



ARTIGO ORIGINAL

Francisco de Assis de Oliveira^{1*}
Sergio Nascimento Duarte²
José Francismar de Medeiros¹
Mychelle Karla Teixeira de Oliveira²
Ricardo Carlos Pereira da Silva¹
Matheus Sales Souza¹

¹ Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas, Av. Francisco Mota, 572, Costa e Silva, 59625-900, Mossoró, RN, Brasil

² Universidade de São Paulo – USP, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ, Departamento de Biosistemas, Piracicaba, SP, Brasil

*Autor Correspondente:

E-mail: thikaoamigao@ufersa.edu.br

PALAVRAS-CHAVE

Capsicum annuum L.
Eficiência nutricional
Nutrição mineral

KEYWORDS

Capsicum annuum L.
Nutritional efficiency
Mineral nutrition

Eficiência da fertirrigação nitrogenada e potássica na produção de pimentão cultivado em ambiente protegido

Efficiency of nitrogen and potassium fertigation in greenhouse cultivated sweet pepper

RESUMO: Objetivou-se avaliar a eficiência do uso de nitrogênio (N) e potássio (K) em pimentão cultivado em ambiente protegido, em função de diferentes manejos de fertirrigação. Utilizou-se o delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial 3×6 , com quatro repetições. Os tratamentos consistiam na combinação de três manejos de fertirrigação (M_1 - fertirrigação a partir da marcha de absorção; M_2 - fertirrigação a partir do monitoramento da concentração de íons de N e K na solução do solo; M_3 - fertirrigação a partir do monitoramento da condutividade elétrica da solução do solo), com seis níveis em porcentagem de N e K (N_0K_0 , $N_{50}K_{50}$, $N_{100}K_{100}$, $N_{150}K_{150}$, $N_{200}K_{200}$ e $N_{300}K_{300}$) da dosagem desses nutrientes recomendada para a cultura do pimentão. As variáveis mensuradas foram: rendimento, eficiência agrônômica, eficiência fisiológica, eficiência de recuperação e eficiência de absorção. A maioria dos índices de eficiência analisados apresentou redução em consequência do aumento das doses. O manejo da fertirrigação, a partir do monitoramento da concentração de íons de N e K, assim como da condutividade elétrica na solução do solo, mostrou-se mais eficiente do que o manejo baseado na marcha de absorção da cultura.

ABSTRACT: Protected cultivation has become a common practice throughout the states of Brazil, with advantages such as increased productivity and efficient use of agricultural inputs. The present study was conducted in a greenhouse at the Federal Rural University of the Semi-Arid (UFERSA) in Mossoró city, Rio Grande do Norte, Brazil, in order to evaluate the efficiency of nitrogen and potassium use in sweet pepper cultivation according to different management methods of fertigation. Randomized blocks in a 3×6 factorial design with four replications were used. Treatments consisted of combinations of three methods of fertigation management (M_1 - Fertigation based on uptake; M_2 - Fertigation based on the monitoring N and K ion concentration in the soil solution; and M_3 - Fertigation based on the monitoring of electrical conductivity of the soil solution), with six levels of N and K [N_0K_0 , $N_{50}K_{50}$, $N_{100}K_{100}$, $N_{150}K_{150}$ and $N_{200}K_{200}$, $N_{300}K_{300}$ (%)] of the recommended dosage of these nutrients for growing peppers. Variables assessed were: fruit yield, agronomic efficiency, physiological efficiency, recovery efficiency and absorptive efficiency. Most of the indices of efficiency analyzed were reduced as a result of increased doses. Fertigation management based on the monitoring of N and K ion concentration or on the electrical conductivity in the soil solution were more efficient than the management based on the uptake of the crop.

1 Introdução

O pimentão (*Capsicum annuum* L.) é cultivado em todos os Estados do Brasil, destacando-se entre as dez hortaliças mais consumidas no mercado brasileiro, com produção nacional de 248.767 t (IBGE, 2011). Apesar de ser cultivada predominantemente a céu aberto, a produção de pimentão em ambiente protegido vem se expandindo praticamente em todas as regiões do país.

O potássio (K) e o nitrogênio (N) são os nutrientes mais exportados pelas plantas de pimentão (Marcussi et al., 2004; Fontes et al., 2005), sendo os elementos aplicados com maior frequência via fertirrigação e enquadram-se perfeitamente com essa técnica devido à alta mobilidade no solo e quase 100% de solubilidade em água.

O K, no metabolismo do pimentão, melhora as características físicas e químicas dos frutos em razão da otimização no processo de transpiração e de formação de carboidratos. O N é componente da clorofila e aumenta a área foliar da planta, a qual, por sua vez, eleva a eficiência na interceptação da radiação solar, na taxa fotossintética e, conseqüentemente, na produtividade das culturas (Taiz & Zeiger, 2009).

De acordo com Melo et al. (2009), para o alcance do máximo de produção, é necessária a aplicação de dosagens corretas de fertilizantes, respeitando a marcha de absorção do vegetal, ou seja, o atendimento da exigência nutricional pela cultura do pimentão, considerando o ciclo fenológico da planta, pois o uso eficiente de fertilizantes é um fator extremamente crítico para a produção sustentável das culturas.

A marcha de absorção de nutrientes pelas plantas, principalmente em culturas anuais, como é o caso do pimentão, há algum tempo tem sido a forma de se aplicar fertilizantes que mais se aproximam da exigência nutricional das plantas, no entanto, em alguns casos, não são obtidos resultados satisfatórios. A exemplo disso, podem-se citar os resultados obtidos por Marcussi et al. (2004), em que os autores constataram que a curva de acúmulo de nutrientes pode servir como uma base para a fertirrigação, porém as quantidades de nutrientes devem ser ajustadas de acordo com as condições climáticas, principalmente a temperatura.

Como alternativa à fertirrigação tradicional, atualmente vem sendo estudado o manejo da fertirrigação a partir do monitoramento da concentração iônica da solução do solo, coletada por meio de extratores providos de cápsulas porosas. Alguns resultados obtidos têm demonstrado que essa tecnologia é promissora, tanto para o cultivo em substrato (Mota et al., 2006) como em solo (Silva Júnior et al., 2010; Medeiros et al., 2012).

O monitoramento da solução do solo permite a aplicação de nutrientes à medida que as plantas vão absorvendo-os da solução do solo, resultando em um aumento da eficiência nutricional das culturas (Medeiros et al., 2012).

