

# SEÇÃO IV - FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS

## PARÂMETROS CINÉTICOS E MORFOLÓGICOS DA ABSORÇÃO DE NUTRIENTES EM CULTIVARES DE MILHO COM VARIABILIDADE GENÉTICA CONTRASTANTE<sup>(1)</sup>

Delson Horn<sup>(2)</sup>, Paulo Roberto Ernani<sup>(3)</sup>, Luis Sangoi<sup>(3)</sup>,  
Cleber Schweitzer<sup>(4)</sup> & Paulo Cezar Cassol<sup>(3)</sup>

### RESUMO

Genótipos de milho com variabilidade genética contrastante apresentam potenciais produtivos diferentes. Isso pode ser causado, pelo menos em parte, por diferenças morfológicas no sistema radicular e nos parâmetros cinéticos de absorção de nutrientes. Este trabalho objetivou quantificar esses parâmetros em três cultivares de milho. Foram comparados um híbrido simples (HS), um híbrido duplo (HD) e uma variedade de polinização aberta (VPA). Determinaram-se os parâmetros de absorção (influxo máximo,  $I_{max}$ , constante de Michaelis-Menten,  $K_m$ , e concentração na solução onde a absorção cessa,  $C_{min}$ ) para N, P, K, Ca e Mg, além de atributos morfológicos radiculares, em experimentos efetuados em câmara de crescimento, com solução nutritiva. A morfologia das raízes variou pouco entre os genótipos, provavelmente por causa do cultivo das plantas em meio líquido. As diferenças entre genótipos quanto aos parâmetros cinéticos de absorção dependeram do nutriente. O  $I_{max}$  diferiu entre os cultivares para P; o  $K_m$ , para N e P, e o  $C_{min}$ , para N e K. A VPA, por apresentar maior variabilidade genética, deveria apresentar menores valores para  $K_m$  e  $C_{min}$  do que os híbridos. Contudo, isso só aconteceu para P em relação ao  $K_m$ . O HS, por apresentar maior potencial produtivo, deveria expressar os maiores valores para  $I_{max}$ , mas isso não ocorreu com nenhum dos macronutrientes avaliados. Portanto, a absorção de nutrientes não parece ser um fator determinante nas diferenças de rendimento de grãos entre genótipos de milho com bases genéticas contrastantes.

**Termos de indexação:** *Zea mays*, influxo de nutrientes, morfologia de raízes, solução nutritiva.

---

<sup>(1)</sup> Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor, apresentada no curso de mestrado em Ciência do Solo do Centro de Ciências Agroveterinárias (CAV) da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Recebido para publicação em outubro de 2004 e aprovado em outubro de 2005.

<sup>(2)</sup> Mestrando em Ciência do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Av. Luis de Camões 2090, Caixa Postal 281, CEP 88520-000 Lages (SC). Bolsista do CNPq. E-mail: delsonhorn@hotmail.com

<sup>(3)</sup> Professor do Curso de Agronomia do CAV/UDESC. Pesquisador do CNPq. E-mail: paulo.ernani@pesquisador.cnpq.br

<sup>(4)</sup> Estudante de Agronomia da UDESC. Bolsista de iniciação científica do programa PROBIC-UDESC.

**SUMMARY: NUTRIENT UPTAKE KINETICS AND MORPHOLOGICAL TRAITS OF ROOTS OF MAIZE CULTIVARS WITH CONTRASTING GENETIC VARIABILITY**

*Maize genotypes with contrasting genetic variability have different yield potential. This distinct yield potential may be partially caused by differences in the root system morphology or in the nutrient uptake kinetics parameters. This study aimed to assess such morphological and physiological plant attributes of three maize genotypes with different genetic bases. A single-cross hybrid (P32R21), a double-cross hybrid (Traktor) and an open-pollinated variety (BRS Planalto) were studied. The uptake kinetics parameters (maximum influx –  $I_{max}$ , Michaelis-Menten constant –  $K_m$ , and solution concentration at which net nutrient uptake stops –  $C_{min}$ ) were estimated. Morphological root attributes were also measured in growth chamber experiments carried out with nutrient solutions. Root morphology showed little variation among maize genotypes. Differences among genotypes regarding the uptake kinetics depended on the nutrient:  $I_{max}$  differed among genotypes for P, the  $K_m$  for N and P, and  $C_{min}$  for N and K. The open-pollinated variety was expected to present lower  $K_m$  and  $C_{min}$  values than the hybrids due to its broader genetic variability. Nevertheless, this was only observed for P in relation to  $K_m$ . The single-cross hybrid should have presented higher  $I_{max}$  values than the other genotypes due to its higher yield potential. However, this was not the case for any nutrient evaluated in the trials. Therefore, nutrient uptake does not seem to be a determinant factor to explain differences in grain yield of maize genotypes with contrasting genetic bases.*

*Index terms: Zea mays, nutrient influx, root morphology, solution culture.*

## INTRODUÇÃO

O aumento da produtividade agrícola e a diminuição dos custos produtivos passaram a ser fundamentais após a globalização da economia. Estes dois objetivos podem ser conciliados pela combinação do potencial genético das plantas com o uso eficiente dos nutrientes.

A disponibilidade dos nutrientes aos vegetais é influenciada por fatores de solo, que determinam o movimento até às raízes, e por atributos morfológicos e fisiológicos das plantas, que determinam a absorção. A morfologia do sistema radicular é determinada pelo comprimento, volume, superfície e raio das raízes e dos pelos radiculares (Schenk & Barber, 1979). A eficiência de absorção dos nutrientes varia na razão direta do comprimento e da finura das raízes porque esses atributos influenciam a superfície de absorção (Vilela & Anghinoni, 1984). O uso de modelos mecanísticos mostrou que a área superficial das raízes foi o parâmetro que mais influenciou a absorção de N (Barber, 1995), enquanto o raio e a taxa de crescimento radicular foram os mais importantes para P e K (Schenk & Barber, 1979; Ernani et al., 1994).

