

## Técnica hidropônica para triagem de genótipos de tomateiro quanto à eficiência de absorção de fósforo

Ernani Clarete da Silva<sup>1</sup>; Wilson Roberto Maluf<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UFSJ Campus Sete Lagoas, C. Postal 56, 35701-970 Sete Lagoas-MG; clarete@ufsj.edu.br; <sup>2</sup>UFLA, Depto Agricultura, C. Postal 3037, 37200-000 Lavras-MG; wrmaluf@dag.ufla.br

### RESUMO

O fósforo (P) é um dos nutrientes mais limitantes ao crescimento e ao desenvolvimento das plantas, especialmente em solos ácidos das regiões tropicais e subtropicais. O objetivo deste trabalho foi estabelecer uma técnica, em solução nutritiva (hidroponia), de triagem de genótipos de tomateiro quanto à eficiência de absorção de fósforo. Utilizou-se uma área de 160 m<sup>2</sup> dentro de uma estrutura de proteção coberta com película de polietileno de 150 micra de espessura. Foram utilizados canais de cultivo de alvenaria com 20 cm de largura por 15 cm de altura espaçados de 0,80 m. O delineamento experimental foi em esquema de parcela subdividida com fatorial nas parcelas, com 4 repetições. Nas parcelas foram utilizadas duas concentrações de P na solução nutritiva (0,50 e 60 ppm) e, nas subparcelas, dois genótipos de tomateiro contrastantes quanto à eficiência de absorção de P [PI 121665 (eficiente, crt/crt) e TOM-598 (normal, crt<sup>+</sup>/crt<sup>+</sup>)]. Em um ensaio subsequente, os dois genótipos foram novamente cultivados em delineamento experimental inteiramente ao acaso com quatro repetições, na mesma estrutura, sob concentração de 0,20 ppm de P em solução nutritiva. Foram feitas as avaliações de massa fresca da parte aérea, massa seca da parte aérea, massa fresca da raiz, massa seca da raiz, comprimento, área e volume da raiz. Concluiu-se que a técnica hidropônica é eficiente para triar genótipos de tomateiro com resistência ou tolerância à deficiência de fósforo. A concentração de 0,50 ppm de P na solução nutritiva em sistema hidropônico NFT é adequada para esse fim.

**Palavras-chave:** *Solanum lycopersicum*, *Lycopersicon esculentum*, deficiência de fósforo, absorção.

### ABSTRACT

#### Hydroponic technique for screening of tomato genotypes for phosphorus uptake efficiency

Phosphorus (P) is the most limiting nutrient to plant growth and development in acidic soils of tropical and subtropical regions. The objective of this study was to establish a nutrient solution (hydroponics) technique for screening of tomato genotypes for efficiency of phosphorus absorption. An area of 160 m<sup>2</sup> within a protective structure covered with 150 micron polyethylene film was used, with masonry-built channels 20 cm wide x 15 cm in height spaced 0.80 m apart. The experimental setup was a split plot design with factorial treatments and four replications. Plots comprised two concentrations of P in nutrient solution (0.50 and 60 ppm), whereas subplots comprised two tomato genotypes with contrasting P absorption efficiencies [PI 121665 (efficient, crt/crt) and TOM-598 (crt<sup>+</sup>/crt<sup>+</sup>)]. After this test, the two genotypes were again grown in a completely randomized experimental design with four replications, under the same structure, under concentration of 0.20 ppm P in nutrient solution. We evaluated the fresh mass of aboveground part, dry mass of aboveground part, fresh mass of root, dry mass of root and length, area and volume from the root. The hydroponic technique was effective to screen tomato genotypes for resistance or tolerance to phosphorus deficiency. The concentration of 0.50 ppm P in nutrient solution in NFT hydroponic system was suitable for this purpose.

**Keywords:** *Solanum lycopersicum*, *Lycopersicon esculentum*, phosphorus deficiency, absorption.

(Recebido para publicação em 16 de fevereiro de 2011; aceito em 20 de março de 2012)  
(Received on February 16, 2011; accepted on March 20, 2012)

O fósforo (P) é um dos nutrientes mais limitantes ao crescimento e ao desenvolvimento das plantas, especialmente em solos ácidos das regiões tropicais e subtropicais. Segundo Batjes (1997) estima-se que 5,7 bilhões de hectares no mundo apresentam teores baixos de P disponível para a produção da maioria das culturas. Por outro lado, os solos possuem elevada capacidade de fixação desse nutriente, o que resulta em baixa eficiência da adubação fosfatada (Holford, 1997).