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a eficiência nutricional de diferentes doses de N e K, além da adequabilidade de diferentes manejos de fertirrigação na cultura do pimentão cultivado em ambiente protegido.

2 Material e Métodos

O experimento foi realizado no Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas, no campus da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), em Mossoró, no Rio Grande do Norte (5° 11' LS; 37° 20' LO e 18 m de altitude), cuja temperatura média anual é de 27,4 °C, com umidade relativa do ar de 68,9%. A precipitação pluvial é de 673,9 mm, mas bastante irregular, concentrando-se nos primeiros meses do ano. Segundo a classificação de Köppen, o clima é do tipo BShw, quente e seco, com estação chuvosa no verão atrasando-se para o outono.

O trabalho foi realizado em duas etapas: a primeira em condições de laboratório e a segunda em ambiente protegido. Em ambas as etapas, utilizou-se a camada superficial de um Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico (0,0-0,20 m), em área ainda não cultivada, localizada na Fazenda Experimental Rafael Fernandes, pertencente à UFERSA. Foram retiradas subamostras do solo para análises químicas e físicas (EMBRAPA, 1997), cujos resultados estão apresentados na Tabela 1.

A primeira etapa consistiu na calibração dos extratores para serem utilizados no monitoramento da solução do solo, com a calibração realizada de acordo com a metodologia utilizada por Oliveira et al. (2011).

A partir da calibração, obtiveram-se equações para correlacionar a concentração iônica na solução aplicada no solo com a concentração na solução coletada por meio de extratores providos de cápsulas porosas, utilizadas para determinação das quantidades de N e K a serem aplicadas na fase seguinte da pesquisa (Tabela 2).

A segunda etapa do experimento foi realizada em ambiente protegido. Utilizou-se o delineamento em blocos casualizados em esquema fatorial 3 × 6, totalizando 18 tratamentos e 4 repetições, com unidade experimental representada por um vaso com capacidade para 25 L, com uma planta.

Os tratamentos consistiram na combinação de três manejos de fertirrigação (M₁ - fertirrigação a partir da marcha de absorção, recomendada por Fontes et al. (2005)); M₂ - fertirrigação a partir do monitoramento da concentração de íons de N e K na solução do solo; M₃ - fertirrigação a partir do monitoramento

Tabela 1. Atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico utilizado no experimento.

Table 1. Physical-chemical attributes of a Dystrophic Yellow Red Argisol used in the experiment.

pH	M.O.	P	K	Na	Ca	Mg	Al	H
	(%)	(mg dm ⁻³)			----- (cmol _c dm ⁻³) -----			
5,3	1,05	2,20	0,14	0,13	0,40	0,60	0,25	3,05
	Densidade		Areia		Silte		Argila	
	(kg m ⁻³)			----- (g kg ⁻¹) -----				
	1,50		820		40		140	

Tabela 2. Equações de regressão obtidas para calibração de extratores de solução no solo para determinação da concentração de íons de potássio (K^+), nitrogênio (NO_3^-) e condutividade elétrica (CE) em Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico.

Table 2. Regression equations obtained for calibration of soil solution extractors to determine the concentration of potassium ions (K^+), nitrogen (NO_3^-) and electrical conductivity (EC) in the Red Yellow Dystrophic Argisol.

Variáveis	Equações	R ²
Potássio	$K_{Col} = 1,034K_{apl} - 7,966$	0,983
Nitrogênio	$N_{Col} = 0,905N_{apl} - 22,15$	0,984
Condutividade elétrica	$CE_{Col} = 0,831CE_{apl} + 0,483$	0,966

K_{col} = concentração de potássio na solução coletada nos extratores; K_{apl} = concentração de potássio na solução aplicada; N_{col} = concentração de nitrogênio na solução coletada nos extratores; N_{apl} = concentração de nitrogênio na solução aplicada; CE_{col} = condutividade elétrica da solução coletada nos extratores; CE_{apl} = condutividade elétrica da solução aplicada.

da condutividade elétrica da solução do solo), com cinco níveis de porcentagem de N e K (N_0K_0 , $N_{50}K_{50}$, $N_{100}K_{100}$, $N_{150}K_{150}$, $N_{200}K_{200}$ e $N_{300}K_{300}$) da dosagem desses nutrientes recomendada para a cultura do pimentão.

Para o manejo M_1 , adotou-se como dose-padrão (100%) a quantidade de N e K utilizada na região de Mossoró, correspondente a 215 e 314 kg ha⁻¹ de N e K, respectivamente (Freitas, 2009).

Para os manejos M_2 e M_3 , foram utilizadas seis dosagens de N e K (N_0K_0 , $N_{50}K_{50}$, $N_{100}K_{100}$, $N_{150}K_{150}$, $N_{200}K_{200}$ e $N_{300}K_{300}$, em porcentagem), tendo-se como base a concentração desses nutrientes em solução nutritiva recomendada para a cultura do pimentão em sistema hidropônico NFT (Castellane & Araújo, 1994), equivalente a concentrações de 152 e 245 mg L⁻¹ para N e K, respectivamente.

Os níveis de condutividade elétrica (M_2) e de N e K (M_3) são referentes às concentrações desses nutrientes na solução do solo coletada por meio dos extratores. Dessa forma, utilizaram-se as curvas de ajuste, obtidas na primeira etapa de definição das doses de N e K, para os manejos M_2 e M_3 , com determinação dos níveis de condutividade elétrica (0,6, 1,6, 2,2, 3,1, 3,8 e 4,4 dS m⁻¹), e de N e K (N_0K_0 , $N_{76}K_{123}$, $N_{152}K_{245}$, $N_{228}K_{368}$, $N_{304}K_{490}$ e $N_{380}K_{613}$, em mg L⁻¹).

Utilizou-se o genótipo de pimentão, híbrido “Atlantis” (Topseed®), escolhido por sua aceitação na região. Foram utilizadas mudas com 35 dias de idade, oriundas de empresa especialista da região.

Em cada vaso, foram instalados um tensiômetro e um extrator de solução, ambos na profundidade de 0,15 m, dos quais o primeiro para monitoramento da tensão de água no solo e quantificação da lâmina de água a aplicar em cada irrigação, e o segundo para coleta e monitoramento da solução do solo. Em seguida, foram aplicadas as soluções apresentando concentração iônica, conforme os resultados obtidos na primeira etapa, com um volume suficiente para umedecer e manter o solo em capacidade de campo, equivalente à máxima capacidade de retenção de água.