Além dos atributos morfológicos, a eficiência de absorção de nutrientes é influenciada pelos parâmetros cinéticos que compreendem o influxo máximo ( $I_{max}$ ), a afinidade dos carregadores pelo íon a ser transportado (constante de Michaelis-Menten,  $K_m$ ) e a concentração na solução do solo junto às

raízes onde o influxo pára de ocorrer ( $C_{min}$ ). Uma planta ideal deveria ter alto  $I_{max}$  e baixos valores para  $K_m$  e  $C_{min}$ . Os valores desses parâmetros cinéticos podem variar de acordo com a idade (Edwards & Barber, 1976; Sacramento & Rosolem, 1997) e concentração do nutriente nas plantas (Grespan et al., 1998; Martinez et al., 1993; Sacramento & Rosolem, 1997), morfologia radicular (Warncke & Barber, 1974; Anghinoni et al., 1989), presença de elementos tóxicos (Vilela & Anghinoni, 1984; Alves et al., 1988; Petry et al., 1994) e micorrizas (Faquin et al., 1990), mudanças climáticas (Bassirirad, 2000) e, principalmente, entre os genótipos e as espécies vegetais (Nielsen & Barber, 1978; Schenk & Barber, 1979; Anghinoni et al., 1989; Alves, et al., 2002).

Variações na morfologia radicular e nos parâmetros cinéticos entre genótipos de milho têm sido observadas (Baligar & Barber, 1979; Schenk & Barber, 1979; Anghinoni et al., 1989), evidenciando a importância da manipulação dos mesmos nos programas de melhoramento genético para a obtenção de cultivares mais eficientes na absorção de nutrientes.

Nielsen & Barber (1978) avaliaram parâmetros cinéticos e morfológicos radiculares de linhagens parentais de milho, de alguns híbridos simples derivados do cruzamento destas linhagens e de um híbrido comercial. A produção de massa seca e o comprimento radicular dos genótipos de cruzamento simples e de suas linhagens parentais foram

semelhantes. As linhagens conferiram os valores de  $I_{\max}$  para os híbridos que originaram, mas os valores de  $K_m$  e  $C_{\min}$  dos híbridos foram sempre menores do que suas linhagens parentais, indicando a maior capacidade dos híbridos em absorver P de soluções diluídas. Além disso, os genótipos que tiveram  $I_{\max}$  alto também apresentaram valores de  $K_m$  e  $C_{\min}$  altos, demonstrando que a eficiência deles em absorver nutrientes varia com a concentração do nutriente na solução.

Variações nos parâmetros cinéticos de absorção de nutrientes foram também observados em outras espécies, incluindo soja (Oliveira & Mielniczuk, 1978; Martinez et al., 1993; Sacramento & Rosolem, 1997), arroz (Furlani, 1988; Anghinoni et al., 1989) e espécies forrageiras de inverno (Fattore & Anghinoni, 1992; Anghinoni et al., 1989).

Os cultivares de milho são classificados em variedades de polinização aberta e híbridos. A variedade é um conjunto de plantas com características comuns, que apresenta material geneticamente estável e de alta variabilidade, o que lhe confere maior estabilidade de produção que os híbridos em condições adversas, porém normalmente menor potencial produtivo (Argenta et al., 2003). O híbrido simples é obtido a partir do cruzamento de duas linhagens endogâmicas e expressa alta uniformidade genética, morfológica e fenológica, porém pequena variabilidade genética. Ele necessita de condições edafoclimáticas favoráveis e disponibilidade adequada de nutrientes para expressar seu alto potencial produtivo. O híbrido duplo é obtido por meio do cruzamento de dois híbridos simples. Por apresentar maior variabilidade genética que o híbrido simples, pode ter maior estabilidade de produção em diferentes condições edafoclimáticas, porém menor potencial produtivo (Argenta et al., 2003).

É possível que as diferenças existentes na variabilidade genética entre híbridos e variedades de milho, que lhes conferem rusticidade e potenciais produtivos distintos, possam ser causadas pela capacidade diferencial desses grupos de plantas de absorver nutrientes.

Este estudo teve por objetivo avaliar essa hipótese em três cultivares de milho por meio da quantificação da morfologia do sistema radicular e dos parâmetros cinéticos relacionados com a absorção de nutrientes.

## MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi constituído por quatro experimentos, estabelecidos no Departamento de Solos da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), em Lages, entre outubro de 2002 e maio de 2003. Todos os ensaios foram realizados em câmara de crescimento, ajustada para um

fotoperíodo diário de 16 horas, com temperatura de 28 °C, 70 % de umidade relativa e radiação fotossinteticamente ativa ao nível da planta de 408  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , e as 8 h restantes de escuro, com temperatura de 25 °C e umidade relativa de 85 %.

Quantificaram-se os parâmetros cinéticos de absorção para  $\text{N-NO}_3^-$ , P, K, Ca e Mg, assim como alguns parâmetros morfológicos das raízes de três genótipos de milho contrastantes quanto à variabilidade genética. Os parâmetros cinéticos incluíram o influxo máximo de absorção ( $I_{\max}$ ), a constante de Michaelis Menten ( $K_m$ ), e a concentração mínima abaixo da qual as plantas deixam de absorver os nutrientes ( $C_{\min}$ ). Foram usados a variedade de polinização aberta BRS Planalto (VPA), o híbrido duplo Traktor (HD) e o híbrido simples P32R21 (HS).

