grãos.

Na terceira medição das plantas (80 d.a.g.) o tratamento N1 foi superior aos tratamentos N6, N7 e N8, enquanto os tratamentos N1 e N2 diferiram de N8. A adubação nitrogenada de cobertura influenciou a altura das plantas, sendo que, ao final do ciclo essa altura foi significativamente menor para as menores doses de nitrogênio. Pela observação da Figura 6 é possível afirmar que a fase mais importante de absorção de nutrientes situou-se entre 23 e 54 d.a.g., período no qual deve-se fazer a fertirrigação.

A altura da inserção das espigas nas plantas foi medida, constatando-se diferenças significativas entre os tratamentos, conforme mostra a TABELA 6.

O tratamento N8 foi inferior aos tratamentos N1 a N4 (teste de Tukey ao nível de 5% de significância). Os quatro primeiros

TABELA 5 - Evolução da altura média das plantas (m) nos tratamentos, ao longo do tempo.

Trat.	23 d.a.g.	Alt. Rel. (%)	Teste Tukey*	54 d.a.g.	Alt. Rel. (%)	Teste Tukey*	80 d.a.g.	Alt. Rel. (%)	Teste Tukey*
N1	0,53	21,77	a	2,15	88,09	ab	2,44	100,0	a
N2	0,61	25,65	a	2,35	98,53	a	2,39	100,0	ab
N3	0,50	21,57	a	2,02	87,91	bc	2,30	100,0	abc
N4	0,61	26,85	a	2,00	88,40	bc	2,26	100,0	abc
N5	0,48	21,61	a	1,95	87,35	bc	2,23	100,0	abc
N6	0,55	25,17	a	1,89	86,78	bc	2,18	100,0	bc
N7	0,50	22,84	a	1,77	81,55	c	2,17	100,0	bc
N8	0,52	24,42	a	1,75	81,89	c	2,14	100,0	c

*Teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre tratamentos.

tratamentos (N1 a N4) não diferiram entre si, mas os dois primeiros (N1 e N2) diferiram dos tratamentos N5 a N8.

A produção de grãos da cultura foi determinada e encontra-se na TABELA 7. Através da análise de variância (Teste F) pôde-se verificar que houve diferenças significativas entre os tratamentos.

Verifica-se, pelos resultados obtidos, que a produção de grãos alcançou um valor máximo no tratamento N2 (8041 kg/ha), declinando no tratamento N1 (6238 kg/ha). Isto indicou um excesso de nitrogênio aplicado no tratamento N1, causando diminuição na produtividade da cultura.

Após a constatação de uma produtividade diferenciada da cultura do milho em relação às doses de nitrogênio, partiu-se para a obtenção de uma função de produção que pudesse descrever o fenômeno. Observando-se

TABELA 6 - Altura de inserção das espigas nas plantas (m).

Tratamentos	Média*
N1	1,45 a
N2	1,44 a
N4	1,34 ab
N3	1,32 abc
N5	1,30 bc
N7	1,26 bc
N6	1,24 bc
N8	1,20 c

* Teste de Tukey a 5% . Letras diferentes indicam diferenças significativas entre médias.

TABELA 7 - Produção da cultura do milho no experimento (kg/ha de grãos).

Tratamentos	Média*
N2	8041 a
N1	6238 b
N4	6071 b
N3	5880 b
N5	4485 c
N6	4430 c
N8	2609 d
N7	2464 d

* Teste de Tukey a 5% . Letras diferentes indicam diferenças significativas entre médias.

a tendência dos resultados na TABELA 7 e recorrendo a estudos de modelos matemáticos aplicados na pesquisa biológica (Pereira & Arruda, 1987), concluiu-se que a produtividade obtida poderia ser explicada por uma função exponencial quadrática.

Primeiramente foram obtidas as doses médias de nitrogênio aplicadas em cada parcela, através do ajuste de funções para estimar a dose de nitrogênio em relação à distância da linha de fertirrigação. Foi ajustada uma função para cada linha de fertirrigação, devido à diferença de doses aplicadas em cada linha (L1 e L3). Utilizando recursos matemáticos citados por Kreyszig (1993) e os resultados coletados no campo, chegou-se às seguintes funções:

Para L1:

$$DN_1 = e^{(6,049-0,198x)}$$

Para L3:

$$DN_3 = e^{(5,838-0,187x)}$$

onde,

DN_1 - dose de nitrogênio aplicada na linha 1 (kg/ha de N);

DN_3 - dose de nitrogênio aplicada na linha 3 (kg/ha de N);

x - distância em relação à linha de fertirrigação (m).

A seguir integrou-se as funções obtidas nos intervalos correspondentes a cada tratamento (0-3 m; 3-6 m; 6-9 m e 9-12 m em relação à linha de fertirrigação). dividindo-se o resultado da integração em cada intervalo pelo comprimento das parcelas (3 m). Chegou-se, assim, à dose média aplicada em cada parcela, apresentada na TABELA 8.

