

NOTA

ABSORÇÃO, TRANSLOCAÇÃO E UTILIZAÇÃO DE FÓSFORO POR VARIEDADES DE TRIGO SUBMETIDAS À TOXIDEZ DE ALUMÍNIO⁽¹⁾

A. D. ABICHEQUER⁽²⁾, H. BOHNEN⁽³⁾ & I. ANGHINONI⁽⁴⁾

RESUMO

Variedades de trigo tolerantes ao alumínio podem ser mais eficientes no aproveitamento de fósforo na presença desse elemento. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do alumínio em variedades de trigo Toropi, considerada eficiente, e CNT 8, ineficiente quanto ao aproveitamento de fósforo. Realizou-se um experimento em 1994, em casa de vegetação, em vasos que continham solução nutritiva com duas concentrações de fósforo (1,6 e 32,3 $\mu\text{mol L}^{-1}$) e duas de alumínio (0,0 e 37,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$). Após 31 dias de cultivo, foram avaliados a morfologia das raízes e o aproveitamento do fósforo. As raízes da variedade de trigo Toropi foram menos afetadas do que as da CNT 8 pelo alumínio; no entanto, não houve relação da absorção de fósforo com o comprimento, raio médio e superfície do sistema radicular. A presença de alumínio aumentou a diferença entre as variedades Toropi e CNT 8 quanto à eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo, com vantagem para a primeira, que é mais tolerante ao alumínio.

Termos de indexação: eficiência, nutrição vegetal, aproveitamento de nutrientes, genótipos, tolerância.

SUMMARY: *PHOSPHORUS UPTAKE, TRANSLOCATION AND UTILIZATION IN WHEAT VARIETIES UNDER ALUMINUM TOXICITY*

Aluminum tolerant wheat varieties can present increased efficiency of phosphorus use in presence of aluminum. A greenhouse experiment was conducted in 1994 to compare the wheat cultivars (Toropi) and (CNT 8), considered efficient and inefficient, respectively, in

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor, apresentada à Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Recebido para publicação em dezembro de 1999 e aprovado em fevereiro de 2003.

⁽²⁾ Pesquisador da Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária – FEPAGRO. Rua Gonçalves Dias 570, CEP 90130-060 Porto Alegre (RS). E-mail: andredab@bewnet.com.br

⁽³⁾ Engenheiro-Agrônomo, Colaborador Convidado do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Caixa Postal 776, CEP 90001-970 Porto Alegre (RS). E-mail: bohnen@conex.com.br

⁽⁴⁾ Professor do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Caixa Postal 776, CEP 90001-970 Porto Alegre (RS). E-mail: ibanghi@vortex.ufrgs.br

relation to phosphorus use. Nutrient solutions containing two phosphorus (1.6 and 32.3 $\mu\text{mol L}^{-1}$) and two aluminum (0.0 and 37.0 $\mu\text{mol L}^{-1}$) concentrations were tested. Root morphology and phosphate use were established for the plants, which were harvested from the pots on the 31th day. Roots of the Toropi cultivar were less affected by aluminum than CNT 8; there was no relationship, however, between phosphorus uptake and root length, radius or surface. The presence of aluminum increased the difference between Toropi and CNT 8 in their efficiency of phosphorus uptake, translocation and utilization. Toropi, which is more tolerant towards aluminum, proved to be more efficient.

Index terms: efficiency, plant nutrition, nutrient use, genotypes, tolerance.

INTRODUÇÃO

Diferenças entre variedades de trigo quanto à eficiência no aproveitamento ou uso de fósforo podem estar relacionadas com o diferente grau de tolerância dessas variedades à toxidez de alumínio, comum nos solos onde o cereal é cultivado no Brasil. A eficiência no aproveitamento de fósforo resulta da eficiência de absorção, de translocação e de utilização (Baligar & Fageria, 1999).

O alumínio prejudica a absorção de fósforo de duas formas: reduz o crescimento do sistema radicular (Foy, 1976) e liga-se ao fósforo, tanto na superfície quanto no interior das células, formando compostos de baixa solubilidade (Clarkson, 1966). Desta forma, ocorre redução na absorção de fósforo, bem como precipitação do nutriente nas raízes, restringindo a sua translocação para a parte aérea.