Cada ensaio consistiu na caracterização de um único nutriente, à exceção do Ca e Mg, que foram determinados no mesmo experimento. O método de execução foi o mesmo para todos os experimentos. Inicialmente, as sementes foram germinadas entre folhas de papel-toalha com a base inferior imersa numa solução com 0,67  $\text{mmol L}^{-1}$  de Ca na forma de  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (Vilela & Anghinoni, 1984). Seis dias após a semeadura, quatro plantas similares no tocante ao desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular foram transferidas para vasos plásticos que continham cinco litros de solução nutritiva. Uma lâmina de isopor com quatro furos equidistantes foi ajustada na parte superior interna de cada vaso, aproximadamente um centímetro acima do nível superior da solução nutritiva, com o objetivo de manter as plantas eretas.

Usou-se a solução nutritiva de Hoagland (Jones Jr., 1983) que, na sua forma original, contém as seguintes concentrações, em  $\text{mg L}^{-1}$ :  $\text{N-NO}_3^- = 196$ ;  $\text{N-NH}_4^+ = 14$ ; P = 31; K = 234; Ca = 160; Mg = 48,6; S = 70; Fe-EDTA = 5; Cu 0,02; Zn = 0,15; Mn = 0,5; B = 0,5; Mo = 0,01. A solução foi formulada a partir da combinação das seguintes fontes:  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ,  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ,  $(\text{NH}_4)_6\text{MO}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . Na primeira semana após o transplante das mudas, usou-se metade da concentração da solução nutritiva descrita acima. A partir da segunda semana, utilizou-se a concentração integral, substituindo-a duas vezes por semana. A solução foi continuamente arejada e o pH foi ajustado diariamente para  $5,5 \pm 0,2$ .

Os parâmetros cinéticos foram determinados pelo princípio descrito por Claassen & Barber (1974), o qual consiste em quantificar a diminuição da concentração da solução de acordo com a absorção. Esses parâmetros foram avaliados 14 dias após o transplante das plantas para N, P e K, e 20 dias após o transplante para Ca e Mg, em plantas com 20 e 26 dias respectivamente.

No dia anterior à avaliação dos parâmetros cinéticos, a solução nutritiva foi substituída por água destilada, sendo reposta novamente no dia subsequente, tendo sido, porém, a concentração do nutriente a ser avaliado ajustada para  $357 \mu\text{mol L}^{-1}$ , no caso do  $\text{N-NO}_3^-$ ;  $26 \mu\text{mol L}^{-1}$ , para P;  $128 \mu\text{mol L}^{-1}$ , para K;  $75 \mu\text{mol L}^{-1}$ , para Ca, e  $123 \mu\text{mol L}^{-1}$ , para Mg. Estas concentrações foram obtidas em ensaios prévios, ocasião em que se determinou a quantidade aproximada de cada nutriente absorvida num período de 24 h. Nos dias da avaliação, usaram-se quatro litros de solução por vaso, cujo pH foi ajustado para 5,5 a cada 30 min.

Nos ensaios de N, P, Ca e Mg, alíquotas de 15 mL da solução nutritiva foram coletadas de cada vaso a cada 60 min durante as primeiras dez horas. No experimento de K, esse intervalo foi de 30 min, nas primeiras cinco horas, e de 60 min, nas cinco horas subsequentes. Vinte e quatro horas após a primeira coleta, mais três amostras foram coletadas nos experimentos de  $\text{N-NO}_3^-$ , P e K, e mais duas nos experimentos com Ca e Mg, todas intercaladas de quatro horas, para se ter certeza da obtenção do  $C_{\text{min}}$ . O  $\text{N-NO}_3^-$  foi determinado por arraste de vapores, em aparelho semi-micro-Kjeldahl, de acordo com Tedesco et al. (1995). O K foi obtido por fotometria de emissão; o P, pelo método de Murphy & Riley (1962), e o Ca e Mg, por espectrometria de emissão induzida por plasma.

Após o término da coleta da última alíquota, as plantas foram retiradas dos vasos e separadas em parte aérea e raízes. O peso úmido das raízes foi obtido depois de deixá-las pressionadas, durante dois minutos, entre camadas de papel-toalha. A seguir, retirou-se uma subamostra das raízes, com aproximadamente 0,5 g, para posterior determinação do comprimento radicular. As raízes e a parte aérea foram secas em estufa ajustada para  $60^\circ\text{C}$  até atingirem peso constante.

Os valores dos parâmetros cinéticos ( $I_{\text{max}}$ ,  $K_m$  e  $C_{\text{min}}$ ) foram calculados por meio do programa 'software' Cinética (Ruiz, 1985), que se baseia no

princípio desenvolvido por Claassen & Barber (1974). Esse programa calcula o  $I_{\text{max}}$  por meio de uma equação linear, e o  $K_m$  por equações do tipo exponencial, potencial ou exponencial-recíproco. A equação do modelo potencial foi a escolhida porque apresentou o melhor ajuste aos dados. O valor de  $C_{\text{min}}$  foi estimado a partir da última coleta, realizada 28 h após o início do processo de quantificação, para Ca e Mg, e 32 h, para  $\text{N-NO}_3^-$ , P e K.

Os parâmetros morfológicos do sistema radicular foram determinados conforme método apresentado por Schenk & Barber (1979). O comprimento (L) foi medido pelo método de intersecção, descrito por Tennant (1975). O raio médio (R) da raiz foi calculado pela fórmula  $R = (\text{Pf}/\text{Lp})^{1/2}$ , sendo Pf o peso fresco da raiz. Essa fórmula pressupõe que as raízes tenham forma cilíndrica e densidade de  $1,0 \text{ g cm}^{-3}$ . A área (A) e o volume (V) foram calculados por meio das seguintes fórmulas:  $A = (2\pi\text{RL})$ ,  $V = (\pi\text{R}^2)\text{L}$ . Nas plantas, foi calculada ainda a relação entre a massa seca de raiz e a massa seca de parte aérea.

