

SEÇÃO II - QUÍMICA E MINERALOGIA DO SOLO

FLUXO DIFUSIVO DE FERRO EM SOLOS SOB INFLUÊNCIA DE DOSES DE FÓSFORO E DE NÍVEIS DE ACIDEZ E UMIDADE⁽¹⁾

F. N. NUNES⁽²⁾, R. F. NOVAIS⁽³⁾, I. R. SILVA⁽³⁾,
F. O. GEBRIM⁽²⁾ & J. F. B. SÃO JOSÉ⁽⁴⁾

RESUMO

A deficiência de Fe em plantas de café cultivadas em Latossolos ricos em Fe pode ser causada por condições que afetam o transporte deste nutriente no solo, como teores de P, valores de pH elevados e déficit hídrico no solo. O fluxo difusivo do Fe (FFe) em solos foi avaliado como variável de doses de P e de níveis de acidez e umidade. Para isso, amostras superficiais de dois solos, um Latossolo Vermelho distroférico típico A moderado textura muito argilosa e um Latossolo Vermelho-Amarelo distroférico A moderado textura média, receberam 20 mg dm⁻³ de Fe na forma de FeSO₄ e, posteriormente, foram submetidas aos tratamentos: sem ou com calagem (para V = 60 %), sem ou com P (500 mg dm⁻³, na forma de NH₄H₂PO₄) e três níveis de umidade correspondentes aos potenciais: -0,01, -0,04 e -0,1 MPa, constituindo um fatorial 2 × 2 × 2 × 3, com três repetições distribuídas em blocos inteiramente casualizados. Para a determinação do FFe foram montadas câmaras de difusão que receberam uma lâmina de resina de troca catiônica como dreno de Fe. O Fe total adsorvido às lâminas foi extraído após 10 dias de contato com os solos, estimando-se o FFe. Os resultados mostraram que, em ambos os solos, o FFe mostrou-se altamente dependente da umidade e da acidez do solo (calagem) e que, no Latossolo Vermelho distroférico, foi muito influenciado pela adição de P. O FFe aumentou com a umidade e com a acidez do solo, mas diminuiu com a adição de P no solo mais argiloso, possivelmente pela formação de compostos Fe-P insolúveis neste solo.

Termos de indexação: déficit hídrico, transporte, calagem, Latossolo.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em maio de 2003 e aprovado em março de 2004.

⁽²⁾ Mestrando em Solos e Nutrição de Plantas pelo Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa – UFV. Avenida P.H. Rolfs s/n., CEP 36571-000 Viçosa (MG). E-mails: flancernovais@bol.com.br; fgebrim@bol.com.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos, UFV. E-mail: rfnovais@ufv.br; irsilva@solos.ufv.br

⁽⁴⁾ Estudante de Iniciação Científica, Departamento de Solos, UFV. E-mail: brilhatt@yahoo.com.br

SUMMARY: *DIFFUSIVE FLUX OF IRON IN SOILS INFLUENCED BY PHOSPHORUS RATES AND LEVELS OF ACIDITY AND MOISTURE*

Iron deficiency in coffee plants cultivated in ferric Latosols may be induced by conditions that affect the transport of this nutrient in soils, such as P concentration, high pH values and low soil moisture content. The iron diffusive flux (FeF) in soils was evaluated as a function of P rates and levels of acidity and moisture. Surface soil samples of a clayey dystroferric Red Latosol and a loamy-sand dystroferric Yellow Red Latosol were supplied with 20 mg dm⁻³ Fe as FeSO₄, and then submitted to the following treatments: absence and presence of liming (60 % of base saturation), absence and presence of P fertilization (500 mg dm⁻³ as NH₄H₂PO₄) and three moisture levels, corresponding to water potentials of -0.01, -0.04, and -0.1 MPa. Treatments were arranged in a 2 × 2 × 2 × 3 factorial combination, in a complete randomized block design, with three replications. To determine FeF, diffusion chambers were assembled. Each chamber with treated soil received a strip of cation exchange resin that acts as a Fe sink. After 10 days of soil contact, the total Fe adsorbed by the resin strip was extracted and the FeF estimated. Results showed that the FeF was highly dependent on soil moisture and acidity (liming) in both soils and in the clayey ferric Red Latosol it was also greatly influenced by P addition. The FeF increased with soil moisture and acidity, but decreased with P addition in the clayey soil, possibly due to the formation of insoluble Fe-P compounds in this soil.

Index terms: water deficit, transport, liming, Latosol.