Variedades de trigo tolerantes ao alumínio são menos prejudicadas do que as sensíveis (Miranda, 1985), especialmente em solos ácidos e com baixa disponibilidade de fósforo, como é o caso de solos tropicais e subtropicais. Cultivares de soja tolerantes ao alumínio foram menos afetadas por essa toxidez, tanto na morfologia das raízes quanto na cinética de absorção de fósforo (Vilela & Anghinoni, 1984). Cultivares de trigo tolerantes ao alumínio foram, também, mais eficientes na translocação de fósforo em solos com problemas de toxidez daquele elemento, sobretudo em cultivares mais sensíveis (Miranda, 1985; Alves et al., 1988).

Entretanto, nem sempre a eficiência de absorção e a utilização de fósforo estão relacionadas diretamente com a tolerância ao alumínio. Assim, a variedade de trigo BH 1146, mesmo sendo uma das fontes de maior tolerância ao alumínio utilizada universalmente em programas de melhoramento de trigo, apresentou menor absorção de fósforo do que outros genótipos (Soon, 1992). Da mesma forma, não houve relação entre índices de eficiência de aproveitamento de fósforo e a tolerância de linhagens de milho e arroz ao alumínio (Furlani & Furlani, 1991).

A tolerância ao alumínio, classicamente, é explicada por dois grupos de mecanismos: mecanismos de exclusão, que impedem que o alumínio alcance seus sítios de toxidez na planta; mecanismos internos

(de reparo), que possibilitam a penetração do alumínio no interior da célula, mas têm sua ação fitotóxica neutralizada (Cançado et al., 1999). Diversos mecanismos bioquímicos têm sido propostos para explicar a tolerância.

No caso da exclusão, podem-se citar: a exsudação radicular de moléculas quelantes (principalmente ácidos orgânicos) que complexam o alumínio, a elevação do pH da rizosfera pelas raízes, a baixa CTC das raízes, a síntese de mucilagem no ápice radicular e síntese e exsudação de polipeptídeos. No caso da tolerância interna, são citadas: a ação de polipeptídeos do citoplasma como moléculas quelantes, a existência de enzimas cuja atividade não é prejudicada pelo alumínio e a eliminação do alumínio do ambiente celular por compartimentalização no vacúolo.

Quanto à herança genética da tolerância ao alumínio, considera-se, na maioria das espécies vegetais, que é característica dominante e poligênica, podendo ser controlada por um ou mais genes de ação maior e diversos genes modificadores (Cançado et al., 1999).

O trabalho teve como objetivo avaliar a influência do alumínio na morfologia das raízes e na absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo com diferentes graus de aproveitamento deste nutriente.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas as variedades de trigo (*Triticum vulgare*) Toropi, considerada eficiente, e CNT 8, ineficiente quanto ao aproveitamento de fósforo, de acordo com Abichequer & Bohnen (1998). A Toropi é, também, considerada tolerante e a CNT 8, sensível ao alumínio, conforme demonstrado por Camargo et al. (1987).

O trabalho foi realizado nos meses de setembro e outubro de 1994, em casa de vegetação do Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em Porto Alegre (RS). As duas variedades foram submetidas a duas concentrações de fósforo (1,6 e 32,3 $\mu\text{mol L}^{-1}$) e a duas concentrações

de alumínio (0,0 e 37,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$) em solução nutritiva, com os vasos arranjados no delineamento completamente casualizado, com três repetições. As concentrações de fósforo e alumínio foram estabelecidas em experimento preliminar. O alumínio foi adicionado como $\text{Al}(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ e o fósforo como KH_2PO_4 . A composição do restante da solução nutritiva foi a mesma utilizada por Abichequer & Bohnen (1998) e constou de: 2,0 mmol L^{-1} de K (KCl); 1,0 mmol L^{-1} de Mg e de S ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$); 4,0 mmol L^{-1} de N e 1,5 mmol L^{-1} de Ca [NH_4NO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ e $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$]; 3,0 mmol L^{-1} de Cl (KCl e $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$); 105 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Fe (Fe-EDTA); 4,5 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Mn ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$); 4,7 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Cu ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$); 1,5 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$); 23,1 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de B (H_3BO_3) e 0,1 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Mo ($\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

As sementes das variedades de trigo foram colocadas para germinar em papel filtro que continha solução de 0,5 mmol L^{-1} de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Aos cinco dias, quatro plântulas homogêneas foram transplantadas para vasos de dois litros, sendo fixadas em tampas de isopor. O pH da solução nutritiva foi mantido em $4,1 \pm 0,2$ e a solução arejada continuamente, com troca a cada dois dias.