Utilizou-se o delineamento experimental completamente casualizado, com quatro repetições por genótipo. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, utilizando-se o teste F. As médias foram comparadas pelo teste de Duncan, a 5 % de probabilidade.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Parâmetros morfológicos radiculares

A área e o volume radicular diferiram entre os genótipos de milho (Quadro 1). A variedade de polinização aberta (Planalto) foi a que apresentou a maior área ( $434 \text{ cm}^2 \text{ planta}^{-1}$ ) e o maior volume de raízes ( $4,10 \text{ cm}^3 \text{ planta}^{-1}$ ), o qual não diferiu do híbrido duplo (Traktor) ( $3,80 \text{ cm}^3 \text{ planta}^{-1}$ ). O híbrido simples foi o que apresentou os menores valores tanto para volume ( $3,46 \text{ cm}^3 \text{ planta}^{-1}$ ) quanto para área ( $375 \text{ cm}^2 \text{ planta}^{-1}$ ), o que é indesejável,

**Quadro 1. Parâmetros radiculares e massa seca (MS) da parte aérea de genótipos<sup>(1)</sup> de milho cultivados em solução nutritiva, aos 21 dias da germinação**

Determinação	Cultivar		
	Híbrido simples	Híbrido duplo	Variedade
Comprimento (m planta <sup>-1</sup> )	32 <sup>ns(2)</sup>	37	37
Raio médio (mm)	0,19 <sup>ns</sup>	0,18	0,19
Volume (cm <sup>3</sup> planta <sup>-1</sup> )	3,46 b <sup>(3)</sup>	3,80 ab	4,10 a
Área (cm <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup> )	375 b	417 b	434 a
MS de raiz (g planta <sup>-1</sup> )	0,20 <sup>ns</sup>	0,21	0,22
MS da parte aérea (g planta <sup>-1</sup> )	2,51 a	2,50 a	2,01 b
Relação raiz / parte aérea	0,076 c	0,086 b	0,106 a

<sup>(1)</sup> Híbrido simples = P32R21; Híbrido duplo = Traktor; Variedade = Planalto. <sup>(2)</sup> Inexistência de diferenças entre médias. <sup>(3)</sup> Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem significativamente pelo teste de Duncan a 5 %.

principalmente para solos com baixa fertilidade, uma vez que a absorção de nutrientes é proporcional ao volume de solo ocupado pelas raízes (Ernani et al., 1994). A exploração de um grande volume de solo pelas raízes é importante principalmente para a absorção dos nutrientes que se deslocam pelo mecanismo de difusão (Vilela & Anghinoni 1984) decorrente da alta relação entre demanda pela planta e concentração na solução do solo. Diferenças entre genótipos de milho no tocante à área e ao volume de raízes foram reportadas por Anghinoni et al. (1989).

O raio médio, o comprimento e a massa seca das raízes não diferiram entre os genótipos (Quadro 1). Na média, os valores desses parâmetros foram, respectivamente, de 0,19 mm, 35,3 m planta<sup>-1</sup>, e 0,21 g planta<sup>-1</sup>. Essa ausência de diferença pode ter sido causada pela alta concentração de nutrientes na solução nutritiva, relativamente às concentrações existentes nas soluções dos solos. Fattore & Anghinoni (1992) também não observaram diferenças morfológicas do sistema radicular entre espécies forrageiras. Schenk & Barber (1979) avaliaram os parâmetros morfológicos radiculares, considerando a disponibilidade de P, e observaram que eles variaram somente quando a concentração do nutriente era baixa, o que pode estar relacionado com o mecanismo da planta de incrementar a emissão de raízes mais finas e mais longas com o objetivo de aumentar a eficiência na absorção (Barber, 1995).

O acúmulo de massa seca pelas plantas variou entre os genótipos. Os híbridos acumularam aproximadamente 24 % mais massa seca na parte aérea do que a variedade de polinização aberta. Conseqüentemente, a relação raiz/parte aérea da variedade foi superior à dos híbridos (Quadro 1). Uma alta relação raiz parte aérea pode ser benéfica em condições de baixo nível de fertilidade do solo, pois haverá maior área de raiz para suprir as necessidades da planta. Por outro lado, a maior translocação de fotoassimilados para o sistema

radicular pode limitar o desenvolvimento vegetativo da parte aérea, diminuindo a área fotossinteticamente ativa.

### Parâmetros cinéticos de absorção

Os valores dos parâmetros cinéticos de absorção variaram com os genótipos e com os nutrientes (Quadros 2, 3 e 4). Variações nesses parâmetros também foram observadas por diversos autores em genótipos de milho (Nielsen & Barber, 1978; Baligar & Barber, 1979; Anghinoni et al., 1989; Alves et al., 2002).

O influxo máximo ( $I_{\max}$ ) diferiu entre os genótipos apenas para K. O híbrido duplo apresentou o maior influxo (62  $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) e a variedade, o menor (38  $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) (Quadro 4). Para os demais nutrientes, não houve variação expressiva do  $I_{\max}$  entre os grupos de plantas. Considerando a média dos três genótipos, os valores foram de 63, 14, 6,6 e 5,0  $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ , para N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Mg, P, e Ca, respectivamente. Verificou-se que o  $I_{\max}$  para N foi aproximadamente dez vezes maior que para P e Ca. Quando não há limitação no suprimento dos nutrientes pelo solo às raízes, como normalmente acontece para N, Ca e Mg em solos que já receberam calcário e com boa fertilização nitrogenada, o  $I_{\max}$  é o parâmetro que mais influencia a quantidade absorvida desses nutrientes pelas plantas. Como o  $I_{\max}$  para esses nutrientes não diferiu entre os genótipos, presume-se que, na ausência de estresse, as diferenças observadas nos tetos produtivos entre os genótipos por Horn (2004) em sistemas com alto investimento em adubação não foram determinadas pela absorção diferencial desses três nutrientes.