INTRODUÇÃO

A alta concentração foliar de P em lavouras de café, como consequência de fertilizações pesadas com este nutriente, ao longo dos anos, pode estar causando precipitação interna de Fe, diminuindo a concentração ativa deste micronutriente na planta, o que seria responsável pelo aparecimento de sintomas foliares típicos de deficiência de Fe, mesmo em lavouras estabelecidas em Latossolos ricos em Fe e ácidos. Esses sintomas de deficiência de Fe foram observados em lavouras adultas em condições em que a concentração foliar de P encontrava-se acima de 2 g kg⁻¹, e a concentração de Fe total na planta (folhas superiores) superior a 200-300 mg kg⁻¹⁽⁵⁾. Portanto, a concentração total de Fe não seria um indicativo de deficiência deste elemento nas plantas.

Por outro lado, em trabalho realizado por Nunes et al. (2002), observou-se que os teores foliares de P em lavouras adultas de café, cultivadas em Latossolo Vermelho férrico, com alto P-disponível (80 mg dm⁻³ pelo Mehlich-1) e ácido (pH-H₂O = 4,6), encontravam-se em torno de 1,5 g kg⁻¹ em folhas com ou sem sintomas de deficiência visual de Fe. Portanto, o teor de P foliar não poderia ser responsabilizado por uma possível inativação do Fe interno na planta, como indicado em outros trabalhos (Biddulph & Woodbridge, 1952; Brown, 1956; Menard, 1956; Brown et al., 1959; Price, 1968; Mengel & Kirkby,

1982; Lindsay, 1984; Hue et al., 1988; Hue & Nakamura, 1988; Lindsay, 1991; Koseoglu, 1995; Marrocos, 1997; Kudachikar et al., 1997; Isaakidis et al., 2002).

Embora diversos pesquisadores considerem pequena a possibilidade de deficiência de Fe em plantas cultivada em Latossolos ácidos (Cox, 1973; Lopes, 1983), parece que a realidade não é, necessariamente, esta. Por outro lado, a severa deficiência de Fe em plantas de café observada em regiões com Latossolos ricos em Fe e ácidos pode estar ligada a períodos de déficit hídrico que causam forte restrição ao fluxo difusivo de Fe (FFe) no solo, situação que seria agravada com a correção da acidez e adição de grandes doses de fertilizantes fosfatados aos solos.

Elementos com grande afinidade para com a fase sólida do solo têm na difusão ou fluxo difusivo o mecanismo de transporte predominante (Barber, 1995; Novais & Smyth, 1999). O fluxo difusivo de um nutriente em solos é expresso pela Lei de Fick (Nye & Tinker, 1977; Barber, 1995; Novais & Smyth, 1999):

$$F = -DA \frac{\delta c}{\delta x} \quad (1)$$

em que D é o coeficiente de difusão do elemento em cm² s⁻¹; F é o fluxo difusivo do elemento, em moles s⁻¹, através de uma superfície de área A, em cm², causado pelo decréscimo de sua concentração (δc), em moles cm⁻³, com o aumento da distância de transporte (δx), em cm; sendo δc/δx o

⁽⁵⁾ R.F. Novais (comunicação pessoal).

gradiente de concentração ao longo da trajetória de transporte do nutriente; o sinal negativo da equação advém do decréscimo do δc com o aumento de δx . O coeficiente de difusão (D) é estimado pela equação:

$$D = D_1 \theta f \frac{\delta I}{\delta Q} \quad (2)$$

em que D_1 é o coeficiente de difusão do elemento em água, constante para cada elemento, em $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$; θ é o conteúdo de água no solo, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; f é o fator de impedância, adimensional, e $\delta I/\delta Q$ é a variação do fator intensidade (I) do elemento na solução do solo em relação ao fator quantidade (Q) do elemento na forma trocável ou lábil, em equilíbrio com I. O valor de $\delta I/\delta Q$ é o inverso do fator capacidade (poder tampão) do elemento no solo.

Estudos que envolvem diferentes variáveis sobre o FFe em solos são encontrados na literatura, tais como: acidez (Rattan & Deb, 1981; Kirk et al., 1990), adição de P (Rattan & Deb, 1981) e umidade (Sem & Deb, 1977, 1983; Rattan & Deb, 1981), além de outros estudos que discutem sobre o efeito de quelantes (O'Connor et al., 1971; O'Connor et al., 1975; Reid et al., 1985; Erich et al., 1987; Sem & Deb, 1983; Kirk et al., 1990; Ahmad & Nye, 1990).