Realizaram-se adubações de cobertura via fertirrigação ao longo do ciclo da cultura. Para o manejo M_1 , foram feitas fertirrigações a cada quatro dias, de acordo com a marcha de

absorção da cultura (Fontes et al., 2005). Para os manejos M_2 e M_3 , as fertirrigações foram realizadas de acordo com as análises das soluções coletadas com os extratores, obtidas utilizando o mesmo procedimento da primeira etapa. Para definição do momento e da quantidade de nutrientes a aplicar nos tratamentos dos manejos M_2 e M_3 , adotou-se uma redução de 20% na condutividade elétrica e na concentração de NO_3^- e K^+ como parâmetro de decisão, abaixo da qual foi realizada a reposição de nutrientes via fertirrigação (Silva Junior et al., 2010).

Imediatamente após cada coleta de solução do solo, era tomada medida de tensão com o objetivo de se obter o teor de água atual do solo, realizando-se correção das concentrações de íons quando o solo estava na capacidade de campo, seguindo metodologia utilizada por Silva Júnior et al. (2010), de modo que o volume de solução aplicado em cada evento de fertirrigação fosse o suficiente para elevar o teor de água do solo ao da capacidade de campo. As fertirrigações foram feitas manualmente por meio uma proveta graduada e um bquer para medir o volume de solução. Quando não foi necessário aplicar adubo, aplicou-se apenas água pelo sistema de irrigação.

Nos tratamentos que não continham N e K (N_0K_0), foram aplicados os demais nutrientes a fim de se obter das plantas respostas às variações nos níveis dos elementos estudados. Utilizaram-se como fontes de nutrientes os seguintes fertilizantes: nitrato de cálcio, cloreto de potássio, fosfato monobásico de potássio, nitrato de potássio, nitrato de sódio, cloreto de cálcio, sulfato de magnésio e ácido fosfórico. As quantidades de N e K aplicados em todo o experimento, para cada manejo de fertirrigação e níveis de N e K, são observados na Tabela 3.

Durante o experimento, realizaram-se seis colheitas, das quais a primeira 60 dias após o transplantio (DAT) das mudas e a última 120 DAT. As demais colheitas ocorreram de acordo com a maturação dos frutos, com ponto de colheita estabelecido quando os frutos atingiram tamanho comercial e cor verde-escuro brilhante. Foi considerada apenas a produção de frutos comerciais, descartando-se os que apresentavam sinais de queimaduras, ataque de doenças e pragas, e danos mecânicos, expressa em gramas e contabilizada como produção por planta (g planta⁻¹).

As plantas foram coletadas – a parte aérea foi separada em caule, folhas e frutos, e postas para secagem em estufa com circulação forçada de ar a temperatura de 70 °C, até apresentarem peso constante. Em seguida, determinou-se a produção de massa seca. O material seco foi triturado e analisado quimicamente para determinação dos teores de N e K. Com base nos resultados do acúmulo de massa seca, determinou-se o acúmulo de desses nutrientes absorvidos pelas plantas.

A partir das quantidades de N e K aplicadas, dos valores de produção de frutos, massa seca total e acúmulo de N e K em cada tratamento, foram determinados os principais índices de eficiência do uso de fertilizantes, seguindo metodologia adaptada de Fageria (1998), quais sejam: Eficiência Agrônômica (E_{Agr}), Eficiência Fisiológica (E_{Fis}), Eficiência de Recuperação (E_{Rec}) e Eficiência de Absorção (E_{Abs}).

A E_{Agr} corresponde à produção econômica obtida por unidade de nutriente aplicado (Equação 1).

$$E_{Agr} = \frac{\text{ProdN-ProdMN}}{NApl} \quad (1)$$

Em que: E_{Agr} = eficiência agrônômica ($kg\ kg^{-1}$); ProdN = produtividade na dose de nutriente estudado (kg); ProdMN = produtividade na menor dose de nutriente (kg); NApl = quantidade de nutriente aplicado (kg).

A E_{Fis} é a produção biológica obtida (massa seca total) por unidade de nutriente acumulado. Às vezes, essa eficiência é também chamada Eficiência Biológica e pode ser calculada pela Equação 2.

$$E_{Fis} = \frac{MSTN - MSTMN}{AcN - AcMN} \quad (2)$$

Em que: E_{Fis} = eficiência fisiológica ($kg\ kg^{-1}$); MSTN = massa seca total na dose do nutriente estudado (kg); MSTMN = massa seca total na menor dose do nutriente (kg); AcN = acúmulo de nutriente na dose do nutriente estudado (kg); AcMN = acúmulo de nutriente na menor dose do nutriente (kg).

A E_{Rec} é a quantidade de nutriente acumulado por unidade de nutriente aplicado, determinada por meio da Equação 3.

$$E_{Rec} = \frac{AcN - AcMN}{NApl} \quad (3)$$

Em que: E_{Rec} = eficiência de recuperação ($kg\ kg^{-1}$); AcN = acúmulo de nutriente na dose do nutriente estudado (kg); AcMN = acúmulo de nutriente na menor dose do nutriente (kg); NApl = quantidade de nutriente aplicado (kg).

A E_{Abs} representa a relação entre a quantidade de nutriente acumulado na planta e a unidade de nutriente aplicado (Equação 4).

$$E_{Abs} = \frac{AcN}{NApl} \quad (4)$$

Em que: E_{Abs} = eficiência de absorção ($kg\ kg^{-1}$); AcN = acúmulo de nutriente na dose do nutriente estudado (kg); NApl = quantidade de nutriente aplicado (kg).

Os dados referentes à produção de frutos foram submetidos à análise de variância, e as médias, comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade, utilizando o programa Sisvar (Ferreira, 2011). Os índices de eficiência foram analisados graficamente.

3 Resultados e Discussão

Houve efeito significativo da interação entre os fatores manejos de fertirrigação e níveis de N e K sobre o rendimento de frutos do pimentão no nível de significância de 1% de probabilidade (Tabela 4). De forma geral, os maiores rendimentos ocorreram nos manejos de fertirrigação a partir do monitoramento da solução do solo, seja pela concentração de íons de N e K (M_2), seja pela condutividade elétrica (M_3).

Esses resultados assemelham-se, parcialmente, àqueles obtidos por Medeiros et al. (2012) para a cultura do tomateiro, autores que observaram maior rendimento sob fertirrigação realizada a partir do monitoramento da salinidade do solo (M_3), quando comparado ao manejo baseado na marcha de absorção de nutrientes pela cultura.