Quando houver alguma restrição na disponibilidade dos nutrientes na solução do solo junto às raízes, como normalmente acontece para P e K, mesmo em solos bem fertilizados, o  $I_{\max}$  deixa de ser o parâmetro cinético que mais influencia a absorção de nutrientes, a qual passa a ser controlada pela constante de Michaelis-Menten (Ernani et al., 1994).

**Quadro 2. Influxo máximo ( $I_{\max}$ ) para N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, P, K, Ca e Mg de três genótipos de milho<sup>(1)</sup>, determinado em plantas com 20 a 26 dias de idade**

Nutriente	Cultivar		
	Híbrido simples	Híbrido duplo	Variedade
	μmol g <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>		
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	73,18 <sup>ns(2)</sup>	80,98	107,72
P	7,2 <sup>ns</sup>	7,96	4,54
K	49,71 ab <sup>(3)</sup>	61,79 a	38,56 b
Ca	5,28 <sup>ns</sup>	4,24	5,47
Mg	14,20 <sup>ns</sup>	15,39	13,96

<sup>(1)</sup> Híbrido simples = P32R21; Híbrido duplo = Traktor; Variedade = Planalto. <sup>(2)</sup> Inexistência de diferenças entre médias. <sup>(3)</sup> Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem significativamente pelo teste de Duncan a 5 %.

**Quadro 3. Constantes de Michaelis-Menten ( $K_m$ ) para  $N-NO_3^-$ , P, K, Ca e Mg de três genótipos de milho<sup>(1)</sup>, determinadas em plantas com 20 a 26 dias de idade**

Nutriente	Cultivar		
	Híbrido simples	Híbrido duplo	Variedade
	----- $\mu\text{mol L}^{-1}$ -----		
$N-NO_3^-$	37,1 b <sup>(3)</sup>	70,6 a	66,0 a
P	21,1 a	19,7 ab	14,1 b
K	39,1 <sup>ns(2)</sup>	38,3	37,4
Ca	50,4 <sup>ns</sup>	58,4	48,7
Mg	35,2 <sup>ns</sup>	48,7	24,5

<sup>(1)</sup> Híbrido simples = P32R21; Híbrido duplo = Traktor; Variedade = Planalto. <sup>(2)</sup> Inexistência de diferenças entre médias. <sup>(3)</sup> Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem significativamente pelo teste de Duncan a 5 %.

**Quadro 4. Concentrações de  $N-NO_3^-$ , P, K, Ca e Mg na solução abaixo da qual a absorção de cada nutriente por três genótipos de milho<sup>(1)</sup> cessa ( $C_{\min}$ ), determinadas em plantas com 20 a 26 dias de idade**

Nutriente	Cultivar		
	Híbrido simples	Híbrido duplo	Variedade
	----- $\mu\text{mol L}^{-1}$ -----		
$N-NO_3^-$	5,09 b <sup>(3)</sup>	17,6 a	17,6 a
P	0,87 <sup>ns(2)</sup>	1,21	1,26
K	4,52 b	3,77 b	6,72 a
Ca	6,43 <sup>ns</sup>	6,41	5,34
Mg	0,56 <sup>ns</sup>	0,58	0,69

<sup>(1)</sup> Híbrido simples = P32R21; Híbrido duplo = Traktor; Variedade = Planalto. <sup>(2)</sup> Inexistência de diferenças entre médias. <sup>(3)</sup> Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem significativamente pelo teste de Duncan a 5 %.

A constante de Michaelis Menten ( $K_m$ ) variou entre os genótipos apenas para  $N-NO_3^-$  e P. O híbrido simples apresentou  $K_m$  menor para N (37,1  $\mu\text{mol L}^{-1}$ ) do que o híbrido duplo (70,6  $\mu\text{mol L}^{-1}$ ) e a variedade (66,0  $\mu\text{mol L}^{-1}$ ) (Quadro 3). Isso significa que o híbrido simples tem maior eficiência em absorver a forma nítrica desse nutriente que os demais genótipos, em condições de baixa e média concentração na solução. Por outro lado, o híbrido simples foi o que apresentou o maior valor de  $K_m$  para P (21,1  $\mu\text{mol L}^{-1}$ ), não tendo diferido do  $K_m$  do híbrido duplo (19,7  $\mu\text{mol L}^{-1}$ ), sendo ambos maiores que o da variedade (14,1  $\mu\text{mol L}^{-1}$ ). Para nutrientes que chegam às raízes por difusão, como normalmente acontece com P e K (Barber, 1995), há a formação de uma zona de depleção no solo junto às raízes, onde o  $I_{\max}$  normalmente não é atingido. Nessas situações, o  $K_m$  passa a ser o parâmetro cinético mais importante na absorção de nutrientes, principalmente nos solos onde a disponibilidade desses nutrientes varia de média a baixa. Para os demais nutrientes, os valores de  $K_m$  não variaram entre os genótipos e, na média, foram de 38, 52 e 36  $\mu\text{mol L}^{-1}$ , respectivamente, para K, Ca e Mg (Quadro 3).

