

ABSORÇÃO DE POTÁSSIO POR MILHO-DOCE, PREDITA POR SIMULAÇÃO¹

FILOMENA LEONOR I.M. SILVA², JOSÉ RONALDO MAGALHÃES³ e STANLEY A. BARBER⁴

RESUMO - Onze parâmetros de solo e de planta (milho-doce) (*Zea mays* L.) que afetam a absorção de potássio (K), foram analisados em um modelo matemático, onde dois tipos de solo e duas formas de N foram combinados. O modelo descreve a absorção de K em função do crescimento e morfologia radiculares, cinética de absorção de íons e suprimento de nutrientes do solo para a raiz por difusão e fluxo de massa. As análises de sensibilidade indicaram que a área superficial de raiz é um dos parâmetros mais sensíveis, dado o aumento da absorção de K com a variação simulada do raio médio e taxa de crescimento radiculares e do influxo máximo. Os valores do coeficiente de difusão efetiva de K no solo, do poder-tampão e da concentração inicial deste íon na solução do solo, foram afetados pela aplicação de K. A absorção predita foi maior do que a absorção observada, para os tratamentos com Latossolo Vermelho-Amarelo, ocorrendo o inverso nos tratamentos do substrato mais arenoso.

Termos para indexação: modelo matemático, morfologia radicular, influxo máximo, uréia, NaNO₃.

POTASSIUM UPTAKE BY SWEET CORN PREDICTED BY A SIMULATION MODEL

ABSTRACT - Eleven soil and plant of sweet corn (*Zea mays* L.) parameters affecting K uptake were analyzed with a mathematical model, combining two soil substrates and two N forms. This model describes K uptake in terms of root growth and morphology, kinetics of nutrient uptake and supply of nutrients to the root by diffusion and mass-flow. Sensitivity analysis indicated that root surface area is one of the most sensitive parameters due to K uptake increase with the simulated variation of root mean radius, relative growth rate and maximum influx. Values of effective-diffusion coefficient for K in the soil, buffer power of K on the solid phase for K in solution and initial concentration of K in the soil solution were affected by K application. Predicted K uptake was greater than observed K uptake, for treatments involving a Red-Yellow Latosol, and was lower for treatments with Red-Yellow Latosol with sand.

Index terms: mathematical model, root morphology, maximum influx, urea, NaNO₃.

INTRODUÇÃO

O potássio (K) foi um dos primeiros nutrientes estudados nos mecanismos de absorção iônica pelas raízes das plantas. É o cátion mineral de maior diâmetro exigido pelas plantas, tendo um raio desidratado de 0,133 nm.

Existem diferenças na fisiologia da absorção de K, mesmo entre genótipos da mesma espécie; devido a essa variação, seria possível desenvolver genótipos com as características de influxo desejadas, necessárias para maximizar a produção e aumentar a eficiência do uso de fertilizante potássico (Barber 1984).

O tipo de interação da raiz das plantas com o solo pode influenciar o fluxo de nutrientes para dentro da raiz; essas interações, todavia, não estão totalmente compreendidas ainda. Para a absorção de K por raízes crescendo em condições de solo, assume-se, comumente, que estas absorvem o K da solução. O movimento de água para a raiz também transporta o K em direção a esta, por fluxo de massa, embora a

¹ Aceito para publicação em 21 de dezembro de 1990
Trabalho financiado pelo CNPq.

² Enga. - Agra., EMBRAPA/Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS), Caixa Postal 151, CEP 35700 Sete Lagoas, MG.

³ Eng. - Agr., Ph.D., EMBRAPA/CNPMS.

⁴ Prof. of Agronomy, Purdue University, Dept. of Agronomy, W. Lafayette, IN, 47907 USA.

maior parte do fluxo de K pareça ser por difusão, ao longo de um gradiente de concentração. A referida absorção, influenciada pela concentração de K na solução, tem sido descrita pela cinética de Michaelis-Menten, que descreve as curvas de concentração de K na solução versus o influxo de K (Barber 1984).