Tabela 3. Quantidade de nitrogênio (N) e potássio (K) aplicados no experimento.

Table 3. Amount of nitrogen (N) and potassium (K) applied in the experiment.

Níveis de NK (%)	M_1		M_2		M_3	
	N	K	N	K	N	K
	(g planta ⁻¹)		(g planta ⁻¹)		(g planta ⁻¹)	
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	6,00	6,65	3,26	8,95	4,06	6,31
100	11,65	13,29	6,58	11,59	6,68	10,41
150	17,47	19,55	10,11	16,38	8,39	12,92
200	23,33	26,59	13,88	22,10	11,96	19,00
300	29,16	33,24	21,68	29,27	12,22	19,14

M_1 = fertirrigação a partir da marcha de absorção da cultura; M_2 = fertirrigação a partir do monitoramento da concentração de íons de nitrogênio e potássio na solução do solo; M_3 = fertirrigação a partir do monitoramento da condutividade elétrica da solução do solo.

Tabela 4. Rendimento de frutos do pimentão cultivado em ambiente protegido, submetido a diferentes manejos de fertirrigação e níveis de nitrogênio (N) e de potássio (K).

Table 4. Yield of sweet pepper fruits grown in protected environment, submitted to different fertirrigation and nitrogen (N) and potassium (K) levels.

Níveis de N e K (%)	Manejos de fertirrigação			Média
	M_1	M_2	M_3	
	----- Produção (kg planta ⁻¹) -----			
0	589,9 Abc	589,9 Ac	589,9 Ab	589,9
50	1487,0 Aa	1056,5 Abc	1383,4 Aa	1309,0
100	1391,5 Aa	1788,8 Aa	1452,6 Aa	1544,3
150	1009,1 Aab	1274,3 Aab	1399,6 Aa	1227,7
200	1171,7 Aab	1381,7 Aab	1082,2 Aab	1211,9
300	405,3 Bc	1565,4 Aab	1425,7 Aa	1132,1
Média	1009,1	1276,1	1222,2	

Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Fazendo-se o desdobramento do fator manejo de fertirrigação em cada nível de N e K, verificou-se que houve diferença entre os manejos apenas no nível de 300% de NK, no qual M₁ apresentou o menor rendimento (405,3 kg planta⁻¹). Tal valor é inferior ao rendimento médio obtido nos manejos M₂ (1.565,4 g planta⁻¹) e M₃ (1.425,7 g planta⁻¹) em, respectivamente, 74,1 e 71,6% (Tabela 4).

Os menores rendimentos observados na ausência e na maior dose de N e K demonstram a importância desses nutrientes para a cultura do pimentão. O N induz o rápido desenvolvimento da vegetação e influencia na produção, porém, quando aplicado em excesso, provoca o alargamento dos entrenós, debilitando a planta e provocando abortamento das flores e atraso na maturação (López, 1988).

A deficiência de K provoca a redução na produtividade e na qualidade dos frutos. Entretanto, doses excessivas de K podem causar quedas na produção e na qualidade de frutos devido à competição com o Ca e o Mg pelo sítio de absorção, ao desbalanço nutricional e à dificuldade de absorção de água pela planta (Marschner, 1995). Deve-se atentar, também, para a possível demanda de energia da planta para fazer o ajuste osmótico e absorção de água e nutrientes, o que poderia ser convertido em produção (Taiz & Zeiger, 2009).

Ainda na Tabela 4, pode-se perceber que, apesar de não ter havido diferença entre os manejos de fertirrigação nos níveis N₅₀K₅₀, N₁₀₀K₁₀₀, N₁₅₀K₁₅₀ e N₂₀₀K₂₀₀, os manejos M₂ e M₃ apresentaram menores doses de N e K em relação ao M₁, resultando em economia de N: de 40,5% (N₂₀₀K₂₀₀) a 45,7% (N₅₀K₅₀) para M₂ e de 32,3% (N₅₀K₅₀) a 51,9% (N₁₅₀K₁₅₀) para M₃, conforme doses de N e K aplicadas e apresentadas na Tabela 3.

Considerando um espaçamento de 1,5 × 0,5 m, que resulta em uma população de 13.333 plantas ha⁻¹, estima-se, para os manejos M₁, M₂ e M₃, a produtividade média de 13,5, 17,0 e 16,3 t ha⁻¹, respectivamente.

Campos et al. (2008), avaliando o efeito de doses crescentes de N sobre o rendimento de frutos na cultura do pimentão, obtiveram produção máxima de 2,64 kg planta⁻¹ para uma dose estimada de 221,72 kg ha⁻¹. Albuquerque et al. (2011) avaliaram os efeitos de níveis de irrigação e doses de K na cultura do

pimentão e encontraram produtividade média de 18,58 t ha⁻¹, valor bem próximo ao obtido no presente trabalho, entretanto para uma dose de apenas 80 kg ha⁻¹ de K₂O. Parte da diferença na produtividade encontrada nesses trabalhos pode ser atribuída às diferenças metodológicas desses estudos, principalmente quanto ao material genético, espaçamento, manejo nutricional e número de colheitas, entre outras.

A Eficiência Agronômica do nitrogênio (E_{AgrN}) foi máxima no menor nível de N e K (50% NK) para os três manejos de fertirrigação, com 150, 158 e 195 kg de frutos por kg de nitrogênio (kg kg⁻¹) para M₁, M₂ e M₃, respectivamente. A partir desse nível de NK, verificou-se que, para M₁ e M₃, houve decréscimo na E_{AgrN} até o nível de 150% NK, tendendo-se a uma constância. Para M₂, houve, inicialmente, aumento na E_{AgrN} até o nível 200% NK, apresentando, em seguida, tendência a manter-se constante (Figura 1A). Ainda na Figura 1A, pode-se observar que, em todos os níveis, os menores valores ocorreram no manejo M₁, enquanto que os manejos M₂ e M₃ apresentaram semelhante comportamento.

Esses resultados demonstram que M₂ e M₃ proporcionam maior rendimento com menor dose de N em comparação com o M₁, resultando em economia de fertilizante nitrogenada sem redução na produção de frutos. A menor E_{AgrN} ocorrida em M₂ no nível 50% NK deve-se à menor produção de frutos encontrada nesse manejo, em consequência das pequenas quantidades de N aplicadas (2,95 g planta⁻¹).