A concentração na solução onde as plantas pararam de absorver os nutrientes ( $C_{\min}$ ) diferiu entre os genótipos somente para  $N-NO_3^-$  e K (Quadro 4). O híbrido duplo e a variedade pararam de absorver  $N-NO_3^-$ , quando a concentração na solução nutritiva atingiu 17,6  $\mu\text{mol L}^{-1}$ , enquanto o híbrido simples continuou a absorver esse elemento até a concentração de 5,1  $\mu\text{mol L}^{-1}$ . Para K, o híbrido simples, o híbrido duplo e a variedade de polinização aberta apresentaram valores de  $C_{\min}$ , respectivamente, de 4,5, 3,8 e 6,7  $\mu\text{mol L}^{-1}$ , e somente esse último diferiu dos demais. Quando não há limitação na chegada dos nutrientes às raízes, o  $C_{\min}$  não tem muita importância, pois não limita a absorção. No entanto, quando o suprimento pelo solo é pequeno, como ocorre em solos com baixa concentração de nutrientes ou em períodos de déficit hídrico, o  $C_{\min}$  exerce grande influência na absorção. Os valores de  $C_{\min}$  não diferiram entre os genótipos para os demais nutrientes que, na média, foram de 0,61, 1,1, e 6,1, para Mg, P e Ca, respectivamente (Quadro 4).

A variedade de polinização aberta é o genótipo que apresenta a maior variabilidade genética. Se-

gundo Bisognin et al. (1997), esta característica é desejável, pois confere maior rusticidade ao genótipo às condições adversas do ambiente, tais como os solos de baixa fertilidade. Por esse motivo, uma das hipóteses do trabalho era de que a BRS Planalto deveria apresentar valores para  $K_m$  e  $C_{min}$  menores que os dos híbridos, pois esses parâmetros determinam a habilidade das plantas em absorver nutrientes em condições de baixa e média fertilidade do solo. Isso só aconteceu para o valor de  $K_m$  para P. Para os demais nutrientes, a variedade apresentou valores para  $K_m$  e  $C_{min}$  iguais ou superiores aos dos híbridos (Quadros 2, 3 e 4). Por outro lado, o híbrido simples tem maior potencial produtivo que os demais, razão por que deveria apresentar os maiores valores de  $I_{max}$ , que é o parâmetro que determina a eficiência de absorção em condições de alta fertilidade do solo. Isso só ocorreu para K em relação à variedade. Para os demais nutrientes, o  $I_{max}$  do HS não diferiu dos demais genótipos. Resultados seme-

lhantes foram obtidos por Anghinoni et al. (1989), ao avaliarem genótipos de milho cultivados no Rio Grande do Sul na década de oitenta.

Nenhum parâmetro cinético de absorção ( $I_{max}$ ,  $K_m$  ou  $C_{min}$ ) diferiu entre os genótipos para Ca ou Mg (Quadros 2, 3 e 4), à semelhança do observado por Baligar & Barber (1979). Essa ausência de diferenças provavelmente se deve ao fato de ser o melhoramento genético de plantas feito em solos com pH próximo da neutralidade ou com a acidez corrigida, situações em que a disponibilidade de Ca e Mg é alta.

### Predição do influxo dos nutrientes pelos genótipos

A análise conjunta dos parâmetros cinéticos por meio da equação de Michaelis-Menten permite que se calcule a taxa de influxo de cada nutriente, de acordo com sua concentração na solução (Figura 1).

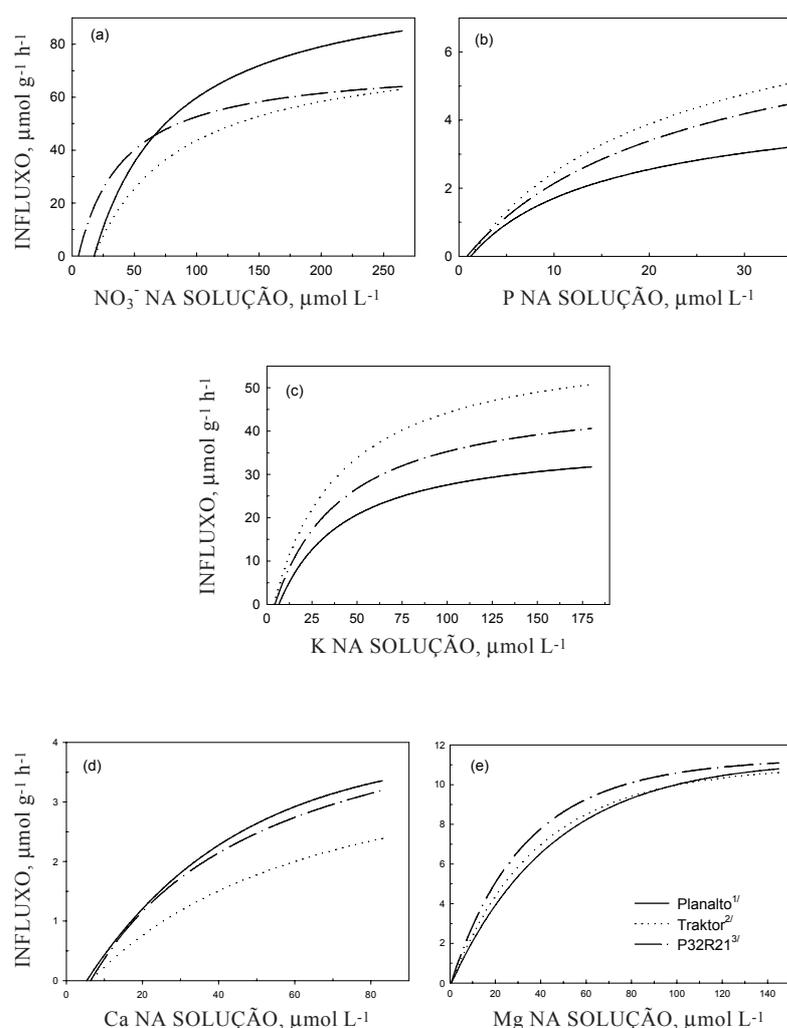


Figura 1. Taxa de influxo de N- $\text{NO}_3^-$  (a), P (b), K (c), Ca (d) e Mg (e) de genótipos de milho de acordo com a concentração de nutrientes na solução. <sup>(1)</sup>Variedade de polinização aberta; <sup>(2)</sup>Híbrido duplo; <sup>(3)</sup>Híbrido simples.