Embora o fósforo seja o macronutriente menos absorvido pelo tomateiro, é o nutriente que propicia respostas mais

expressivas em termos de aumento de produtividade (Barbosa, 1993). Produtividades máximas no tomateiro têm sido associadas a altas doses de fertilizantes, sendo frequentemente aplicadas doses que chegam a 1200 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por hectare (Filgueira *et al*, 1999). O aumento da eficiência na absorção de fósforo por parte do tomateiro pode propiciar uma sensível redução nas doses de fertilizantes fosfatados empregados, bem como, possivelmente, o aproveitamento mais imediato do P fixado na matriz do solo, com reflexos favoráveis no sentido da sustentabilidade agrícola, na renda líquida do produtor rural, no aprovei-

tamento de áreas marginais em termos de fertilidade de solo, e na economia de fertilizantes em nível nacional. Uma redução de apenas 100 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por hectare na utilização do nutriente pelo tomateiro representaria uma economia aproximada por hectare superior a R\$200,00, e, em nível de tomaticultura nacional, de mais de R\$ 11 milhões.

Há uma significativa variação genética inter e intraespecífica na habilidade das plantas em tolerar estresse de deficiência de fósforo - um caráter denominado eficiência no uso de fósforo (Lynch, 1995, 1998). Esta eficiência pode ser baseada na superior habilidade

em adquirir P do solo através de alterações na morfologia ou arquitetura das raízes, na exsudação de componentes mobilizadores de P, ou de alterações nos transportadores Pi da membrana plástica (Kochian *et al.*, 2004). Adicionalmente, pode envolver também menores quantidades requeridas de P em nível celular, ou uma remobilização mais eficiente de P dentro da planta (Yan *et al.*, 2001).

Segundo Lopes-Búcio *et al.* (2003), existem quatro processos responsáveis pela determinação da arquitetura de raiz: 1) divisão celular no meristema apical, responsável pelo crescimento indeterminado da raiz pela adição de novas células; 2) alongamento celular, principal processo responsável pelo crescimento; 3) formação de raízes laterais, que aumentam a capacidade de exploração do solo e 4) formação de pelos radiculares, que incrementam a superfície de contato solo-planta. Qualquer modificação em um desses processos pode causar expressivas alterações na arquitetura radicular e, conseqüentemente, modificar as relações da planta com o solo. As respostas arquitetônicas das raízes também dependem de características do nutriente limitante, como a sua mobilidade no solo (Hodge, 2004).

Jungle & Barber (1974) sugeriram que a absorção de fósforo por plantas de milho está estreitamente associada ao tamanho das raízes, e, embora haja discordância entre autores, já foi observado que a existência de pelos nas raízes de algumas espécies de plantas correlaciona-se positivamente com uma maior absorção de fósforo (Barley & Rovira, 1970; Itoh & Barber, 1983; Bole, 1973). Introduções de tomateiro com maior eficiência na absorção de fósforo têm sido identificadas. Hochmuth *et al.* (1985) identificaram, em triagem envolvendo mais de 200 acessos de tomateiro (*Solanum lycopersicon*), pelo menos duas introduções altamente eficientes na extração de P a partir de solução nutritiva pobre neste nutriente. Em uma destas introduções (PI 121665 = cultivar Globonnie), a eficiência na extração de fósforo estava associada a uma característica morfológica associada às raízes quando o acesso era cultivado em solução nutritiva com baixo teor de P. Esta característica, denominada

“cottony root”, mostrou-se de herança simples (um gene recessivo, denominado *crt*), e está associada a um grande número de radículas ou pelos radiculares, que podem ser observados em microscópio após coloração com carmim acético quando as plantas crescem em soluções com baixo teor (2 ppm) de P (Hochmuth *et al.*, 1985). Esta resposta não foi observada quando concentrações maiores de P (8 ppm) foram utilizadas (Hochmuth *et al.*, 1985).

A pesquisa sobre os mecanismos de eficiência no uso de P está nos estágios iniciais (Kochian *et al.*, 2004). A disponibilidade de germoplasma de tomateiro com eficiência na extração de fósforo associada a uma característica morfológica (grande número de radículas ou pelos radiculares quando cultivado sob baixos níveis de P), e a herança simples desta característica (controlada por um gene recessivo) (Hochmuth *et al.*, 1985), tornam esta espécie particularmente apropriada para o melhoramento genético visando à maior absorção de fósforo.