Redução na E_{AgrN} com o aumento das doses aplicadas também foi observada por Araújo et al. (2007) para a cultura do tomateiro. De acordo com Sowers et al. (1994), redução na eficiência do N com o aumento na dosagem desse nutriente indica que a maior proporção de N fornecido não foi recuperada nos tecidos da planta ou ficou retida no perfil do solo à profundidade do sistema radicular.

Araújo et al. (2007), trabalhando com a cultura do tomate em casa de vegetação, mas com cultivo em canteiros, observaram E_{AgrN} variando de 55 a 244 kg de frutos por kg de N, valores próximos aos deste trabalho.

Para Eficiência Agronômica do potássio (E_{AgrK}), também foram observados os maiores valores no nível de 50% NK para M₁ e M₃, nos quais foram produzidos, respectivamente,

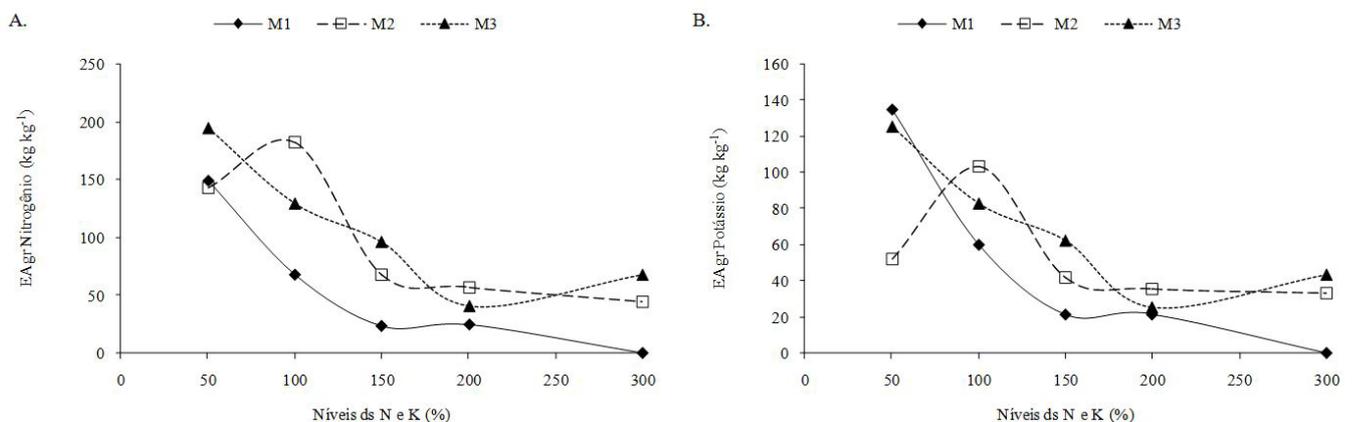


Figura 1. Eficiência Agronômica (E_{Agr}) do nitrogênio (A) e do potássio (B) na cultura do pimentão em função de diferentes manejos de fertirrigação. **Figure 1.** Agronomic efficiency (E_{Agr}) of nitrogen (A) and potassium (B) in the sweet pepper crop due to different fertigation management.

cerca de 135 e 126 kg de frutos de pimentão por kg de K aplicado. Para esses manejos, o aumento nas doses acarretou em redução na E_{AgrK} e foi mais marcante no manejo M1, no qual no nível 300% NK obteve E_{AgrK} igual a 0,0 kg g⁻¹ (zero), fato este ocorrido porque as plantas que receberam esse nível de adubação apresentaram produção menor que as plantas cultivadas em ausência de N e K (Figura 1B).

Para o manejo M₂, houve, inicialmente, aumento na E_{AgrK} entre os níveis 50 e 100% NK, no qual obtiveram-se 104 g de frutos por g de K aplicado. A partir do nível 100% NK, verificou-se decréscimo, semelhante ao comportamento observado para M₂ (Figura 1B). Tais resultados estão de acordo com Oliveira et al. (2008), em um trabalho com a cultura do meloeiro, no qual constataram que tanto a E_{AgrN} quanto a E_{AgrK} tendem a diminuir com o aumento nas doses de N e K, respectivamente.

A análise geral da E_{Agr} revela que, apesar do crescimento na produção de frutos com o aumento dos níveis de N e K, a E_{Agr} apresenta comportamento inversamente proporcional, de forma que a maior disponibilidade de N e K não resulta em ganho no rendimento da cultura e que, tanto para E_{AgrN} quanto para E_{AgrK} , o nível N₁₀₀K₁₀₀ proporcionou maior resposta da cultura à adubação.

A Eficiência Fisiológica do nitrogênio (E_{FisN}) foi influenciada pelos manejos de fertirrigação e pelos níveis de N e K. Os maiores valores foram obtidos no nível 50% NK para M₁ (53 kg kg⁻¹) e M₃ (45,8 kg kg⁻¹), e no nível 100% NK para M₂ (56 kg kg⁻¹). Para os manejos M₁ e M₃, observaram-se reduções na E_{FisN} em resposta ao aumento nas doses, algo que foi mais expressivo para o M₁, que apresentou menores valores a partir do nível 100% NK. Para o manejo M₂, notou-se, inicialmente, acréscimo na E_{Fis} à medida que se elevou a dose de N e K para o nível 100%, e pequeno aumento nos maiores níveis. Ainda na Figura 2A, pode-se verificar que, a partir do nível 100%, os maiores valores ocorreram no manejo M₂, seguido pelo M₃.

Com relação à Eficiência Fisiológica do potássio (E_{FisK}), verificou-se os maiores valores no nível 50% NK para M₁ e M₃, com 30 e 33 kg kg⁻¹, respectivamente. Com o aumento nos níveis de N e K aplicados, houve decréscimo na E_{FisK} para os manejos M₁ e M₃, enquanto para M₂ houve resposta positiva, com maior E_{FisK} obtida no nível 300% NK (34 kg kg⁻¹). Dessa

forma, o manejo M₂ proporcionou maior E_{FisK} a partir do nível 150%, seguido pelos manejos M₃ e M₁ (Figura 2B).

Apesar de, no cálculo da E_{Fis} , ser considerada toda a fitomassa produzida pelas plantas, percebe-se que seus valores são inferiores aos obtidos para E_{Agr} , que engloba apenas os frutos. No entanto, tal diferença ocorre porque para E_{Agr} leva-se em consideração a produção de frutos frescos, enquanto que a E_{Fis} utiliza o acúmulo total de biomassa.