Semelhantemente ao que ocorre com o transporte de Fe na solução do solo, a correção da acidez de solos que receberam doses crescentes de Zn causou drástica diminuição do fluxo difusivo deste elemento (Oliveira et al., 1999) e de Al (Oliveira et al., 2000). De acordo com Nye & Tynker (1977), o fluxo difusivo de elementos como o P aproxima-se de zero nos solos mais secos. Portanto, a relação direta entre o conteúdo volumétrico de água e o coeficiente de difusão (Eq. 2) indica que o aumento da umidade do solo causa maior fluxo difusivo de elementos no solo (Nye & Tynker, 1977; Barber 1995, Novais & Smyth, 1999). Efeitos positivos de maior teor de água do solo sobre maior fluxo difusivo de P (Villani et al., 1993a,b) e de Al (Oliveira et al., 2000) foram encontrados.

O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da adição de P, da correção da acidez do solo e de níveis de umidade sobre o fluxo difusivo de Fe em dois solos com diferentes teores de argila.

MATERIAL E MÉTODOS

Amostras superficiais (0-20 cm) de dois solos, um Latossolo Vermelho distroférico típico A moderado muito argiloso de Sete Lagoas-MG (SL) e um Latossolo Vermelho-Amarelo distroférico típico A moderado textura média de João Pinheiro-MG (JP), ambos fase cerrado tropical subcaducifólio, foram passadas em peneira de 2 mm de malha, homogeneizadas e submetidas à análise química e textural. Determinaram-se o pH em água na relação solo-água de 1:2,5, P, K, Fe, Zn, Cu, e Mn extraídos pelo Mehlich-1 e Ca, Mg e Al trocáveis pelo KCl 1 mol L^{-1} (EMBRAPA, 1997). Os teores de Fe total dos solos foram determinados conforme método sugerido por Lim & Jackson (1982) (Quadro 1).

Metade de cada amostra de solo recebeu uma mistura de CaCO_3 e MgCO_3 na relação molar de 4:1, em dose necessária à elevação da saturação por bases a 60 %. As amostras dos solos sem ou com calcário, em sacolas plásticas, tiveram a umidade elevada à capacidade de campo e deixadas em equilíbrio por 15 dias. Depois deste período, foram secas ao ar e homogeneizadas.

Essas amostras de solo, sem ou com calcário, receberam uma dose de 20 mg dm^{-3} de Fe, na forma de FeSO_4 , e duas doses de P, correspondentes a 0 ou 500 mg dm^{-3} de P, na forma de $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ em solução, uniformemente homogeneizadas com o volume de solo. As amostras de solo com Fe e sem ou com P, em sacolas plásticas, tiveram a umidade elevada à capacidade de campo e foram deixadas em equilíbrio por dez dias, quando foram secas ao ar e novamente homogeneizadas.

Finalmente, as amostras submetidas aos tratamentos com ou sem calcário e com ou sem P receberam três níveis de umidade, correspondentes aos potenciais: -0,01, -0,04 e -0,1 MPa.

Imediatamente antes da determinação do fluxo difusivo de Fe (FFe), repetiram-se as determinações de pH, P e Fe pelo Mehlich-1, e de Ca e Mg trocáveis dos solos de cada tratamento (Quadro 2), à semelhança da caracterização dos solos feita inicialmente (Quadro 1).

Para a determinação do FFe, foram utilizadas lâminas de resina de troca catiônica, IONICS

Quadro 1. Características químicas de amostras dos solos de João Pinheiro (JP) e Sete Lagoas (SL) antes da aplicação dos tratamentos

Solo	pH H ₂ O	P	K	Fe	Mn	Zn	Cu	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	Fe total	Areia	Silte	Argila
		mg dm ⁻³						cmol _c dm ⁻³			g kg ⁻¹			
JP	4,70	1,0	40,1	13,7	2,6	0,28	0,60	0,10	0,20	1,08	73,4	640	70	290
SL	4,55	1,4	11,0	14,8	2,6	0,91	1,08	0,14	0,02	1,18	134,0	130	140	730

Quadro 2. Características químicas de amostras dos solos de João Pinheiro e Sete Lagoas após a aplicação dos tratamentos