O comportamento dos genótipos predito por essa equação variou com o nutriente e com a concentração deles na solução. Para o  $N-NO_3^-$ , a variedade de polinização aberta apresentou o maior influxo total em condições de alta concentração na solução (Figura 1a), apesar de seu  $I_{max}$  não ter diferido dos demais genótipos (Quadro 2), provavelmente por causa do alto coeficiente de variação.

Sangoi (2001), ao avaliar o efeito da adubação nitrogenada sobre a absorção de N, verificou que os híbridos antigos de milho foram os que acumularam a maior quantidade de N na parte aérea durante o florescimento, porém os que apresentaram o menor rendimento de grãos. Nesse caso, a maior absorção de N não se traduziu em aumento no rendimento, e isso pode ocorrer quando a disponibilidade de N é muito alta, situação em que as plantas podem absorver quantidades maiores do que o necessário para atingir a produtividade máxima (Edwards & Barber, 1976). Em baixa concentração de  $N-NO_3^-$  na solução, o influxo predito para o híbrido simples foi maior do que o influxo predito para a variedade (Figura 1), demonstrando a possibilidade de o híbrido ter maior eficiência de absorção desse nutriente nessas condições. Esse resultado é o reflexo dos menores valores de  $K_m$  e  $C_{min}$  do híbrido relativamente aos da variedade (Quadros 3 e 4), refutando a hipótese de que os híbridos simples, por possuírem maior uniformidade genética, são mais exigentes em nutrientes do que cultivares com maior variabilidade genética.

Por outro lado, esse resultado pode ajudar a explicar o rendimento de grãos reportado por Silva et al. (2003) para esses mesmos genótipos, quando conduzidos sob condição de estresse nutricional e hídrico, em Eldorado do Sul, RS. Tais autores constataram que o híbrido simples (P32R21) foi mais produtivo do que o híbrido duplo (Traktor) e do que o cultivar de polinização aberta (Planalto), quando cultivado num Argissolo Vermelho que continha  $280 \text{ g kg}^{-1}$  de argila e  $26 \text{ g kg}^{-1}$  de matéria orgânica, onde foram aplicados apenas  $30 \text{ kg ha}^{-1}$  de N. Solos com baixos teores de argila e matéria orgânica normalmente liberam pouco N. Nessa condição, o híbrido simples, por apresentar menores valores de  $K_m$  e  $C_{min}$ , foi, provavelmente, menos afetado pela baixa disponibilidade de N que os demais genótipos.

Os influxos preditos para P e K apresentaram o mesmo comportamento entre os os genótipos graças à variação da concentração dos nutrientes na solução (Figura 1). Os maiores valores de influxo ocorreram para o híbrido duplo, seguido pelo híbrido simples e pela VPA. As diferenças numéricas entre os genótipos tenderam a se acentuar à medida que aumentava a concentração dos nutrientes na solução. Para Ca e Mg, o influxo foi semelhante entre os genótipos, à exceção do híbrido duplo, que apresentou o menor valor para Ca (Figura 1).

## CONCLUSÕES

1. Os atributos morfológicos do sistema radicular que afetam a absorção de nutrientes variaram pouco entre os genótipos de milho.
2. O influxo máximo ( $I_{max}$ ) não diferiu entre os cultivares de milho, para nenhum dos macronutrientes, indicando que o maior potencial produtivo do híbrido simples não está vinculado à maior capacidade de absorção de nutrientes.
3. A variedade de polinização aberta apresentou maiores valores de  $C_{min}$  para  $N-NO_3^-$  e K do que o híbrido simples, indicando que a maior variabilidade genética da variedade não está necessariamente associada à maior eficiência na absorção desses nutrientes em baixa concentração na solução do solo.
4. Coletivamente, os resultados obtidos no trabalho permitem inferir que as diferenças de produtividade entre cultivares de milho com variabilidade genética contrastante não são causadas pela sua capacidade diferencial em absorver os principais macronutrientes.

## LITERATURA CITADA

- ALVES, V.M.C.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L. & BARROS, N.F. Efeito do alumínio sobre a absorção e translocação de fósforo e sobre a composição mineral de duas cultivares de trigo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 23:563-573, 1988.
- ALVES, V.M.C.; PARENTONI, S.N.; VASCONCELLOS, C.A.; PITTA, G.V.E. & FRANÇA, C.C.M. Cinética de absorção de fósforo e crescimento do sistema radicular de genótipos de milho contrastantes para eficiência a fósforo. *R. Bras. Milho e Sorgo*, 1:85-92, 2002.
- ANGHINONI, I.; VOLKART, K.; FATTORE, C. & ERNANI, P.R. Morfologia de raízes e cinética da absorção de nutrientes em diversas espécies e genótipos de plantas. *R. Bras. Ci. Solo*, 13:355-361, 1989.
- ARGENTA, G.; SANGOI, L. & SILVA, P.R.F. Potencial de rendimento de grãos de milho em dois ambientes e cinco sistemas de produção. *Sci. Agraria*, 4:27-34, 2003.
- BALIGAR, V.C. & BARBER, S.A. Genotypic differences of corn for ion uptake. *Agron. J.*, 71:870-873, 1979.
- BARBER, S.A. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. 2.ed. New York, John Wiley & Sons, 1995. 414p.
- BASSIRIRAD, H. Kinetics of nutrient uptake by roots: responses to global change (review). *New Phytol.*, 147:155-169, 2000.
- BISOGNIN D.A.; CIPRANDI, O.; COIMBRA, J.L.M. & GUIDOLIN, A.F. Potencial de variedades de polinização aberta de milho em diferentes condições adversas de ambiente. *Pesq. Agropec. Gaúcha*, 3:29-34, 1997.