A colheita do experimento ocorreu após 31 dias de cultivo, quando as plantas estavam com 36 dias de idade. A parte aérea e as raízes foram avaliadas separadamente para obtenção do rendimento de matéria seca. Nas raízes, foram avaliados o comprimento, pelo método de Tennant (1975), e o raio e a superfície, por meio de fórmulas (Shenk & Barber, 1979). O crescimento das raízes foi considerado como exponencial e a taxa calculada conforme Shenk & Barber (1979).

O teor de fósforo no tecido vegetal foi determinado após combustão, por seis horas, em mufla a 500 °C, pela utilização do método de Murphy & Riley (1962), após dissolução das cinzas em HNO_3 2,0 mol L^{-1} . Calculou-se o fósforo translocado da seguinte forma: fósforo translocado = (conteúdo de fósforo na parte aérea/conteúdo de fósforo na planta) x 100. A eficiência de utilização de fósforo foi calculada pelas relações propostas por Siddiqi & Glass (1981).

A análise da variância dos resultados foi seguida pelo teste F ($P < 0,05$), para a discriminação das diferenças entre as médias. Também foi analisada a correlação entre o conteúdo de fósforo na planta e as características morfológicas das raízes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Absorção de fósforo e morfologia das raízes

O conteúdo de fósforo nas plantas de trigo (Quadro 1) foi afetado ($P < 0,05$) tanto pelas variedades quanto pelas concentrações de fósforo e

alumínio na solução (interação tríplice). Uma maior absorção desse nutriente foi constatada na Toropi no maior nível de fósforo na solução, tanto na presença quanto na ausência do alumínio. A presença deste elemento prejudicou a absorção de fósforo por ambas as variedades, mas a CNT 8 foi mais afetada. Rosa & Camargo (1990) também observaram maior absorção de fósforo pela variedade Toropi, comparativamente à CNT 8, em solo ácido com alumínio em nível tóxico. Assim, o caráter de tolerância ao alumínio, apresentado pela Toropi, afetou, também, a eficiência da absorção de fósforo em relação à variedade mais sensível, o que foi comprovado por Miranda (1985).

Para as características morfológicas de raízes, ocorreu interação significativa apenas entre variedades e concentrações de alumínio na solução (Quadro 2). Os resultados evidenciaram uma maior tolerância da Toropi ao alumínio, uma vez que, apesar de a CNT 8 apresentar características morfológicas mais favoráveis à absorção de fósforo (maior comprimento, área superficial, taxa de crescimento e menor raio de raízes) na ausência do alumínio, tais características, à exceção do raio médio, não se diferenciaram na presença de alumínio. Nesta situação, ocorreu um decréscimo muito mais acentuado dos valores das características morfológicas de raízes na CNT 8, quando comparados aos da Toropi.

A maior superfície de raízes apresentada pela CNT 8 na ausência de alumínio não resultou em

Quadro 1. Conteúdo de fósforo total, na parte aérea e nas raízes de variedades de trigo submetidas a duas concentrações de fósforo, na ausência e presença de alumínio, em solução nutritiva

Variedade	Concentração de Al ($\mu\text{mol L}^{-1}$)			
	0,0		37,0	
	Concentração de P ($\mu\text{mol L}^{-1}$)			
	1,6	32,3	1,6	32,3
	P total, mg planta ⁻¹			
Toropi	0,249 aB	3,685 aA	0,210 aB	2,576 aA
CNT 8	0,254 aB	3,076 bA	0,198 aB	1,598 bA
	P na parte aérea, mg planta ⁻¹			
Toropi	0,182 aB	3,473 aA	0,157 aB	2,355 aA
CNT 8	0,182 aB	2,742 bA	0,134 aB	1,005 bA
	P nas raízes, mg planta ⁻¹			
Toropi	0,067 aB	0,211 bA	0,053 aB	0,221 bA
CNT 8	0,072 aB	0,334 aA	0,063 aB	0,594 aA

Médias de variedades seguidas de mesma letra minúscula, dentro de cada concentração de fósforo e de alumínio, e médias de concentrações de fósforo, seguidas de mesma letra maiúscula, dentro de cada variedade e concentração de alumínio, não diferem pelo teste F ($P < 0,05$).