Tratamento	pH H ₂ O	P	— mg dm ⁻³ —		Mg ²⁺
			Fe ⁽¹⁾	Ca ²⁺	
João Pinheiro					
Testemunha	4,81	0,7	52	0,23	0,35
+ P ⁽²⁾	5,20	302,0	48	0,14	0,30
+ P + Cal. ⁽³⁾	6,48	281,0	41	2,32	0,91
+ Cal. ⁽⁴⁾	6,89	1,2	46	2,47	0,84
Sete Lagoas					
Testemunha	4,82	0,8	36	0,27	0,09
+ P ⁽²⁾	5,30	111,0	38	0,22	0,08
+ P + Cal. ⁽³⁾	6,04	118,0	35	3,82	1,50
+ Cal. ⁽⁴⁾	6,44	1,2	35	3,93	0,98

(¹) Adição de Fe (20 mg dm⁻³) aos solos, para todos tratamentos. (²) Adição de 500 mg dm⁻³ de P. (³) Adição de 500 mg dm⁻³ de P + calagem para V % = 60. (⁴) Calagem para V % = 60.

CR61CZR-442, com 20 cm² de superfície (ambas as faces), como dreno para o Fe difundido. Essas lâminas foram pré-condicionadas, saturando-as com uma solução de NaHCO₃ 1 mol L⁻¹, conforme Raij et al. (1987).

Foram preparadas câmaras de difusão com anéis de tubo de PVC com 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura, com capacidade para 393 cm³ de solo. A base de cada anel foi vedada com uma chapa de isopor de 2 cm de espessura. Uma lâmina de resina foi colocada entre duas camadas de solo de 2,5 cm de espessura em cada câmara. O volume de água correspondente a cada potencial testado foi colocado em cada câmara e esta foi então envolta por um saco plástico para evitar perdas de água por evaporação.

As lâminas de resina permaneceram nas câmaras por dez dias a 25 ± 1 °C, quando foram então retiradas, lavadas com água destilada e o Fe extraído das lâminas pela agitação a 200 rpm por 1 h, com 50 mL de uma solução com NH₄Cl 0,8 mol L⁻¹ e HCl 0,2 mol L⁻¹, conforme Raij et al. (1987). O Fe extraído foi determinado por espectrofotometria de absorção atômica e expresso em μmol cm⁻²/10 dias, constituindo o FFe. Portanto, o FFe foi avaliado quanto à influência de solo (argiloso e textura média), correção da acidez (duas doses de calcário), disponibilidade de P (duas doses) e níveis de umidade (três). Os tratamentos constituíram um fatorial 2 × 2 × 2 × 3, em três repetições distribuídas em blocos inteiramente casualizados. Os resultados foram submetidos à análise de variância e ao teste de médias de Tukey.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise química de amostras dos solos, depois de submetidas ao tratamento com P (+ P), mostrou

que os teores de P e Fe extraídos pelo Mehlich-1, para o solo SL, foram, respectivamente, de 2,72 e 1,26 vezes mais baixos que no solo JP (Quadro 2), solo com menor fator capacidade ($\delta Q/\delta I$) e, portanto, maior ($\delta I/\delta Q$) (Eq. 2), dado seu teor de argila menor (Quadro 1).

O fluxo difusivo de Fe (FFe) nos solos decresceu significativamente ($p < 0,01$), com a diminuição do nível de umidade, com o aumento do pH do solo (calagem) e, para o SL, também com a adição de P (Quadro 3). O efeito da diminuição da umidade do solo sobre o FFe, tornando-o menor, foi, de modo geral, consistente. A relação direta entre coeficiente de difusão (D) e o conteúdo de água no solo (θ) (Eq. 2) e entre D e F (Eq. 1) explica esse resultado. Tem sido observado que o fluxo difusivo de P decresce drasticamente com a redução do conteúdo volumétrico de água (Nye & Tinker, 1977; Ruiz et al., 1988; Barber, 1995; Novais & Smyth, 1999), particularmente em solos mais argilosos e oxidícos (menor $\delta I/\delta Q$ - Eq. 2) (Villani et al., 1990; 1993a,b). A umidade pode também influenciar a partição de íons entre as fases (líquida e sólida) (Rowell et al., 1967), aumentando-a, e assim, aumentando $\delta I/\delta Q$ e, conseqüentemente, o valor de D (Eq. 2).