A partir dessa TABELA e dos resultados de produtividade em cada tratamento foi possível estimar a função de produção para as doses de nitrogênio na cultura do milho.

A função obtida foi:

$$f(N) = e^{(7,341 + 0,0129 \cdot N - 0,000026 N^2)}$$

onde,

f (N) - produção de grãos (kg/ha)

N - dose de nitrogênio (kg/ha)

Utilizando-se técnicas de diferenciação matemática foi possível determinar a dose de nitrogênio que proporcionou a máxima produtividade para as condições do experimento.

A derivada de primeira ordem da função de produção obtida, utilizada para estimar o ponto de máxima produtividade, é:

$$f'(N) = (-0,082 N + 19,895) e^{(0,0129 N - 0,000026 N^2)}$$

onde,

$f'(N)$ - taxa de variação da produção de grãos em função da variação da dose de nitrogênio (kg/ha);

N = dose de nitrogênio aplicada (kg/ha de N);

Igualando-se a derivada de primeira ordem a zero e efetuando-se os cálculos, obteve-se o ponto de máxima produtividade:

$$f'(N) = 0 \Rightarrow N = 242,6 \text{ Kg/ha de N}$$

$$f(242,6) = 7634 \text{ kg /ha de grãos}$$

A partir do ponto de máxima produtividade, qualquer acréscimo na dose de nitrogênio causa um decréscimo na produtividade. A precisão da estimativa está ligada à precisão do modelo matemático utilizado.

TABELA 8 - Estimativa de dose média de nitrogênio aplicada em cada tratamento.

Tratamento	Dose média de N (kg/ha)
N1	319,47
N2	262,59
N3	176,38
N4	149,84
N5	97,38
N6	85,51
N7	53,77
N8	48,79

TABELA 9 - Dados observados e estimados de produção em função da dose de nitrogênio.

Dose de N	Prod. Observada (kg/ha)	Prod. Estimada (kg/ha)	Diferença (%)
353,41	6237,80	6691,38	7,27
227,11	8041,05	7597,84	-5,51
179,39	5880,19	6683,82	13,67
143,68	6071,15	5944,27	-2,09
114,21	4484,56	4232,92	-5,61
86,50	4430,44	3842,84	-13,26
33,69	2463,99	2862,53	16,17
30,05	2609,17	2720,30	4,26

O modelo utilizado no experimento apresentou coeficiente de determinação (R^2) de 0,9375. Os resultados estimados tiveram uma boa correlação com os observados no experimento, conforme mostra a TABELA 9.

O comprimento das espigas é apresentado na TABELA 10. A análise estatística dos resultados mostra que o tratamento N2 diferiu significativamente dos tratamentos N6, N7 e N8, não diferindo dos demais.

A análise de variância para o comprimento de grãos não acusou diferenças entre as médias dos tratamentos (Teste F a 5% de significância), tornando desnecessário fazer o teste de Tukey. Não houve, portanto, diferenças significativas entre o comprimento dos grãos e não se verificou qualquer influência das doses de nitrogênio sobre o comprimento dos grãos. As plantas reagiram de outra forma à adubação nitrogenada, produzindo grãos mais pesados e espigas mais longas à medida que a dose de nitrogênio aplicada permitiu isto. Um aumento das

TABELA 10 - Comprimento de espigas dos tratamentos (mm).

Tratamento	Comprimento (mm)
N1	156,35 a
N2	149,83 ab
N3	139,25 abc
N4	133,00 abc
N5	125,70 abc
N6	119,13 bc
N7	111,83 c
N8	106,75 c

* Teste de Tukey a 5%. Letras diferentes indicam diferença significativa entre médias.

doses de nitrogênio causou aumento do peso dos grãos e do comprimento de espigas.

A TABELA 11 mostra os resultados da pesagem de mil grãos em cada tratamento. Os tratamentos N1 e N2 diferiram dos tratamentos N6, N7 e N8, evidenciando a influência da dosagem de nitrogênio no acúmulo de matéria seca. Os cinco primeiros tratamentos (N1 a N5) não diferiram significativamente entre si.

A TABELA 12 mostra os resultados da análise do teor de nitrogênio nos grãos de cada tratamento.

Os tratamentos N1 a N4 não diferiram entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. O tratamento N4 foi superior aos tratamentos N5, N6, N7 e N8. Os tratamentos N1, N2 e N3 foram superiores aos tratamentos N6, N7 e N8. Houve portanto, uma influência da adubação nitrogenada nos teores de nitrogênio nos grãos.

TABELA 11 - Peso de mil grãos em cada tratamento (g).

Tratamento	Média*
N1	279,15 a
N2	276,71 a
N3	255,41 ab
N4	248,58 ab
N5	235,23 ab
N6	236,93 b
N7	210,23 b
N8	222,60 b

* Teste de Tukey a 5%. Letras diferentes indicam diferença significativa entre médias.

TABELA 12 - Teor de nitrogênio (g/kg) nos grãos de cada tratamento.