A maior E_{Fis} observada no manejo M₂ (E_{FisN} e E_{FisK}) pode ser atribuída, em parte, porque a reposição de N e K nesse manejo era realizada de acordo com a análise direta desses nutrientes na solução do solo, de forma que, em M₂, provavelmente não tenha ocorrido excesso de N e K no solo ou possivelmente ocorreu nos demais manejos, resultando em redução na produção de biomassa nas plantas em decorrência do efeito deletério do acúmulo de sais no solo.

Tal justificativa toma como base o fato de o M₁ seguir a marcha de absorção da cultura, aplicando-se ao longo do ciclo doses predefinidas, enquanto no M₃ o monitoramento apenas da condutividade elétrica da solução do solo provavelmente tenha indicado a necessidade da reposição de N e K, mesmo que estivesse necessitando repor apenas um dos elementos, resultando em excesso do outro no solo. Esse fato pode ocorrer devido ao índice de salinização de fontes potássicas serem maior que das fontes nitrogenadas, especialmente o cloreto de potássio, fonte de K mais utilizada no experimento (Ayers & Westcot, 1999).

A Eficiência de Recuperação de nitrogênio (E_{RecN}) foi reduzida à medida que se aumentaram os níveis de NK aplicados via fertirrigação, de modo que os maiores valores foram obtidos no nível 50% NK, com E_{RecK} de 0,36, 0,56 e 0,67 kg kg⁻¹ para M₁, M₂ e M₃, respectivamente (Figura 3A).

Esses resultados são próximos aos obtidos por Scholberg et al. (2000), ao observarem E_{RecN} pelo tomateiro variando de 0,4 a 0,7 kg kg⁻¹, dependendo da dose de N aplicada. Também trabalhando com a cultura do tomateiro, Araújo et al. (2007) verificaram E_{RecN} com variação de 0,13 a 0,27 kg kg⁻¹. Esses resultados demonstram que manejos de fertirrigação, a partir do monitoramento da concentração de sais na solução do solo, favorecem a extração de N pelas plantas (M₂ e M₃).

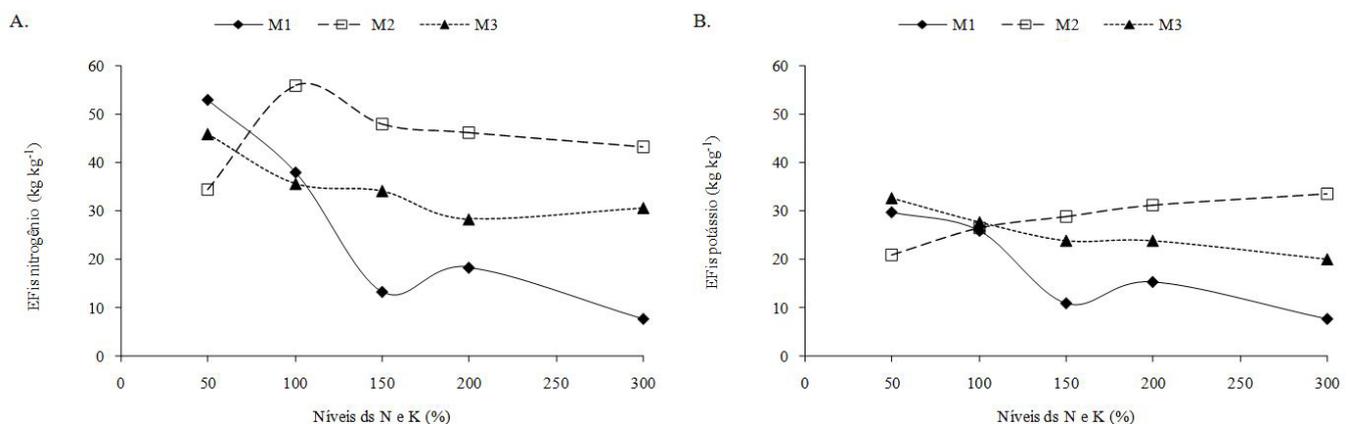


Figura 2. Eficiência Fisiológica (E_{Fis}) do nitrogênio (A) e do potássio (B) na cultura do pimentão em função de diferentes manejos de fertirrigação.
Figure 2. Physiological efficiency (EFs) of nitrogen (A) and potassium (B) in the sweet pepper crop as a function of different fertigation management.

A baixa E_{RecN} nos maiores níveis de N e K indica que o N aplicado permaneceu no solo ao final do ciclo do pimentão, o que pode ter ocorrido em consequência do excessivo acúmulo de sais na solução do solo, dificultando a absorção de íons pelas plantas. O acúmulo de nutrientes no solo ao final do ciclo da cultura não é desejável, pois, além do custo financeiro para o produtor, ainda poderá ocorrer dano ambiental devido à lixiviação dos íons para as camadas de solo mais profundas. Portanto, o uso racional da adubação nitrogenada é fundamental não somente para aumentar a E_{Rec} , mas também para elevar a produtividade da cultura e diminuir o custo de produção e os riscos de poluição ambiental (Cancellier et al., 2011).

Também foi observado reduções na Eficiência de Recuperação de potássio (E_{RecK}) em consequência do aumento nas doses de N e K, independente do manejo de fertirrigação adotado. Dessa forma, as maiores E_{RecK} foram verificadas no menor nível de N e K, no qual obteve-se eficiência de 0,56, 0,66 e 0,60 kg kg⁻¹ para M₁, M₂ e M₃, respectivamente. Comparando-se esses valores com os encontrados nas maiores dosagens, foi possível constatar reduções para E_{RecK} na ordem de 83% para M₁, de 80% para M₂ e de 52% para M₃ (Figura 3B).

A recuperação de K pelas plantas está diretamente correlacionada com a concentração desse elemento na solução do solo, entretanto a redução da E_{RecK} nos maiores níveis de adubação ocorreu em virtude do aumento da salinidade do solo, resultando em redução na absorção desse nutriente.

A Eficiência de Absorção de nitrogênio (E_{AbsN}) foi maior na menor dosagem de nutrientes, de forma que os maiores valores foram obtidos no nível 50% NK, no qual, para cada 1,0 kg de N aplicado, a planta absorveu cerca de 0,5, 0,9 e 0,8 kg para M₁, M₂ e M₃, respectivamente. A partir deste nível (50% NK), para os três manejos de fertirrigação, verificou-se decréscimo na E_{AbsN} , e os maiores valores ocorreram sempre no manejo M₃, enquanto M₁ e M₂ apresentaram respostas semelhantes. Esses altos índices de eficiência talvez tenham ocorrido em decorrência de as plantas terem sido cultivadas em vasos, o que pode ter permitido que os nutrientes estivessem na solução do solo bem próximo das raízes, além de impossibilitar a perda de N por lixiviação (Figura 4A).