A absorção por raízes de plantas intactas é afetada pela absorção e translocação de K dentro da raiz. Claassen & Barber (1974) estudaram o influxo de K em plantas intactas de milho com 18 dias de idade. A absorção de K medida pelos autores esteve na faixa de concentração do mecanismo I (absorção entre 0 e 500 $\mu\text{mol/litro}$).

Mengel & Barber (1974) e Barber (1978) observaram um decréscimo na taxa de absorção de K com a idade da planta, após determinado período; Claassen & Barber (1977), trabalhando com milho, verificaram que os níveis de K nas folhas tinham maior efeito no influxo máximo para absorção de K do que os níveis deste elemento na raiz, parecendo ser, assim, o influxo de K, regulado por mecanismo de "feed-back" entre a raiz e a folha.

Claassen & Barber (1977) usaram um modelo matemático com dez parâmetros, para descrever a absorção de K pelo milho, em solos com diferentes níveis de K. Subseqüentemente, Shaw et al. (1983) avaliaram as diferenças na disponibilidade de K em solos com o mesmo nível de K trocável.

A concentração de K na solução do solo geralmente é considerada como a fonte primária do K absorvido pela raiz das plantas. Uma vez que o K nos sítios de troca se equilibra com o K na solução, os íons de K absorvidos pelas plantas são substituídos, na solução, pelos K trocáveis do solo. Esta pressuposição foi assumida em modelos matemáticos por Nye & Mariott (1969) e por Claassen & Barber (1976). Informações adicionais sobre o modelo matemático encontram-se em Silberbrush & Barber (1983a, 1983b) e Silberbrush et al. (1983).

O objetivo do presente trabalho foi o de analisar diversos parâmetros fisiológicos e de solo e seus efeitos na absorção de K, bem co-

mo utilizar análises de sensibilidade dos referidos parâmetros na simulação da absorção de K, com o uso do modelo matemático.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram conduzidos dois experimentos, em casa de vegetação, em vasos com dois solos distintos e em solução nutritiva, utilizando-se milho-doce (*Zea mays* L.) cultivar Super-Doce. Trabalhou-se com dois solos com características diferentes: um Latossolo Vermelho-Amarelo (LA) e um solo criado artificialmente, pela mistura daquele solo com areia, na proporção de 1:1 (LA + areia), para obter características distintas entre os substratos. Os fertilizantes foram incorporados ao solo na forma sólida, nas quantidades equivalentes (em mg/kg de solo) a: 1.000 de superfosfato triplo, 1.500 de hidróxido de cálcio, 900 de nitrato de sódio ou 300 de uréia, 200 de sulfato de potássio, 200 de sulfato de magnésio, 15 de bórax, 25 de sulfato de zinco e 15 de sulfato de cobre. O delineamento experimental utilizado foi completamente casualizado, com duas formas de N, dois solos, três épocas de colheita e quatro repetições. N-Serve (inibidor de nitrificação, 2-cloro-6, triclórometil piridina) foi utilizado na dosagem de 20 ppm, após o desbaste, e 5 ppm após a primeira colheita. Os vasos utilizados tinham 5 kg de capacidade, e após o desbaste foram deixadas duas plantas por vaso.

As plantas foram colhidas aos 7, 14 e 21 dias após a emergência. Os seguintes parâmetros de solo e fisiológicos de planta foram determinados: comprimento inicial de raiz (L_0), taxa de crescimento radicular (k), raio médio de raízes (r_0), meia-distância entre eixos radiculares (r_1), influxo médio de água (v_0), coeficiente de difusão de K no solo (D_e), poder-tampão de K (b), concentração inicial de K na solução do solo (C_i), influxo máximo (I_{max}), concentração na solução, na qual a velocidade de absorção é metade do influxo máximo (K_m) e concentração mínima (C_{min}).