A adição de P e de calagem também promoveu, de modo geral, efeitos determinantes sobre FFe (interação significativa a 1 %), fortemente ligados às alterações de pH dos solos por estes tratamentos (Quadro 2). Embora a aplicação de P no solo SL, na ausência de calagem, tenha causado, de modo geral, expressiva diminuição do FFe, para todos os níveis de umidade, esse efeito foi o inverso, quando na presença de calagem, aumentando o FFe. A razão para esta inversão do efeito do P parece estar ligada às alterações de pH do solo ocasionadas pela aplicação deste tratamento: o tratamento + P causou aumento do pH em relação à testemunha, mas diminuição em relação ao tratamento com calagem (+ P + Cal) (Quadro 2). Todavia, no JP, solo menos tamponado, o esperado efeito negativo de P sobre FFe, constituído pelo aumento do pH em relação à testemunha e pela precipitação de Fe em solução pela maior concentração de P na solução deste solo, não foi verificado (Quadro 3). Talvez ele tenha sido compensado pela provável difusão de Fe facilitada pelo maior fluxo difusivo de P, como ânion acompanhante de Fe neste solo, dados seus prováveis maiores valores de $\delta I/\delta Q$, para ambos os elementos (Eq. 2), que no SL.

Como média para níveis de umidade, o FFe para o tratamento (+ P + Cal) no solo SL foi 2,71 vezes menor que para o tratamento + Cal apenas (Quadro 3). O menor pH para o tratamento + P + Cal (6,04) em relação ao + Cal (6,44) (Quadro 2) explica, pelo menos em parte, este resultado. Por outro lado, alguma contribuição do fosfato, como ânion acompanhante do Fe aumentando sua difusão,

Quadro 3. Fluxo difusivo de ferro no solo de João Pinheiro (textura média) e de Sete Lagoas (argiloso) como variável de níveis de umidade e doses de fósforo e de calcário

Potencial hídrico (Ψ)	Testemunha	+ P	Média	+ Cal	+ P + Cal	Média	Média (Ψ)
$\mu\text{mol cm}^{-2}/10$ dias							
João Pinheiro							
-0,01 MPa	4,17 Aa α	3,59 Aa α	3,88	1,83 Aa β	2,04 Aa β	1,94	2,91
-0,04 MPa	3,03 Ab α	2,88 Aab α	2,96	1,74 Aa β	1,26 Ab β	1,50	2,23
-0,10 MPa	2,02 Ac α	2,35 Ab α	2,19	1,55 Aa α	0,92 Bb β	1,24	1,78
Média	3,07	2,94	3,01	1,71	1,41	1,56	2,28
Sete Lagoas							
-0,01 MPa	6,15 Aa α	2,62 Aa α	4,39	0,81 Ba β	2,10 Aa β	1,46	2,92
-0,04 MPa	4,00 Ab α	2,11 Bb α	3,06	0,59 Ba β	1,74 Aa α	1,17	2,11
-0,10 MPa	2,77 Ac α	1,28 Bc α	2,03	0,47 Ba β	1,21 Ab α	0,84	1,43
Média	4,31	2,00	3,16	0,62	1,68	1,15	2,15

Valores seguidos pela mesma letra maiúscula na linha (dentro da dose de calagem, efeito de P), minúscula na coluna (dentro de solo, efeito umidade) e pela mesma letra grega na mesma linha, para a comparação do efeito de calagem, dentro dos tratamentos sem e com P, respectivamente, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

pode ter ocorrido, como também ocorre quando fosfato é acompanhado por cátions com maior mobilidade no solo (Villani et al., 1993a).

Considerando a média dos níveis de umidade, o maior FFe para o tratamento + P (2,00 $\mu\text{mol cm}^{-2}/10$ dias) em comparação ao tratamento + P + Cal (1,68 $\mu\text{mol cm}^{-2}/10$ dias) no solo SL, pode ter tido no seu pH mais baixo (5,3 no + P versus 6,04 no + P + Cal) um grande componente para este efeito (Quadro 3). Todavia, para o JP, com as mesmas tendências para as variações de pH entre esses tratamentos, não houve efeito significativo consistente da adição de P (+ P) alterando FFe. Neste caso, a maior presença de P em solução, com maior valor de $\delta I/\delta Q$ para este solo (menor fator capacidade), aparentemente causou maior precipitação do Fe em solução, com efeito negativo sobre o FFe, compensado pelo efeito positivo da diminuição do pH em relação aos tratamentos-testemunha e + Cal (Quadros 2 e 3).

No tratamento-testemunha (sem P e sem calagem) no solo SL, o maior FFe, para todos os níveis de umidade, aparentemente é devido ao maior gradiente de concentração deste elemento ($\delta c/\delta x$ Eq. 1) dados os maiores teores de Fe (total e extraível) deste solo, apesar de seu provável maior tamponamento de Fe (menor $\delta I/\delta Q$) (Eq. 2).