Quadro 2. Morfologia do sistema radicular de variedades de trigo, na ausência e presença de alumínio, em solução nutritiva

Variedade	Concentração de Al ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	
	0,0	37,0
	Comprimento, cm	
Toropi	842 bA	663 aA
CNT 8	1271 aA	446 aB
	Raio médio, mm	
Toropi	0,145 aA	0,150 bA
CNT 8	0,135 bB	0,172 aA
	Área superficial, cm^2 planta ⁻¹	
Toropi	76,5 bA	63,0 aA
CNT 8	106,6 aA	48,1 aB
	Taxa de crescimento, $\times 10^{-6}$ cm s^{-1}	
Toropi	1,78 bA	1,69 aB
CNT 8	2,15 aA	1,76 aB

Médias de variedades seguidas de mesma letra minúscula, dentro de cada concentração de alumínio, e médias de concentrações de alumínio, seguidas de mesma letra maiúscula, dentro de cada variedade, não diferem pelo teste F ($P < 0,05$).

maior absorção de fósforo, tendo sido superada pela Toropi no nível mais elevado desse nutriente na solução (Quadro 1). Assim, a absorção de fósforo não se correlacionou com o comprimento ($r = 0,59$; ns), com a área superficial ($r = 0,72$; ns), com o raio ($r = 0,03$; ns) e com a taxa de crescimento de raízes ($r = 0,46$; ns). A ausência de relação entre absorção de fósforo e morfologia de raízes também foi verificada no experimento de Abichequer & Bohnen (1998).

Pesquisas que relacionam a absorção de fósforo com características morfológicas de raízes em solução nutritiva têm sido publicadas na literatura (Vilela & Anghinoni, 1984; Miranda, 1985; Martinez et al., 1993). A aeração da solução diminui ou mesmo pode anular o efeito do mecanismo de difusão no suprimento de fósforo às raízes (Gerloff & Gabelman, 1983).

Assim, antes de se tirar conclusões definitivas a respeito da relação entre a eficiência de absorção de fósforo e as características do sistema radicular de variedades de trigo com diferente sensibilidade ao alumínio, devem ser consideradas pesquisas em solo, com validação no campo. Diferenças entre variedades da mesma espécie desenvolvidas no solo podem ser causadas pela presença de pêlos radiculares ou micorrizas em solos deficientes em fósforo, fatores que não são relevantes em solução nutritiva.

Translocação de fósforo

A eficiência de translocação de fósforo para a parte aérea do trigo (Quadro 3) foi, a exemplo da absorção, dependente da variedade e dos níveis de

alumínio e de fósforo (interação tríplice). As variedades aumentaram a translocação de fósforo com o aumento de sua concentração na solução nutritiva, exceto no caso da CNT 8 na presença de alumínio. Na ausência de alumínio, a Toropi foi mais eficiente na translocação de fósforo do que a CNT 8 na maior concentração do nutriente. Já, na presença de alumínio, a translocação de fósforo na Toropi foi maior nas duas concentrações deste nutriente (P) na solução. Na verdade, a presença de alumínio não influenciou na translocação de fósforo na Toropi, porém diminuiu na CNT 8 em ambas as condições de suprimento de fósforo. A eficiência de translocação de fósforo reflete a partição de fósforo nas raízes e parte aérea (Quadro 1).

A maior capacidade de translocação de fósforo da Toropi, em relação à CNT 8, foi observada por Abichequer & Bohnen (1998). Ocorreu maior retenção de fósforo nas raízes em condições de deficiência deste nutriente, priorizando o crescimento das raízes em relação à parte aérea, conforme observado em trigo (Miranda, 1985), em soja (Martinez et al., 1985) e em diversas espécies (Loneragam & Asher, 1967).

A variedade Toropi mostrou-se mais tolerante ao alumínio e eficiente ao uso de fósforo, em relação a outras variedades, inclusive à CNT 8 (Camargo et al., 1987; Ben, 1989; Abichequer & Bohnen, 1998). A sua alta eficiência na translocação de fósforo na presença de alumínio (Quadro 3) deve refletir sua capacidade de neutralizar o alumínio na raiz, ou fora dela, uma vez que o conteúdo de fósforo na raiz não foi afetado pelo alumínio, em ambos os níveis de fósforo (Cançado et al., 1999). Ao contrário, na CNT 8, o conteúdo de fósforo na raiz aumentou com a presença de alumínio, especialmente na maior concentração de fósforo (Quadro 1).

Quadro 3. Fósforo translocado para a parte aérea (percentagem do fósforo absorvido presente na parte aérea) de variedades de trigo submetidas a duas concentrações de fósforo, na ausência e presença de alumínio, em solução nutritiva

Variedade	Concentração de Al ($\mu\text{mol L}^{-1}$)			
	0,0		37,0	
	Concentração de P ($\mu\text{mol L}^{-1}$)			
	1,6	32,3	1,6	32,3
	%			
Toropi	73,3 aB	94,3 aA	74,8 aB	91,4 aA
CNT 8	71,6 aB	89,2 bA	67,9 bB	62,8 bA

Médias de variedades seguidas de mesma letra minúscula, dentro de cada concentração de fósforo e de alumínio, e médias de concentrações de fósforo, seguidas de mesma letra maiúscula, dentro de cada variedade e concentração de alumínio, não diferem pelo teste F ($P < 0,05$).