O comprimento inicial de raízes (L_0) foi determinado pelo método de interseção de Tennant (1975). A taxa de crescimento radicular foi determinada pela fórmula adaptada de Edwards & Horton (1982). O raio médio de raízes foi calculado a partir do comprimento e do volume radiculares (Hallmark & Barber 1981). A meia-distância entre os eixos radiculares (r_1) foi calculada pela fórmula: $1/(\pi L_v)^{1/2}$, onde L_v é a densidade de raízes. O influxo médio de

água foi determinado pela fórmula $v_0 = [W(\ln A_2 - \ln A_1)] / [(t_2 - t_1) \cdot (A_2 - A_1)]$, onde W é a quantidade de água usada por vaso, durante o intervalo de tempo $t_2 - t_1$; A_2 e A_1 são a área superficial de raiz, nos tempos 2 e 1, respectivamente. As perdas por evaporação foram estimadas subtraindo-se as perdas de água no mesmo período, dos vasos sem plantas. Todos os vasos foram pesados diariamente. Assumiu-se que as perdas de água dos vasos menos a água evaporada foi transpirada pelas plantas, e que a taxa de absorção de água foi constante durante todo o período experimental. O coeficiente médio de difusão efetiva de K (D_e) foi calculado segundo Barber (1984). O poder-tampão foi determinado segundo Uehara & Gillman (1981). A concentração inicial de K na solução do solo foi determinada após o deslocamento da solução do solo saturado com água deionizada, em uma coluna de 32 cm de altura e 6 cm de diâmetro interno.

Influxo máximo, K_m e concentração mínima foram determinados em solução nutritiva; os dois primeiros parâmetros foram determinados por um método gráfico-matemático descrito em Ruiz (1985). Neste experimento em solução nutritiva, as plantas foram transferidas da vermiculita para a solução, cinco dias após a germinação, sendo cultivadas por um período experimental idêntico ao do solo, deixando-se duas plantas por vaso de 1,7 litro de capacidade. As colheitas foram efetuadas aos 7, 14 e 21 dias após a emergência.

A concentração dos nutrientes na solução nutritiva foi de: 4 mM de K, 10 mM de N, 2 mM de P, 4 mM de Ca, 2 mM de Mg, 0,5 ppm de B, 0,5 ppm de Mn, 0,05 ppm de Zn, 0,02 ppm de Cu, 0,01 ppm de Mo, 2,5 ppm de Fe como DTPA-Sequestrene 330 e 2,5 ppm de $FeNH_4(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$. As plantas cresceram nesta solução por dez dias. Após esse período, nova solução nutritiva foi preparada, alterando as concentrações de P e K para 1,00 mM e 3,75 mM respectivamente, utilizando-se KH_2PO_4 , KNO_3 e K_2SO_4 como fontes de K, e sendo o restante N fornecido na forma de $Ca(NO_3)_2$, e aplicouse a quantidade de 10 ppm de Fe. Para evitar interferências no período de depleção, o pH da solução foi mantido entre 5,5 e 6,0 com $Ca(OH)_2$.

Vinte e quatro horas antes da colheita, as plantas foram transferidas para uma solução isenta de K e Fe, mantendo a mesma concentração dos demais nutrientes. Após esse período de 24 horas, 70 μM de K foram adicionados à solução. Alíquotas foram retiradas de hora em hora nas primeiras cinco horas, e de meia em meia hora nas sete horas subsequentes,

para a determinação de C_{min} . Uma última alíquota foi retirada no dia seguinte ao início da depleção, onde o K foi determinado por absorção atômica. As plantas foram pesadas e o material vegetal foi digerido e analisado, após secagem em estufa por 48 horas, a 70°C.

Análises de sensibilidade foram conduzidas após checagem do modelo matemático.

RESULTADOS

Os parâmetros de solo e de planta que afetaram a absorção de K foram colocados em um modelo matemático de Barber & Cushman (1981); cada parâmetro do modelo teve variação de 0,5 a 2,0 vezes o seu valor inicial, mantendo-se constantes os demais parâmetros (Fig. 1 e 2).

Quando o nível de um parâmetro é mudado, ele pode muitas vezes afetar o nível de outros parâmetros interdependentes. Por isso, foram feitas análises de sensibilidade. A Fig. 1 se refere aos parâmetros de solo (D_e , b e Cl_i) virgem de cerrado, e a Fig. 2 mostra a variação ocorrida na absorção de K quando esses valores foram elevados por fertilização do referido solo.