A padronização de uma técnica de seleção precoce para esta característica em solução nutritiva, associada à herança simples, poderá possibilitar uma ferramenta prática para a obtenção, por parte dos melhoristas, de cultivares de tomateiro mais eficientes na absorção de fósforo.

Assim, o objetivo deste trabalho foi estabelecer uma técnica, em solução nutritiva (hidroponia) de triagem de genótipos quanto à eficiência de absorção de fósforo.

## MATERIAL E MÉTODOS

Utilizou-se uma área de 160 m<sup>2</sup> dentro de uma estrutura de proteção coberta com película de polietileno de 150 micra de espessura, aditivada contra raios ultravioleta. Para esta etapa foram utilizados oito canais de cultivo de alvenaria com 20 cm de largura por 15 cm de profundidade, 18 m de comprimento espaçados de 0,80 m (Figura 1). O delineamento experimental foi em esquema de parcela subdividida com fatorial nas parcelas, com 4 repetições.

Nas parcelas foram utilizadas duas concentrações de P na solução nutritiva (0,50 e 60 ppm) e, nas subparcelas, dois

genótipos de tomateiro contrastantes quanto à eficiência de absorção de P [PI 121665 (eficiente, *crt/crt*) e TOM-598 (normal, *crt<sup>+</sup>/crt<sup>+</sup>*)]. A concentração de 60 ppm corresponde a uma das sugestões para uso em cultivo hidropônico normal do tomateiro (Moraes & Furlani, 1999), e 0,50 ppm corresponde a uma concentração deficiente em P, abaixo da utilizada por Hochmuth *et al.* (1985) em triagens de acessos de tomateiro para eficiência na absorção de P, que foi de 97 micromols P por 1,5 L de solução, ou seja, 2 ppm. Em época subsequente a esse ensaio, os dois genótipos foram novamente cultivados em delineamento experimental inteiramente ao acaso com quatro repetições, na mesma estrutura, sob concentração de 0,20 ppm de P. Em termos hidropônicos, considerou-se 5 L de água/planta (Moraes & Furlani, 1999) e o manejo da solução nutritiva conforme Postali *et al.* (2004) em sistema hidropônico NFT (*Nutrient Film Technique*).

Cada parcela foi composta de sete plantas espaçadas de 1 m dentro de cada canal de cultivo. O crescimento da parte aérea das plantas e das raízes foi monitorado semanalmente durante o desenvolvimento vegetativo correspondendo a um período de 80 dias após transferência para os canais de cultivo. As mudas foram produzidas em espuma fenólica obedecendo-se às recomendações de Moraes & Furlani (1999).

Foram avaliados a massa fresca da parte aérea, massa seca da parte aérea, massa fresca da raiz, massa seca da raiz e, comprimento, área e volume da raiz. Para a determinação do comprimento da raiz, duas plantas da parte central das fileiras de cada parcela foram retiradas dos canais tendo suas raízes acondicionadas separadamente em sacos plásticos contendo solução de etanol a 50% e armazenadas a 0°C conforme Böhm (1979). Com base numa amostra de 0,5 g, determinou-se o comprimento radicular total da planta, a partir do método de Tennant (1975), com base na seguinte equação:  $C = N \cdot fc$ , em que: C = Comprimento radicular; N = número de interseções; fc = fator de correção, variável conforme área dos quadrantes da grade (reticulado) utilizada. Neste caso, 1 cm<sup>2</sup> foi a área com fc de 0,7857

(Tennant, 1975). O raio médio das raízes foi determinado segundo Shenk & Barber (1979) pela fórmula:  $R = (mf/C\pi)^{0.5}$  em que: R= raio médio da raiz; mf = massa fresca da raiz; C = comprimento radicular;  $\pi = \pi$  (3,1416). Essa fórmula pressupõe que as raízes tenham forma cilíndrica e densidade de 1,0 g cm<sup>-3</sup> sendo (mf) a massa fresca.