Para a Eficiência de Absorção do potássio (E_{AbsK}), também foram observados os maiores valores no nível 50% NK para M₁ e M₂, enquanto para M₃ ocorreu no nível 100% NK. De forma

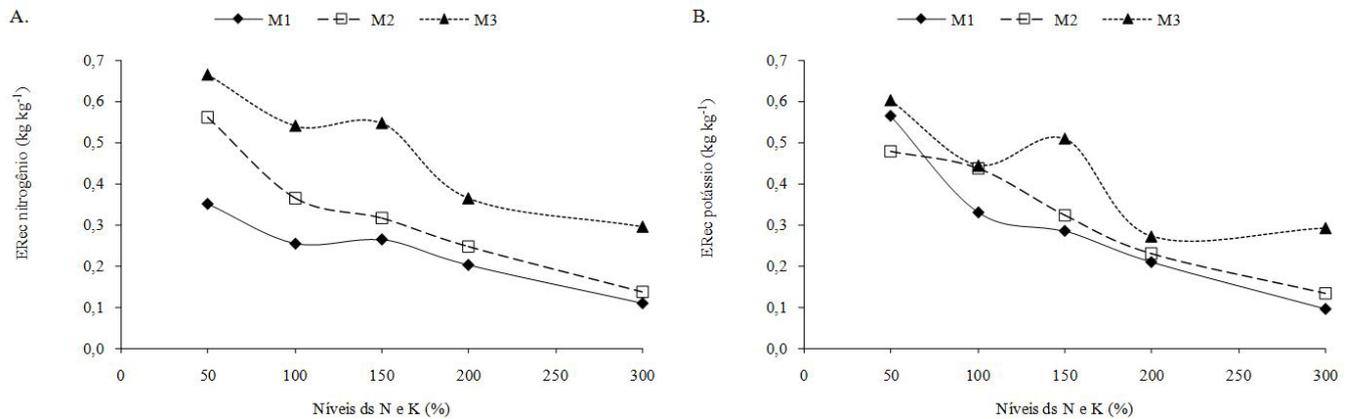


Figura 3. Eficiência de Recuperação (E_{Rec}) do nitrogênio (A) e do potássio (B) na cultura do pimentão em função de diferentes manejos de fertirrigação. **Figure 3.** Efficiency of Recovery (E_{Rec}) of nitrogen (A) and potassium (B) in the sweet pepper crop due to different fertigation management.

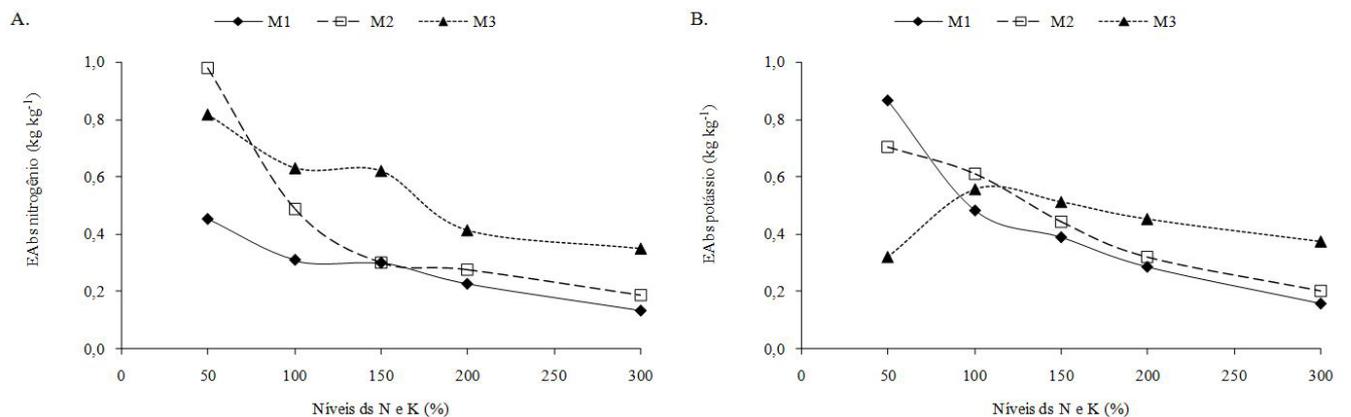


Figura 4. Eficiência de Absorção (E_{Abs}) do nitrogênio (A) e do potássio (B) na cultura do pimentão em função de diferentes manejos de fertirrigação. **Figure 4.** Absorption efficiency (E_{Abs}) of nitrogen (A) and potassium (B) in the sweet pepper crop as a function of different fertigation management.

geral, o aumento nas doses de N e K resultou em redução na E_{AbsK} , semelhante ao observado para o N (Figura 4B).

A redução na absorção de N e K nos maiores níveis de adubação pode ser explicada pelo acúmulo excessivo de sais dissolvidos no solo, o que resultou em plantas menos desenvolvida e, conseqüentemente, em menor extração de nutrientes.

Nessa situação, o uso racional da adubação nitrogenada é fundamental não somente para aumentar a E_{Rec} , mas também para elevar a produtividade das culturas e diminuir o custo de produção e os riscos de poluição ambiental.

A partir dos resultados do presente trabalho, constatou-se que, para o produtor obter maior eficiência nutricional na cultura do pimentão, em ambiente protegido, deve-se adotar o manejo da fertirrigação a partir do monitoramento da concentração de N e K na solução do solo, aplicando-se doses de N e K equivalentes à recomendada para o cultivo em sistema hidropônico ($N_{100}K_{100}$).

No entanto, vale salientar ainda que, teoricamente, a eficiência nutricional diminui com níveis crescentes de um determinado nutriente, o que, de forma geral, não corresponde à máxima rentabilidade, visto que nem sempre a maior produtividade equivale à obtida com a máxima eficiência de um nutriente. Portanto, deve-se tomar cuidado na interpretação de resultados de eficiência nutricional.

Dessa forma, para o uso da tecnologia de monitoramento da concentração iônica na solução do solo, ainda é necessário o desenvolvimento de mais pesquisas, principalmente referentes à análise econômica, uma vez que os maiores índices de eficiência não ocorrem nos maiores rendimentos.