Os resultados mostram que a absorção de K aumentou rapidamente com os aumentos de r_0 , k e I_{max} , mostrando que a área superficial de raiz teve grande efeito na absorção. O parâmetro que em seguida foi mais afetado foi o K_m . A pequena variação da absorção predita quando variou o coeficiente de difusão de K no solo, o poder-tampão, a velocidade de absorção de água, o comprimento inicial de raiz, a meia-distância entre eixos radiculares e a concentração de K na solução do solo, dentro dos níveis estudados, indica que neste caso a absorção de K foi controlada principalmente pelo influxo máximo, taxa de crescimento relativa e raio médio radiculares.

Como a análise química inicial do solo revelou um teor de K de 55 ppm antes da adubação, o aumento da absorção de K após a fertilização foi, em média, de 10% para todos os tratamentos, independentemente da forma de N utilizada. Esse aumento foi, em média,

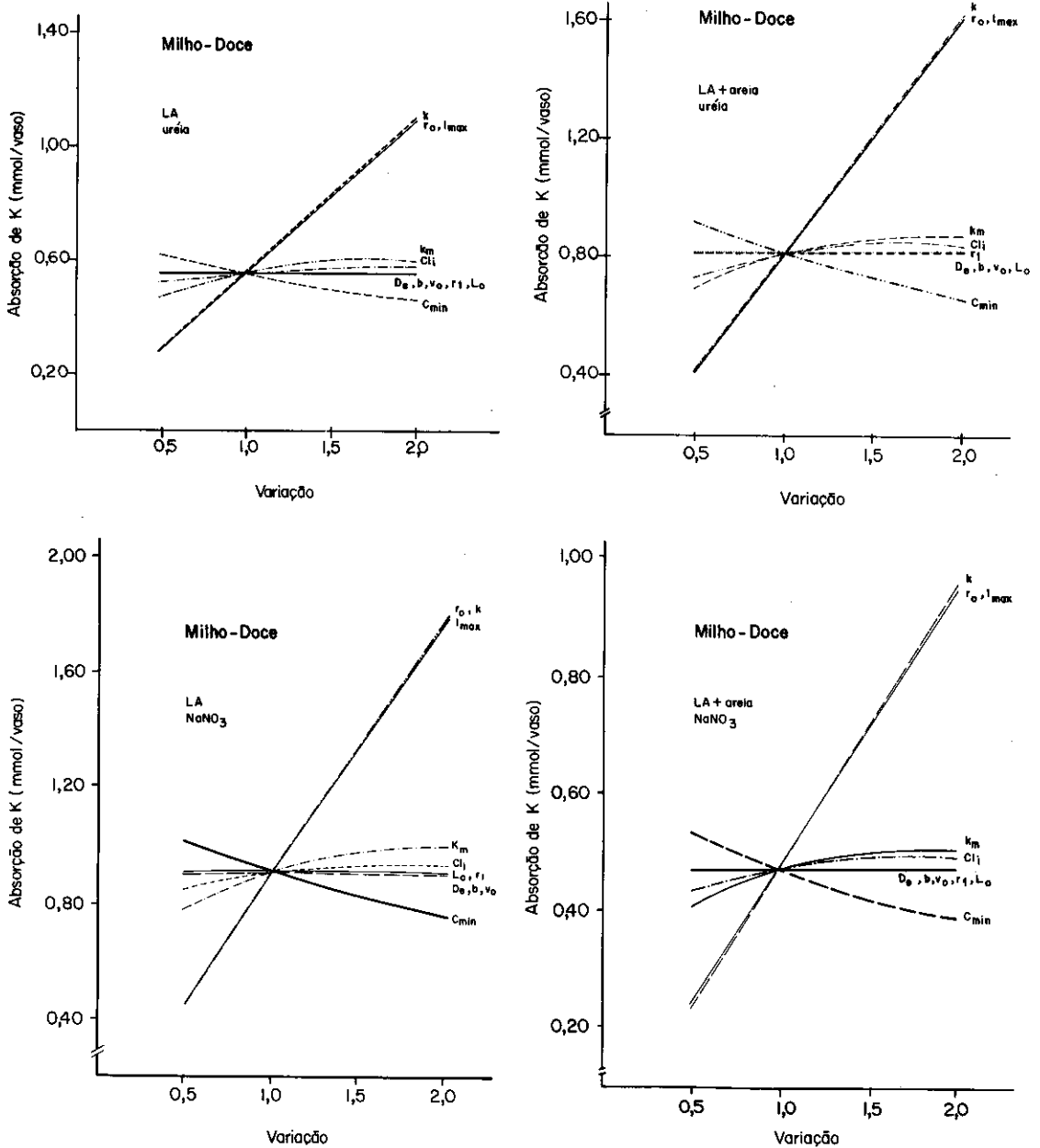


FIG. 1. Análise de sensibilidade para estudo da variação da absorção de K em milho-doce (valores de D_e , b e Cl_i para solo virgem de cerrado). D_e = coeficiente de difusão efetivo de K no solo, cm^2/s ; b = poder-tampão de K; Cl_i = concentração inicial de K na solução do solo, $\mu mol/cm^3$; v_0 = influxo de água para a raiz, $cm^3/cm^2.s$; r_1 = meia-distância entre os eixos radiculares, cm ; r_0 = raio médio de raiz, cm ; L_0 = comprimento inicial de raiz, $cm/vase$; k = taxa de crescimento radicular, cm/s ; I_{max} = taxa de influxo máximo, $\mu mol/cm^2.s$; k_m = concentração da solução onde o influxo é metade do I_{max} , $\mu mol/cm^3$; C_{min} = concentração mínima de K na solução do solo, $\mu mol/cm^3$.