A área (A) e o volume (V) de raízes foram calculados, respectivamente por meio das seguintes fórmulas (Shenk & Barber 1979):  $A = (2\pi R C)$ , em que: A= área da raiz;  $\pi = \pi$  (3,1416); R = raio médio da raiz; C= comprimento da raiz;  $V = (\pi R^2) C$ , em que: V = volume da raiz,  $\pi = \pi$  (3,1416); R = raio médio; C = comprimento da raiz.

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F e as médias comparadas pelo teste de Tukey com 5% de probabilidade utilizando-se o programa estatístico SISVAR (Ferreira, 2000).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com exceção do comprimento de raiz, para todas as demais características avaliadas, houve interação significativa entre concentrações de P e genótipos. Para o genótipo PI 121665, o comprimento da raiz permaneceu estável independentemente da concentração de fósforo na solução nutritiva, (Tabela 1), ao passo que o genótipo TOM-598 teve redução significativa quando cultivado em solução nutritiva deficiente em fósforo (0,50 ppm) (Tabela 2). Em plantas do genótipo PI 121665, ao se reduzir a concentração de P de 60 ppm para 0,50 ppm, houve aumento significativo dos parâmetros radiculares (massa fresca, raio médio, área e volume) (Tabela 1). O contrário aconteceu com as plantas do genótipo TOM-598 (Tabela 2), que tiveram essas características, com exceção do volume da raiz, reduzidas significativamente na menor concentração de P.

Quanto ao volume de raiz, o genótipo TOM-598 ficou praticamente estável nas duas concentrações de P, enquanto que PI 121665 praticamente teve o valor dobrado com a redução da concentração de P (Tabelas 1 e 2). A massa fresca da parte aérea de TOM-598 reduziu com o decréscimo da concentração de P,

**Tabela 1.** Parâmetros radiculares e de planta referente ao genótipo de tomateiro PI 121665 em sistema hidropônico NFT com solução nutritiva normal (60 ppm) e deficiente (0,50 ppm) em fósforo aos 80 dias do transplante (root and plant parameters related to the tomato cultivar PI 121665 in NFT hydroponic system with nutrient solutions deficient in phosphorus and normal, 80 days after transplantation). Lavras, UFLA, 2009.

Determinações	Concentração de fósforo (ppm)	
	0,50	60
Comprimento da raiz (m/planta)	70,75 a	77,75 a
Massa fresca da raiz (g/planta)	349,02 a	228,28 b
Massa seca da raiz (g/planta)	16,12 a	14,07 a
Raio médio da raiz (mm)	3,93 a	3,03 b
Área da raiz (cm <sup>2</sup> /planta)	1748,52 a	1481,73 b
Volume da raiz (cm <sup>3</sup> /planta)	0,68 a	0,37 b
Massa fresca parte aérea (g/planta)	374,10 a	360,62 a
Massa seca parte aérea (g/planta)	59,25 a	59,67 a

Médias seguidas por letras distintas na horizontal diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey (means followed by the same letter in the line do not differ among themselves, Tukey test, 5%).

enquanto PI 121665 permaneceu estável (Tabelas 1 e 2). A resposta diferenciada dos genótipos aos meios hidropônicos específicos (0,50 e 60 ppm de P), que caracteriza a interação significativa, pode ser explicada pela presença ou ausência do gene *crt*. Segundo Hochmuth *et al.* (1985), este gene se manifesta causando a produção de um grande número de radículas ou pelos radiculares quando as plantas são cultivadas em meio deficiente em P, o que pode explicar o aumento significativo nos valores de parâmetros radiculares do genótipo PI 121665. Marques *et al.* (2007) estudaram a expressão fenotípica do gene *crt* nesses mesmos genótipos conduzidos em solução nutritiva com 2,0 ppm de P. As plantas de ambos os genótipos apresentaram raízes normais sem sintomas de deficiência de P nas folhas. Concluíram que, provavelmente, a redução de P para 2,0 ppm não tenha sido suficientemente rigorosa para provocar a expressão do gene *crt*. Hochmuth *et al.* (1985) observaram marcantes aumentos no sistema radicular de PI 121665 à concentração de 2 ppm de P, mas não fazem referências sobre possíveis sintomas de deficiência de P nas folhas em nenhum dos dois genótipos utilizados. Shenk & Barber (1979), avaliando os parâmetros morfológicos radiculares em milho, considerando a disponibilidade de P, 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 para aumentar a eficiência na absorção (Barber, 1995). Para o genótipo TOM-598, observou-se que as plantas se desenvolveram normalmente apenas com a solução nutritiva contendo a concentração adequada de P (60 ppm) (Tabela 1). Sob 0,50 ppm P, TOM-598 manifestou sintomas de deficiência do nutriente nas folhas (manchas escuras), reduções na massa seca, massa fresca, raio médio e volume de raízes (Tabela 2), ao contrário do que aconteceu com o genótipo PI 121665 (Tabela 2), que apresentou aumento.