Assim, a sensibilidade desta variedade ao alumínio deve estar relacionada com a falta de um mecanismo de sua neutralização, evidenciada pelo encurtamento e engrossamento das raízes (Quadro 2) e pelo acúmulo de fósforo nas raízes (Quadro 1).

Tal fato também foi verificado por Vilela & Anghinoni (1984) em cultivares de soja, e, provavelmente, provocado pela formação de fosfato de alumínio (precipitado) e pela alta afinidade química entre os dois elementos. A avaliação da translocação de fósforo por variedades de trigo, por meio do exsudato xilemático (Alves et al., 1988), também mostrou redução de eficiência de translocação somente na mais sensível e na presença de alumínio, em concentração considerada tóxica.

Observa-se que, embora tenha havido redução na translocação de fósforo em variedades de trigo na presença de alumínio (Miranda, 1985), a variedade de trigo mais tolerante ao alumínio não foi mais eficiente na translocação de fósforo do que a sensível. Isto significa que as características de tolerância ao alumínio e de eficiência na translocação do fósforo podem ocorrer associadas, pois a presença de alumínio e a deficiência de fósforo são comuns em solos ácidos, mas são comandadas por mecanismos e genes diferenciados (Cançado et al., 1999).

Utilização de fósforo e produção de matéria seca

A eficiência de utilização de fósforo (Quadro 4) foi influenciada pela interação de cultivares e concentrações de alumínio, não sendo significativas as demais interações. Desta forma, enquanto as variedades apresentaram eficiência de utilização semelhante na ausência de alumínio, tal eficiência diminuiu para ambas as variedades na presença de alumínio, porém com maior efeito sobre a CNT 8.

No caso da produção de matéria seca total e da parte aérea, ocorreu interação tríplice significativa. A Toropi apresentou maior produção de matéria seca total e da parte aérea (Quadro 5) do que a CNT 8

Quadro 4. Eficiência de utilização de fósforo de variedades de trigo, na ausência e presença de alumínio, em solução nutritiva

Variedade	Concentração de Al (µmol L ⁻¹)	
	0,0	37,0
	— g ² de MS mg ⁻¹ de P —	
Toropi	0,195 aA	0,170 aA
CNT 8	0,203 aA	0,113 bB

Médias de variedades seguidas de mesma letra minúscula, dentro de cada concentração de alumínio, e médias de concentrações de alumínio, seguidas de mesma letra maiúscula, dentro de cada variedade, não diferem pelo teste F (P < 0,05).

Quadro 5. Matéria seca total e da parte aérea de duas variedades de trigo submetidas a duas concentrações de fósforo, na ausência ou presença de alumínio, em solução nutritiva

Variedade	Concentração de Al (µmol L ⁻¹)			
	0,0		37,0	
	Concentração de P (µmol L ⁻¹)			
	1,6	32,3	1,6	32,3
	MS total, g planta ⁻¹			
Toropi	0,248 aB	0,725 aA	0,210 aB	0,583 aA
CNT 8	0,249 aB	0,708 aA	0,176 aB	0,331 bA
	MS da parte aérea, g planta ⁻¹			
Toropi	0,173 aB	0,622 aA	0,150 aB	0,492 aA
CNT 8	0,151 aB	0,571 aA	0,125 aB	0,256 bA

Médias de variedades seguidas de mesma letra minúscula, dentro de cada concentração de fósforo e de alumínio, e médias de concentrações de fósforo, seguidas de mesma letra maiúscula, dentro de cada variedade e concentração de alumínio, não diferem pelo teste F (P < 0,05).

quando as variedades foram cultivadas na presença de alumínio e com 32,3 µmol L⁻¹ de fósforo, não havendo diferenças nos demais tratamentos. A eficiência no aproveitamento de fósforo pelas variedades de trigo, considerando o seu suprimento às raízes, está mais condicionada à eficiência de absorção e translocação do que à eficiência de utilização. Rosa & Camargo (1990) também obtiveram maior matéria seca na Toropi, em relação à CNT 8, em solo com teores tóxicos de alumínio.