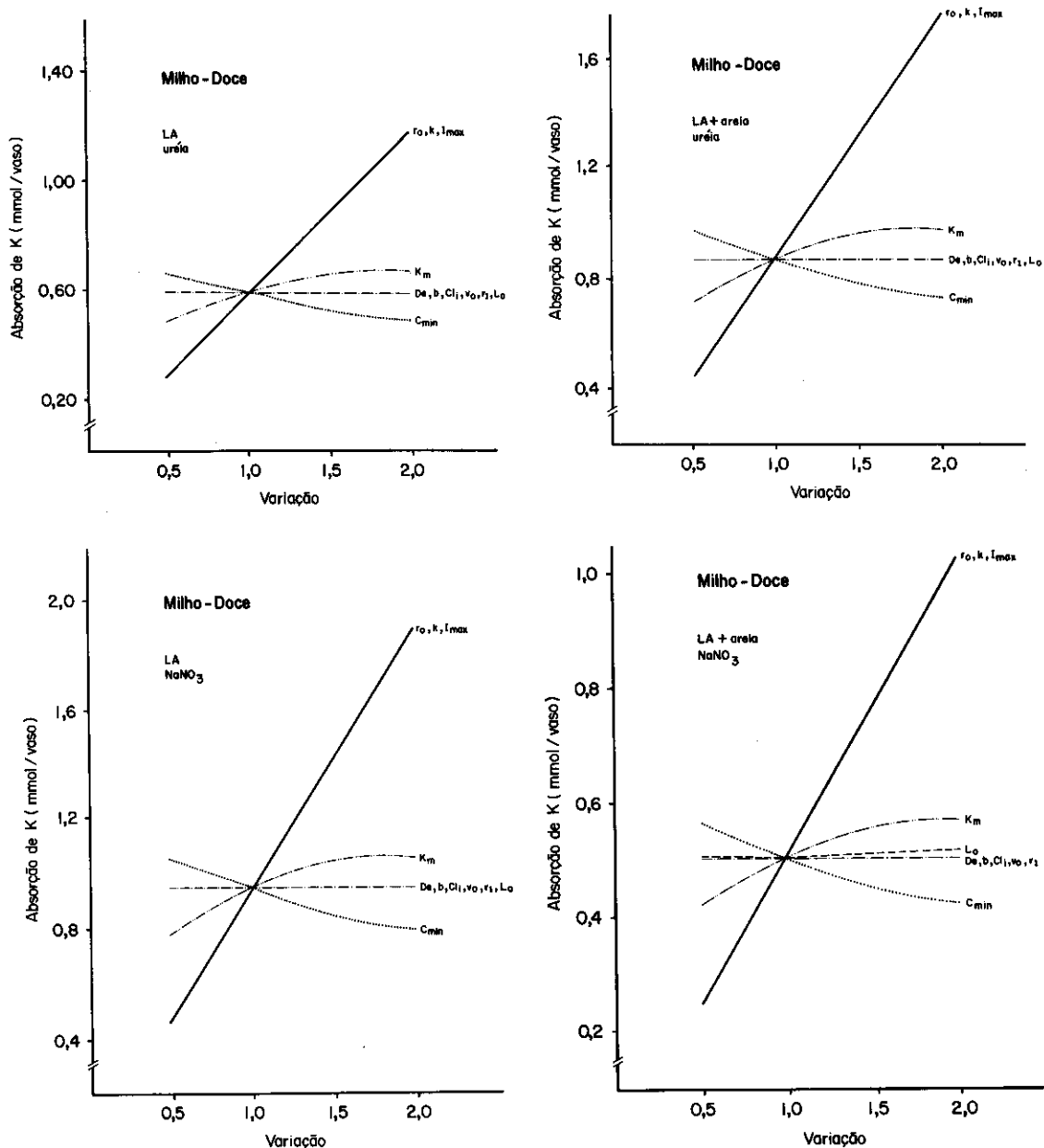


FIG. 2. Análise de sensibilidade para estudo da variação da absorção de K em milho-doce (solo adubado). D_e = coeficiente de difusão efetivo de K no solo, cm^2/s ; b = poder-tampão de k; Cl_i = concentração inicial de k na solução do solo, $\mu mol/cm^3$; v_0 = influxo de água para a raiz, $cm^3/cm^2.s$; r_1 = meia-distância entre os eixos radiculares, cm; r_0 = raio médio de raiz, cm; L_0 = comprimento inicial de raiz, cm/vase; k = taxa de crescimento radicular, cm/s ; I_{max} = taxa de influxo máximo, $\mu mol/cm^2.s$; k_m = concentração da solução onde o influxo é metade do I_{max} , $\mu mol/cm^3$; C_{min} = concentração mínima de K na solução do solo, $\mu mol/cm^3$.

de 10% também para os parâmetros que mais influenciaram a absorção de K: r_0 , k , I_{max} e K_m .

Para um período de tempo igual a dez dias, a média da absorção observada, para todos os tratamentos, foi de 0,66 mmol/vaso, enquanto a média da absorção predita pelo modelo matemático, para o mesmo período de tempo, foi de 0,72 mmol/vaso. Nos tratamentos do LA, a absorção predita (0,585 e 0,940 mmol/vaso, respectivamente para os tratamentos com uréia e com $NaNO_3$) foi maior do que a absorção observada (0,432 e 0,434 mmol/vaso, para os tratamentos uréia e $NaNO_3$, respectivamente), inverso do que ocorreu nos tratamentos do substrato arenoso. No La+areia, a absorção predita foi de 0,883 e de 0,508 mmol/vaso, respectivamente para uréia e $NaNO_3$, e a absorção observada foi de 1,079 e de 0,712 mmol/vaso, respectivamente para uréia e $NaNO_3$. Os baixos valores da absorção mostrados devem-se ao período de tempo curto usado no modelo.

O parâmetro de solo mais afetado pela aplicação de fertilizantes foi Cl_1 . A Tabela 1 mostra os valores dos parâmetros utilizados

para verificar a absorção pelo modelo matemático, para um período equivalente a dez dias. Os dados de planta apresentados na tabela referem-se à última colheita efetuada.