A estabilidade da massa seca e massa fresca da parte aérea do genótipo PI 121665 nas duas concentrações de P (Tabela 1) revelam provável estratégia da planta para absorver P mesmo em meio deficiente, o que não aconteceu com o genótipo TOM-598. Para TOM-598, em meio deficiente em P (0,50 ppm), estas variáveis foram significativamente menores, indicando que não houve uma nutrição adequada da planta (Tabela 2) o que pôde ser observado visualmente em plantas de tamanho reduzido.

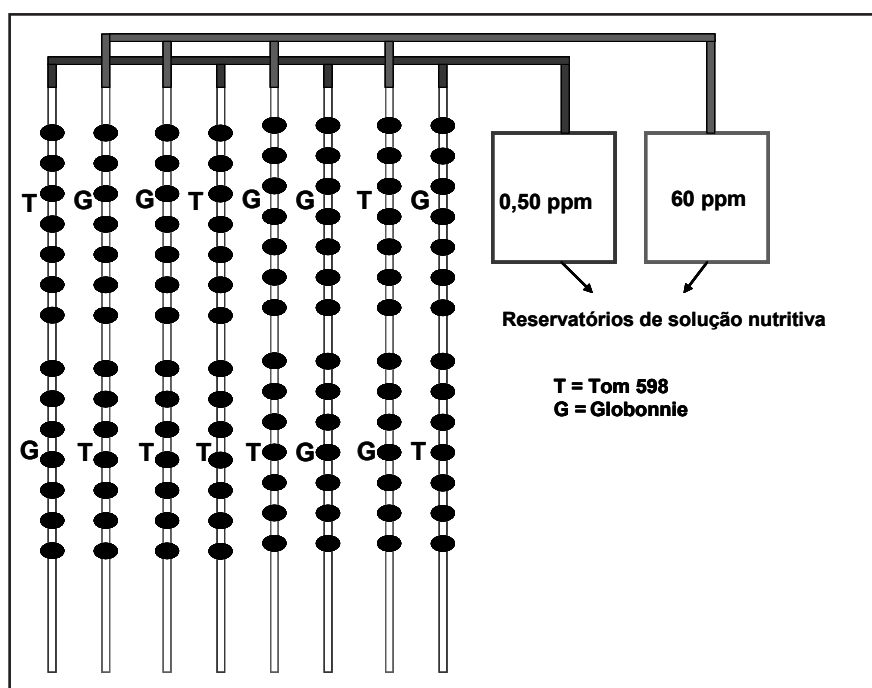
Segundo Ernani *et al.* (1994), a absorção de nutrientes é proporcional ao volume de solo ocupado pelas raízes. A exploração de um grande volume de solo pelas raízes é importante, principalmente, para a absorção dos nutrientes que se



**Tabela 2.** Parâmetros radiculares e de planta referentes ao genótipo de tomateiro TOM-598 em sistema hidropônico NFT com solução nutritiva normal (60 ppm) e deficiente (0,50 ppm) em fósforo aos 80 dias do transplante (root and plant parameters related to the tomato cultivar TOM-598 in NFT hydroponic system with nutrient solutions deficient in phosphorus and normal, 80 days after transplantation). Lavras, UFLA, 2009.

Determinações	Concentração de fósforo (ppm)	
	0,50	60
Comprimento da raiz (m/planta)	64,75 b	76,50 a
Massa fresca da raiz (g/planta)	274,89 b	367,62 a
Massa seca da raiz (g/planta)	11,71 b	19,77 a
Raio médio da raiz (mm)	3,65 b	3,93 a
Área da raiz (cm <sup>2</sup> /planta)	1486,02 b	1867,66 a
Volume da raiz (cm <sup>3</sup> /planta)	0,65 a	0,61 a
Massa fresca parte aérea (g/planta)	200,50 b	368,50 a
Massa seca parte aérea (g/planta)	27,12 b	61,12 a

Médias seguidas por letras distintas na horizontal diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey (means followed by the same letter in the line do not differ among themselves, Tukey test, 5%).