CONCLUSÕES

1. As raízes da variedade de trigo Toropi foram menos afetadas do que as da CNT 8 pelo alumínio; no entanto, não houve relação da absorção de fósforo com o comprimento, raio médio e superfície do sistema radicular.

2. A presença de alumínio aumentou a diferença entre as variedades Toropi e CNT 8 quanto à eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo, com vantagem para a primeira, que é mais tolerante ao alumínio.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Prof. Luiz Carlos Federizzi, do Departamento de Plantas de Lavoura da Faculdade de Agronomia da UFRGS, pela orientação na escolha e fornecimento das sementes das variedades de trigo.

LITERATURA CITADA

- ABICHEQUER, A.D. & BOHNEN, H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. R. Bras. Ci. Solo, 22:21-26, 1998.
- 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. Agr. Bras., 23:563-573, 1988.
- BALIGAR, V.C. & FAGERIA, N.K. Plant nutrient efficiency: towards the second paradigm. In: SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A.E. & CARVALHO, J.G., eds. Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas. Viçosa: SBCS, Lavras: UFLA/DCS, 1999. 819p.
- BEN, J.R. Resposta diferencial de genótipos de trigo (*Triticum aestivum* L.) a fósforo no solo. Piracicaba, Universidade de São Paulo, 1989. 109p. (Tese de Doutorado)
- CANÇADO, G.M.A.; LOPES, M.A. & PAIVA, E. Genética e bioquímica da tolerância das plantas ao alumínio. In: SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A.E. & CARVALHO, J.G., eds. Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas. Viçosa: SBCS, Lavras: UFLA/DCS, 1999. 819p.
- CAMARGO, C.E.O.; FELÍCIO, J.C. & ROCHA JÚNIOR, L.S. Trigo: tolerância ao alumínio em solução nutritiva. Bragantia, 46:183-190, 1987.
- CLARKSON, D.T. Effect of aluminum on the uptake and on metabolism of phosphorus by barley seedlings. Plant Physiol., 41:165-172, 1966.
- FOY, C.D. Differential aluminum and manganese tolerances of plant species and varieties in acid soils. Ci. Cult., 28:150-155, 1976.
- FURLANI, P.R. & FURLANI, A.M.C. Tolerância a alumínio e eficiência a fósforo em milho e arroz: características independentes. Bragantia, 50:331-340, 1991.
- GERLOFF, G.C. & GABELMAN, W.H. Genetic basis of inorganic plant nutrition. In: LÄUCHLI, A. & BIELESKI, R.L., eds. Inorganic plant nutrition. New York, Springer-Verlag, 1983. p.453-480.
- LONERAGAN, J.F. & ASHER, C.J. Response of plants to phosphate concentration in solution culture: II. Rate of phosphate absorption and its relation to growth. Soil Sci., 103:311-318, 1967.
- MARTINEZ, H.E.P.; NOVAIS, R.F.; SACRAMENTO, L.V.S. & RODRIGUES, L.A. Comportamento de variedades de soja cultivadas sob diferentes concentrações de fósforo: II. Translocação do fósforo absorvido e eficiência nutricional. R. Bras. Ci. Solo, 17:239-244, 1993.
- MIRANDA, L.N. Aluminum-phosphate interactions in relation to wheat growth. Reading, University of Reading, 1985. 169p. (Tese de Doutorado)
- MURPHY, J. & RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Anal. Chem. Acta, 27:31-36, 1962.
- ROSA, O.S. & CAMARGO, C.E.O. Wheat breeding for better efficiency in phosphorus use. In: SAUNDERS, D.A., ed. Wheat for the nontraditional warm areas: a proceeding of the international conference. Foz do Iguaçu, United Nations Development Programme International Maize and Wheat Improvement Center, 1990. p.333-351.
- SHENK, M.K. & BARBER, S.A. Root characteristics of corn genotypes as related to P uptake. Agr. J., 48:921-924, 1979.
- SIDDIQI, M.Y. & GLASS, A.D.M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. J. Plant Nutr., 4:289-302, 1981.
- SOON, Y.K. Differential response of wheat genotypes to phosphorus in acid soils. J. Plant Nutr., 15:513-526, 1992.
- TENNANT, D. A test of a modified line intersect method of estimating root length. J. Ecol., 63:995-1000, 1975.
- VILELA, L. & ANGHINONI, I. Morfologia do sistema radicular e cinética da absorção de fósforo em cultivares de soja afetadas pela interação alumínio-fósforo. R. Bras. Ci. Solo, 8:91-96, 1984.