DISCUSSÃO

A disponibilidade de K no solo é, muitas vezes, medida pelo crescimento de plantas em solos, medindo-se a quantidade de K que elas absorvem, e usando este valor para caracterizar a disponibilidade de K. Tais medidas da absorção de K são, geralmente, usadas como variáveis dependentes nas relações com resultados determinados em laboratório, das quantidades de K extraídas do solo, com uso de extratores químicos.

A absorção predita de K foi mais sensível ao k , r_0 e I_{max} , que afetam a área superficial de raiz. Nesta situação, a maior parte do K atingiu a raiz por difusão, conforme comprovam as Fig. 1 e 2, com a variação de v_0 .

Três parâmetros interdependentes da morfologia radicular são k , r_0 e r_1 . Se o volume de raiz e o de solo forem mantidos constantes, a

TABELA 1. Valores estimados dos parâmetros de planta e de solo, para simulação da absorção de K, pelo modelo matemático de Cushman-Barber, em milho-doce, cv. Super-doce.

Parâmetros (valor inicial)	LA ¹		LA + Areia	
	Uréia	NaNO ₃	Uréia	NaNO ₃
Coef. difusão efetivo (cm ² /s)	8,570E-08 ²	8,680E-08	7,140E-08	5,090E-08
Poder-tampão	8,310E+00	8,210E+00	2,580E+00	3,620E+00
Concent. inicial (μmol/cm ³)	4,717E+02	4,872E+02	1,250E+03	9,487E+02
Influo água (cm ³ /cm ² .s)	2,000E-07	2,000E-07	6,000E-07	1,000E-06
Meia-distância entre eixos (cm)	8,970E-01	9,995E-01	1,092E+00	9,190E-01
Raio médio de raiz (cm)	2,431E-02	2,980E-02	2,366E-02	2,253E-02
Comprimento inicial raiz (cm)	3,420E+01	3,420E+01	3,420E+01	3,420E+01
Taxa crescim. radicular (cm/s)	1,605E-02	2,106E-02	2,491E-02	1,501E-02
Influo máximo (μmol/cm ² .s)	8,000E-07	8,000E-07	8,000E-07	8,000E-07
K _m (μmol/cm ³)	9,999E-03	9,999E-03	9,999E-03	9,999E-03
Concent. mínima (μmol/cm ³)	2,560E-03	2,560E-03	2,560E-03	2,560E-03

¹ LA = Latossolo Vermelho-Amarelo; LA+areia = Latossolo Vermelho-Amarelo + areia (1:1).

² Média de quatro repetições, duas plantas por vaso.

absorção predita de K ainda assim aumentaria, quando a taxa de crescimento relativa aumentasse, porque as raízes seriam mais compridas.

Surpreendentemente, o nível de K no solo não está alto; isto poderia explicar a falta de sensibilidade dos parâmetros de solo e taxa de absorção de água predita. Os resultados da Fig. 2, por sua semelhança com resultados de sensibilidade para N (Barber 1984), sugerem que todo o suprimento de K tenha sido por fluxo de massa.

Freqüentemente a disponibilidade de K no solo é avaliada em plantas crescendo em vasos em casa de vegetação ou câmaras de crescimento. Quando as avaliações são feitas em plantas crescidas no campo, em geral têm-se densidades radiculares menores. Neste caso, os resultados podem diferir, dada uma menor competição radicular por K. A planta utilizada para testar o modelo matemático também tem importância fundamental (Barber 1984). Plantas com alta densidade radicular e para as quais a difusão é uma forma importante de suprimento de K à raiz podem apresentar competição entre raízes para a absorção de K. O uso de fertilizantes afeta as características de suprimento de nutrientes à raiz (Barber 1986, 1987) e Kovar & Barber (1988).

O modelo pode auxiliar na busca de parâmetros da planta mais importantes, que poderiam ser utilizados na seleção de plantas mais eficientes na absorção e no uso de K.

CONCLUSÃO

As análises de sensibilidade mostraram que a área superficial de raiz foi o parâmetro mais sensível e o que mais afetou a absorção de K, dentro das condições experimentais utilizadas.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. G.E. Wilcox, pelo apoio de infraestrutura oferecida, acesso aos laboratórios e casas de vegetação, e ao Dr. K. Oates, pelo acesso a computadores e pela orientação rece-

bida (Purdue University, Lafayette, IN., USA).