Tratamento	Média*
N1	0,148 ab
N2	0,147 ab
N3	0,148 ab
N4	0,151 a
N5	0,14 b
N6	0,127 c
N7	0,115 d
N8	0,115 d

* Teste de Tukey a 5%. Letras diferentes indicam diferença significativa entre médias.

O incremento da dose de nitrogênio aumentou o peso dos grãos, indicando a principal causa das diferenças de produtividade ocorridas entre os tratamentos no experimento. Este resultado e o comprimento das espigas merecem especial atenção. Espigas mais compridas têm também maior número de grãos. Pode-se explicar as diferenças entre os tratamentos extremos (maiores e menores doses) pela atuação conjunta desses dois fatores, aliado ao fato de os tratamentos que receberam maior dosagem de nitrogênio terem recebido uma quantidade significativamente maior por ocasião do pendoamento.

Até os 42 d.a.g. o tratamento N8 (piores resultados) recebeu 22,5 kg/ha de N, enquanto o tratamento N2 (melhor resultado) recebeu 170,3 kg/ha de N. Sabe-se que a marcha de absorção de nutrientes pela planta é bem mais acentuada até o período próximo do pendoamento, evidenciando a importância da época e da dosagem de nitrogênio aplicada.

A utilização do sistema de aspersão em linha para o estudo da produção em função da dose de fertilizante mostrou-se bastante interessante, dada a praticidade de manejo do sistema. Cuidados especiais devem ser tomados no sentido de se evitar locais e/ou horários em que o excesso de vento possa causar problemas de distribuição de água e, conseqüentemente, de fertilizante, bem como na escolha do tipo de aspersor a ser utilizado.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitiram concluir que:

- a adubação nitrogenada teve influência significativa sobre a produção de grãos da cultura do milho;
- a produtividade cresceu com o aumento da dose de nitrogênio aplicada, até que esta atingiu a marca de 262,6 kg/ha, acima do qual a produtividade diminuiu;
- Através da função de produção estimou-se a máxima produção de grãos da cultura (7664 kg/ha), para uma dose de 242,6 kg/ha de N;
- O nitrogênio apresentou influência na altura de plantas, altura de inserção das espigas nas plantas, comprimento de espigas, peso de grãos, teor de nitrogênio e proteína nos grãos, e produtividade;
- O comprimento de grãos foi o único parâmetro que não apresentou diferenças significativas, no experimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARNON, I. **Mineral nutrition of maize**. Bern: International Potash Institute, 1975. 452p.
- FARIA, R.T. Estudo da lâmina de irrigação na cultura do trigo (*Triticum aestivum*, L.), utilizando o sistema de "aspersão em linha". Piracicaba, 1981. 71p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo
- FREY, D. Quimigación: fertilización y control de malezas y plagas con el agua de riego. **Agricultura de las Américas**, v.12, p.14-18, 1981.
- FRIZZONE, J.A. Funções de resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) ao uso de nitrogênio e lâminas de irrigação. Piracicaba, 1986. 133 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- HANKS, R.J.; SISSON, D.V.; HURST, R.L.; HUBBARD, K.G. Statistical analysis of results from irrigation experiments using the line-source sprinkler system. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.886-888, 1980.
- KREYSZIG, E. **Advanced engineering mathematics**. 7. ed. New York: Wiley, 1993. 1271p.
- LAUER, D.A. Line source sprinkler system for experimentation with sprinkler applied nitrogen fertilizers. **Soil Science Society of America Journal**, v.47, n.1, p.124-128, 1983.
- MORKOC, F.; BIGGAR, J.W.; MILLER, R.J.; NIELSEN, D.R. Statistical analysis of sorghum yield: a stochastic approach. **Soil Science Society of America Journal**, v.49, p.1342-1348, 1985.
- MOURA, M.V.T. de. Determinação do consumo de água na cultura da cenoura (*Daucus carota* L.) através dos métodos lisimétrico e balanço hídrico sob condições de campo. Piracicaba, 1992. 84 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- PEREIRA, A.R.; ARRUDA, H.V. **Ajuste de curvas na pesquisa biológica**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 50p.
- RANZANI, G.; FREIRE, O.; KINJO, T. **Carta de solos do município de Piracicaba**. Piracicaba: ESALQ/ Depto. de Solos, Geologia e Fertilizantes, 1966. 85p.
- RESENDE, M.; FRANÇA, G.E.; ALVES, V.M.C. **Considerações técnicas sobre a cultura do milho irrigado**. Sete Lagoas: EMBRAPA, CNPMS, 1990. 24p.
- GENUCHTEN, M.T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.41, p.892-898, 1980.
- VIETS JR., F.G.; HUMBERT, R.P.; NELSON, C.E. Fertilizers in relation to irrigation practice. In: HAGAN, R.M.; HAISE, H.R.; EDMINSTER, T.W. **Irrigation of agricultural lands**. Madison: American Society of Agronomy, 1967. p.1009-1023.

Recebido para publicação em 02.09.97

Aceito para publicação em 31.08.99