**Figura 1.** Esquema da área experimental (layout of the experimental area). Lavras, UFLA, 2009.

deslocam pelo mecanismo de difusão (Vilela & Anghinoni, 1984). O maior volume de raiz, a maior área ocupada bem como o maior raio médio obtidos com as plantas PI 121665, conduzidas em solução deficiente em fósforo, provavelmente, tenham sido responsáveis pelo melhor aproveitamento do P, o qual estava deficiente na solução nutritiva.

Em meio hidropônico de concentração de P normal (60 ppm), os parâmetros radiculares (massa seca, massa fresca,

raio médio, área e volume) referentes ao genótipo TOM-598 foram substancialmente maiores que em PI 121665 (Tabelas 1 e 2). Provavelmente estas diferenças sejam devidas exclusivamente aos diferentes *backgrounds* genotípicos das linhagens, já que o meio hidropônico era o mesmo.

As plantas conduzidas posteriormente em solução nutritiva com 0,20 ppm de fósforo, tanto do genótipo TOM-598 quanto do genótipo PI 121665,

não se desenvolveram, permanecendo enfezadas, com folhas cloróticas, com emissão escassa de raízes, não fornecendo material adequado para as análises estatísticas. Isso indica que o limite de tolerância à deficiência de P em PI 121665 é uma concentração superior a 0,20 ppm, e deve situar-se entre os valores de 0,20 e 0,50 ppm de P.

A técnica hidropônica foi eficiente para triar genótipos de tomateiro com resistência ou tolerância à deficiência de fósforo. A concentração de 0,50 ppm de P na solução nutritiva em sistema hidropônico NFT é adequada para esse fim.

O maior crescimento de raízes induzido pela deficiência de P, similar ao observado para tomate, tem sido considerado um mecanismo adaptativo de plantas a este estresse, descrito para espécies como *Arabidopsis* (Ma *et al.*, 2003), cevada (Steingrobe *et al.*, 2001), e arroz (He *et al.*, 2003; Kirk & Du, 1997; Shimizu *et al.*, 2008; Wissuwa *et al.*, 2005). Em tomate, a herança monogênica deste caráter (Hochmuth *et al.*, 1985) e a técnica de seleção em solução nutritiva com 0,50 ppm de P descrita poderão levar à rápida introdução desta característica em cultivares comerciais.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela concessão de bolsa pós-doutorado sênior ao primeiro autor, bem como pelo suporte financeiro ao projeto. À FAPEMIG, CAPES/MEC, FAEPE/UFLA e HortiAgro Sementes Ltda, pelo apoio ao programa de melhoramento genético de hortaliças da Universidade Federal de Lavras.

## REFERÊNCIAS

- BARBER SA. 1995. *Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach*. New York: John Wiley & Sons. 414p.
- BARLEY KP; ROVIRA AD. 1970. The influence of root hairs on the uptake of phosphate. *Soil Science and Plant Analysis* 5: 287-292.
- BATJES NH. 1997. A world data set of derived soil properties by FAO-UNESCO soil unit or global modeling. *Soil Use Manage* 13: 9-16.
- BÖHM W. 1979. Methods of studying root systems. In: DURHAM WDB; ATHENS FG; WÜRZBURG OLL.; OAK RIDGE JSO. (eds). *Ecological Studies: analysis and synthesis*.

- Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. Brühlsche Universitätsdruckerei. 188 p.
- BOLE JB. 1973. Influence of root hairs in supplying soil phosphorus to wheat. *Canadian Journal of Soil Science* 53: 169-175.
- ERNANI PR; SANTOS JCP; KAMINSKI J; RHEINHEIMER D. 1994. Prediction of phosphorus uptake by a mechanistic model in a low phosphorus highly weathered soil as affected by mycorrhizae inoculation. *Journal of Plant Nutrition* 17:1067-1078.
- FERREIRA PV. 2000. *Estatística experimental aplicada à agronomia*. Maceió: EDFAL. 422p.
- FILGUEIRA FAR; OBEID PC; MARAIS HJ; SANTOS WV; FONTES RR. 1999. Tomate tutorado. In: RIBEIRO AC; GUIMARÃES PTG; AVAREZ V; VH (eds). *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais-5ª Aproximação*. Viçosa: CFSEMG, p.207-208.
- HE Y; LIAN H; YAN X. 2003. Localized supply of phosphorus induces root morphological and architectural changes of rice in split and stratified soil cultures. *Plant and Soil* 248:247-256
- HOCHMUTH GJ; GABELMAN WH; GERLOFF GC. 1985. A gene affecting tomato root morphology. *HortScience* 20: 1099-1101.
- HODGE A. 2004. The plastic plant: Root responses to heterogeneous supplies of nutrients. *New Phytologist* 162: 9-24.
- HOLFORD ICR. 1997. Soil phosphorus: Its measurement, and its uptake by plants. *Australian Journal of Soil Research* 35: 227- 239.
- ITOH S; BARBER SA. 1983. Phosphorus uptake by six plant species as related to root hairs. *Agronomy Journal* 75: 457-461.
- JUNGLE A; BARBER SA. 1974. Phosphate uptake of corn roots as related to the proportion of the roots exposed to phosphate. *Agronomy Journal* 66: 554-557.
- KIRK GJD; DU LV. 1997. Changes in rice root architecture; porosity; and oxygen and proton release under phosphorus deficiency. *New Phytologist* 135:191-200
- KOCHIAN LV; HOEKENGA OA; PIÑEROS MA. 2004. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of Aluminum tolerance and Phosphorus efficiency. *Annual Review of Plant Biology* 55:459-93.
- LÓPEZ-BUCIO J; CRUZ-RAMIREZ A; HERRERA-ESTRELLA L. 2003. The role of nutrient availability in regulating root architecture. *Current Opinion in Plant Biology* 6: 280-287.
- LYNCH J. 1998. The role of nutrient efficient crops in modern agriculture. *Journal of Crop Production* 1: 241-64.
- LYNCH J. Root architecture and plant productivity. 1995. *Plant Physiology* 109: 7-13.
- MA Z; BASKIN TI; BROWN KM; LYNCH JP. 2003. Regulation of root elongation under phosphorus stress involves changes in ethylene responsiveness. *Plant Physiologist* 131: 1381-1390
- MARQUES DJ; SILVA EC; MORAES LFR; CAETANO E; SILVA RA; ARAUJO TH; ABREU VM; MACIEL GM. 2007. Introgressão e caracterização de gene de resistência a deficiência de fósforo em tomateiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MELHORAMENTO DE PLANTAS, IV. *Resumos...*São Lourenço: ABMP (CD-ROM).
- MORAES CAG; FURLANI PR. 1999. Cultivo de hortaliças de frutos em hidroponia em ambiente protegido. *Informe Agropecuário* 20: 105-113.
- POSTALI LGB; SILVA EC; MACIEL GM. 2004. Produção de híbridos comerciais de tomateiro do grupo cereja cultivados no sistema hidropônico e conduzidos com diferentes números de hastes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA 44. *Resumos...*Campos Grande: SOB (CD-ROM).
- SHENK MK; BARBER SA. 1979. *Soil Science Society of America Journal* 43: 880-883. Phosphate uptake by corn as affected by soil characteristics and root morphology.
- SHIMIZU A; KATO K; KOMATSU A; MOTOMURA K; IKEHASHI H. 2008. Genetic analysis of root elongation induced by phosphorus deficiency in rice (*Oryza sativa* L.): Fine QTL mapping and multivariate analysis of related traits. *Theor Appl Genet* 117: 987-996.
- STEINGROBE B; SCHMID H; CLAASSEN N. 2001. Root production and root mortality of winter barley and its implication with regard to phosphate acquisition. *Plant and Soil* 237: 239-248
- TENNANT D. 1975. A test of a modified line intercept method of estimating root length. *Journal of Applied Ecology* 63: 995-1001.
- VILELA L; ANGHINONI I. 1984. Morfologia do sistema radicular e cinética da absorção de fósforo em cultivares de soja afetados pela interação alumínio-fósforo. *Revista Brasileira da Ciência do Solo* 8: 91-96.
- WISSUWA M; GAMAT G; ISMAIL AM. 2005. Is root growth under phosphorus deficiency affected by source or sink limitations? *Journal of Exp Botany* 56: 1943-1950.
- YAN XL; LIAO H; TRULL MC; BEEBE SE; LYNCH JP. 2001. Induction of a major leaf acid phosphatase does not confer adaptation to low phosphorus availability in common bean. *Plant Physiology*. 125: 1901-1911.