REFERÊNCIAS

- BARBER, S.A. Determining P and K placement from soil test data. In: SMITH, B. (ed.). **Proceedings NFSA Convention**. St. Louis, MO, USA: National Fertilizer Solutions Association, 1986. p.1-3.
- BARBER, S.A. Growth and nutrient uptake of soybean roots under field conditions. **Agronomy Journal**, v.70, p.457-461, 1978.
- BARBER, S.A. Relation of plant root growth to soil nutrient availability. **Journal of Plant Nutrition**, v.10, n.9/16, p.1309, 1987.
- BARBER, S.A. **Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach**. New York: John Wiley & Sons Ed., 1984. 398p.
- BARBER, S.A.; CUSHMAN, J.H. Nitrogen uptake model for agronomic crops. In: ISKAENDAR, I.K. (Ed.) **Modeling Waste Water Renovation Land Treatment**. New York: John Wiley, 1981. p.382-409.
- CLAASSEN, N.; BARBER, S.A. A method for characterizing the relation between nutrient concentration and flux into roots of intact plants. **Plant Physiology**, v.54, p.564-568, 1974.
- CLAASSEN, N.; BARBER, S.A. Potassium influx characteristics of corn roots and interaction with N, P, Ca and Mg influx. **Agronomy Journal**, v.69, p.860-864, 1977.
- CLAASSEN, N.; BARBER, S.A. Simulation model for nutrient uptake from soil by a growing plant root system. **Agronomy Journal**, v.68, p.961-964, 1976.
- EDWARDS, J.H.; HORTON, B.D. Interaction of peach seedlings to NO₃:NH₄ ratios in nutrient solutions. **Journal of American Society for Horticulture Science**, v.107, p.142-147, 1982.
- HALLMARK, W.B.; BARBER, S.A. Root growth and morphology, nutrient uptake and nutrient status of soybean as affected by soil K and bulk density. **Agronomy Journal**, Madison, v.73, p.779-782, 1981.

- KOVAR, J.L.; BARBER, S.A. Phosphorus supply characteristics of 33 soils as influenced by seven rates of phosphorus addition. **Soil Science Society of America Journal**, v.52, n.1, p.160-165, 1988.
- MENGEL, D.B.; BARBER, S.A. Rate of nutrient uptake per unit of corn root under field conditions. **Agronomy Journal**, v.66, p.399-402, 1974.
- NYE, P.H.; MARIOTT, F.H.C. A theoretical study of the distribution of substances around roots resulting from simultaneous diffusion and mass flow. **Plant and Soil**, v.30, p.451-472, 1969.
- RUIZ, H.A. Estimativas dos parâmetros cinéticos K_m e V_{max} , por uma aproximação gráfico-matemática. **Revista Ceres**, Viçosa, v.32, p.79-84, 1985.
- SHAW, J.K.; STIVERS, R.K.; BARBER, S.A. Evaluation of differences in potassium availability in soils of the same exchangeable potassium level. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.14, p.1035-1049, 1983.
- SILBERBRUSH, M.; BARBER, S.A. Prediction of phosphorus and potassium uptake by soybeans with a mechanistic mathematical model. **Soil Science Society of America Journal**, v.47, p.262-265, 1983a.
- SILBERBRUSH, M.; BARBER, S.A. Sensitivity analysis of parameters used in simulating potassium uptake with a mechanistic mathematical model. **Agronomy Journal**, v.75, p.851-854, 1983b.
- SILBERBRUSH, M.; HALLMARK, W.B.; BARBER, S.A. Simulation of effects of soil bulk density and P addition on K uptake by soybean. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.14, p.287-296, 1983.
- TENNANT, D.A. A test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, v.63, p.995-1001, 1975.
- UEHARA, G.; GILLMAN, G. **The mineralogy, chemistry and physics of tropical soils with variable charge clays**. Boulder, Colorado: Westview Press, 1981. 170p.