4 Conclusões

A eficiência nutricional de N e K do pimentão é influenciada pelos níveis de N e K, bem como pelo manejo de fertirrigação.

Todos os índices de eficiência nutricional reduzem quando são aplicadas elevadas doses de N e K.

O manejo da fertirrigação, a partir do monitoramento da concentração de íons de N e K, assim com da condutividade elétrica, ambos na solução do solo, proporciona maior rendimento de frutos de pimentão.

A maior eficiência nutricional da cultura do pimentão cultivado em ambiente protegido pode ser obtida com a adoção de manejo de fertirrigação sob controle da concentração iônica da solução do solo, utilizando o nível $N_{100}K_{100}$ recomendado para a cultura em sistema hidropônico.

Referências

ALBUQUERQUE, F. S.; SILVA, E. F. F.; ALBUQUERQUE FILHO, J. A. C.; NUNES, M. F. F. N. Crescimento e rendimento de pimentão fertigado sob diferentes lâminas de irrigação e doses de potássio. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 7, p. 686-694, 2011.

ARAÚJO, C.; FONTE, P. C. R.; SEDIYAMA, C. S.; COELHO, M. B. Critérios para a determinação da dose de nitrogênio a ser aplicada no tomateiro em ambiente protegido. *Horticultura Brasileira*, v. 25, n. 3, p. 327-332, 2007.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. *A qualidade da água na agricultura*. Campina Grande: UFPB, 1999. 153 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29 Revisado, 1).

CAMPOS, V. B.; OLIVEIRA, A. P.; CAVALCANTE, L. F.; PRAZERES, S. S. Rendimento do pimentão submetido ao nitrogênio aplicado via água de irrigação em ambiente protegido. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v. 8, n. 2, p. 72-79, 2008.

CANCELLIER, E. L.; BARROS, H. B.; KISCHEL, E.; GONZAGA, L. A. M.; BRANDÃO, D. R.; FIDELIS, R. R. Eficiência agrônômica no uso de nitrogênio mineral por cultivares de arroz de terras altas. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 6, n. 4, p. 650-656, 2011.

CASTELLANE, P. D.; ARAUJO, J. C. *Cultivo sem solo: hidroponia*. Jaboticabal: FUNEP, 1994. 43 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 211 p.

FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 2, n. 1, p. 6-16, 1998.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FONTES, P. C. R.; DIAS, E. N.; GRAÇA, R. N. Acúmulo de nutrientes e método para estimar doses de nitrogênio e de potássio na fertirrigação do pimentão. *Horticultura Brasileira*, v. 23, n. 2, p. 275-280, 2005.

FREITAS, K. K. C. *Produção, qualidade e acúmulo de macronutrientes em pimentão cultivado sob arranjos espaciais e espaçamentos na fileira*. 2009. 110 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia)-Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Sistema IBGE de recuperação automática: Sidra 2006*. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 1 set. 2011.

LÓPEZ, C. C. *Fertilización en riego por goteo de cultivos hortícolas*. Madrid: Delegación de Agricultura Almería Rafael Jiménez Mijias, 1988. 213 p.

MARSCHNER, H. *Mineral nutrition of higher plants*. 2. ed. New York: Academic Press, 1995. 889 p.

MARCUSSI, F. F. N.; GODOY, L. J. G.; VILLAS BÔAS, R. L. Fertirrigação nitrogenada e potássica na cultura do pimentão baseada no acúmulo de K e K pela planta. *Irriga*, v. 9, n. 1, p. 41-51, 2004.

MELO, A. S.; BRITO, M. E. B.; DANTAS, J. D. M.; SILVA JÚNIOR, C. D.; FERNANDES, P. D.; BONFIM, L. V. Produção e qualidade do pimentão amarelo sob níveis de potássio em ambiente protegido. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 4, n. 1, p. 17-21, 2009.

MEDEIROS, P. R. F.; DUARTE, S. N.; SILVA, E. F. F. Eficiência do uso de água e de fertilizantes no manejo de fertirrigação no cultivo do tomateiro sob condições de salinidade do solo. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 7, n. 2, p. 344-351, 2012.

MOTA, P. R. A.; VILLAS BOAS, R. L.; SOUSA, V. F. Concentração de sais da solução avaliada pela condutividade elétrica na zona radicular do crisântemo sob irrigação por gotejamento. *Irriga*, v. 11, n. 4, p. 532-542, 2006.

OLIVEIRA, F. A.; MEDEIROS, J. F.; DUARTE, S. N.; SILVA JÚNIOR, M. J.; CAMPELO, C. M. Calibração de extratores providos de cápsula

porosa para monitoramento da salinidade e da concentração de íons. *Engenharia Agrícola*, v. 31, n. 3, p. 520-528, 2011.

OLIVEIRA, F. A.; MEDEIROS, J. F.; LIMA, C. J. G. S.; DUTRA, I.; OLIVEIRA, M. K. T. Eficiência agrônômica da fertirrigação nitrogenada e potássica na cultura do meloeiro nas condições do semiárido nordestino. *Revista Caatinga*, v. 21, n. 5, p. 5-11, 2008.

SCHOLBERG, J.; MACNEAL, B. L.; BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; LOCASCIO, S. J.; OLSON, S. M. Nitrogen stress effects on growth and nitrogen accumulation by field-growth tomato. *Agronomy Journal*, v. 92, n. 1, p. 159-167, 2000.

SILVA JÚNIOR, M. J.; DUARTE, S. N.; OLIVEIRA, F. A.; MEDEIROS, J. F.; DUTRA, I. Resposta do meloeiro à fertirrigação controlada através de íons da solução do solo: Parâmetros produtivos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 7, p. 723-729, 2010.

SOWERS, K. E.; PAN, W. L.; MILLER, B. C.; SMITH, J. L. Nitrogen use efficiency of split nitrogen application in soft white winter wheat. *Agronomy Journal*, v. 86, n. 6, p. 942-948, 1994.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Plant physiology*. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 719 p.

Contribuição dos autores: Francisco de Assis de Oliveira contribuiu na elaboração, execução do projeto e dissertação o manuscrito; Sergio Nascimento Duarte, José Francismar de Medeiros contribuíram na orientação do projeto (Orientador e Co-orientador do Doutorado, respectivamente); Mychelle Karla Teixeira de Oliveira, Ricardo Carlos Pereira da Silva, Matheus Sales Souza contribuíram com a condução e avaliação do experimento.

Fonte de financiamento: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – Edital Universal.

Conflito de interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.