- CLAASSEN, N. & BARBER, S.A. A method for characterizing the relation between nutrient concentration and flux into roots of intact plants. *Plant Physiol.*, 54:564-568, 1974.
- EDWARDS, J.H. & BARBER, S.A. Nitrogen flux into corn roots as influenced by shoot requirement. *Agron. J.*, 68:471-473, 1976.
- ERNANI P.R.; SANTOS, J.C.P.; KAMINSKI, J. & RHEINHEIMER, D. Prediction of phosphorus uptake by a mechanistic model in a low phosphorus highly weathered soil as affected by mycorrhizae inoculation. *J. Plant Nutr.*, 17:1067-1078, 1994.
- FAQUIN, V.; MALAVOLTA, E.; MURAOKA, T. Cinética da absorção de fosfato em soja sob influência de micorriza vesículo-arbuscular. *R. Bras. Ci. Solo*, 14:41-48, 1990.
- FATTORE, N. & ANGHINONI, I. Eficiência de absorção de nutrientes por espécies forrageiras de inverno. *Pesq. Agropec. Bras.*, 27:251-258, 1992.
- FURLANI A.M.C. Variações em parâmetros de cinética de absorção de fósforo de três linhagens de arroz. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:77-80, 1988.
- GRESPLAN, S.L.; DIAS, L.E. & NOVAIS, R.F. Crescimento e parâmetros cinéticos de absorção de amônio e nitrato por mudas de *Eucalyptus* spp submetidas a diferentes relações amônio/nitrato na presença e ausência de fósforo. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:667-674, 1998.
- JONES Jr., J.B. A Guide for the hydroponic & soilless culture grower. Portland, Timber Press, 1983. 123p.
- HORN, D. Cinética da absorção de nutrientes em cultivares de milho com diferentes bases genéticas e seus desempenhos agrônomico e econômico em quatro níveis de manejo. Lages, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2004. 111p. (Tese de Mestrado)
- MARTINEZ, H.E.P.; NOVAIS, R.R.; RODRIGUES, L.A. & SACRAMENTO, L.V.S. Comportamento de variedades de soja cultivadas em diferentes doses de fósforo: I. Cinética de absorção de fósforo e ajustes morfológicos da planta. *R. Bras. Ci. Solo*, 17:231-238, 1993.
- MURPHY, J. & RILEY, H.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chem. Acta*, 27:31-36, 1962.
- NIELSEN, N.E. & BARBER, S.A. Differences among genotypes of corn in the kinetics of P uptake. *Agron. J.*, 70:695-698, 1978.
- OLIVEIRA, R.F. & MIELNICZUK, J. Caracterização de três cultivares de soja (*Glycine Max* (L) Merrill) quanto à eficiência de absorção de K. *Agron. Sulriogvardense.*, 14:251-276, 1978.
- PETRY, C.; RHEINHEIMER, D.S.; KAMINSKI, J.; PESSOA, A.C.S. & CASSOL, L.C. Influência do estresse de alumínio em plantas de fumo: II. Efeito nos parâmetros cinéticos de absorção de fósforo. *R. Bras. Ci. Solo*, 18:69-72, 1994.
- RUIZ, H.A. Estimativa dos parâmetros cinéticos Km e Vmax por uma aproximação gráfico-matemática. *R. Ceres*, 32:79-84, 1985.
- SACRAMENTO L.V.S. & ROSELEM, C.A. Cinética de absorção de potássio e seus ajustes em plantas de soja em função da idade e estado nutricional. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:213-219, 1997.
- SANGOI, L. Understanding plant density effects on maize growth and development: an important issue to maximize grain yield. *Ci. Rural*, 31:159-168, 2001.
- SCHENK, M.K. & BARBER, S.A. Phosphate uptake by corn as affected by soil characteristics and root morphology. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43:880-883, 1979.
- SILVA, A.A.; SILVA, P.R.F.S.; ARGENTA, G.; SANGOI, L.; MINETTO, T.; BISOTTO, V.; RAMBO, L.; FORSTHOFER, E.L.; SUHRE, E. & STRIEDER, M.L. Desempenho agrônomico e econômico de tipos de cultivares de milho em função de níveis de manejo. In: REUNIÃO TÉCNICA CATARINENSE DE MILHO E FEIJÃO E VI REUNIÃO SULBRASILEIRA DE FEIJÃO, 4., Lages, 2003. Resumos. Graphel, 2003. p.101-105.
- TEDESCO, M.J.; VOLKSVEISS, S.J. & BOHEN, H. Análise de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 188p. (Boletim Técnico, 5)
- TENNANT, D. A test of a modified line intercept method of estimating root length. *J. Ecol. Appl.*, 63:995-1001, 1975.
- VILELA, L. & ANGHINONI, I. Morfologia do sistema radicular e cinética da absorção de fósforo em cultivares de soja afetados pela interação alumínio-fósforo. *R. Bras. Ci. Solo*, 8:91-96, 1984.
- WARNCKE, D.D. & BARBER, S.A. Root development and nutrient uptake by corn grown in solution culture. *Agron. J.*, 66:514-516, 1974.