O efeito negativo mais pronunciado da calagem sobre o FFe no SL (Quadro 3), mesmo com o pH final menor que no JP (Quadro 2), parece estar ligado ao baixo $\delta I/\delta Q$ (Eq. 2) deste solo, fazendo com que a diminuição no já menor valor de I torne-se mais crítica neste solo que no JP. Efeito semelhante da calagem, restringindo o fluxo difusivo de Zn, como

conseqüência de aumento do pH do solo, tem sido observado em outros estudos (Machado & Pavan, 1981; Oliveira et al., 2000).

A umidade foi um fator preponderante sobre o FFe em ambos os solos, mas teve maior importância na ausência da calagem com ou sem a adição de P (Quadro 3). Isso se deve ao fato de que a precipitação de Fe em seus compostos de menor solubilidade previne maior FFe, mesmo sob condições de maior umidade.

Os resultados obtidos mostram que a calagem, bem como teores elevados de P disponível em solos, particularmente naqueles mais argilosos, como no Latossolo Vermelho férrico argiloso de Patos de Minas, onde lavouras de café apresentaram sintomas de deficiência de Fe (Nunes et al., 2002), podem causar absorção insatisfatória deste nutriente pelas plantas, de modo particular quando estes solos são submetidos a déficits hídricos.

CONCLUSÕES

1. O fluxo difusivo de Fe (FFe) nos solos mostrou-se direta e altamente relacionado com o nível de umidade.
2. O aumento do pH dos solos, ocasionado pela calagem, mostrou-se fortemente restritivo ao FFe.
3. A aplicação de P aos solos causou menor FFe no solo mais argiloso, mais tamponado, mas não no solo de textura média.

LITERATURA CITADA

- AHMAD, A.R. & NYE, P.H. Coupled diffusion and oxidation of ferrous iron in soils. I. Kinetics of oxygenation of ferrous iron in soil suspension. *J. Soil Sci.*, 41:395-409, 1990.
- BARBER, S.A. Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach. 2.ed. New York, John Wiley & Sons, 1995. p.330-338.
- BIDDULPH, O. & WOODBRIDGE, C.G. The uptake of phosphorus by bean plants with particular reference to the effects of iron. *Plant Phys.*, 27:431-444, 1952.
- BROWN, J.C. Iron chlorosis. *Ann. Rev. Plant Phys.*, 7:129-163, 1956.
- BROWN, J.C.; HOLMES, R.S. & TIFFIN, L.O. Hypotheses concerning iron chlorosis. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 23:231-234, 1959.
- COX, F.R. Micronutrientes. In: SÁNCHEZ, P.A., ed. Un resumen de las investigaciones edafológicas en las America Latina tropical. Raleigh, North Carolina Agricultural Experiment Station, 1973. p.199-215. (Technical Bulletin, 219)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.
- ERICH, M.S.; DUXBURY, J.M.; BOULDIN, D.R. & CARY, E. The influence of organic complexing agents on iron mobility in a simulated rhizosphere. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:1207-1214, 1987.
- HUE, N.V. & NAKAMURA, E.T. Iron chlorosis in macadamia as affected by phosphate-iron interactions. *J. Plant Nutr.*, 11:1635-1648, 1988.
- HUE, N.V.; FOX, R.L. & McCALL, W.W. Chlorosis in macadamia as affected by phosphate fertilization and soil properties. *J. Plant Nutr.*, 11:161-173, 1988.
- ISAAKIDIS, A.; SOTIROPOULOS, T.E.; ASIMAKOPOULOU, A. & STYLIANIDIS, D.C. Methods to improve reliability of leaf analysis results for iron-deficiency in kiwi fruit. *Agrochimica*, 46:3-4, 138-145, 2002.
- KIRK, G.J.D.; AHMAD, A.R. & NYE, P.H. Coupled diffusion and oxidation of ferrous iron in soils. II. A model of the diffusion and reaction of O₂, Fe²⁺, H⁺ and HCO₃⁻ in soils and a sensitivity analysis of the model. *J. Soil Sci.*, 41:411-431, 1990.
- KOSEOGLU, A.T. Effect of iron chlorosis on mineral composition of peach leaves. *J. Plant Nutr.*, 18:765-776, 1995.
- KUDACHIKAR, V.B.; CHETTI, M.B. & BASOARKAR, P.W. Change in the mineral constituents and chlorophyll content during chlorosis in sugarcane. *Ann. Plant Physiol.*, 11:2, 111-116, 1997.
- LIM, C.H. & JACKSON, M.L. Dissolution for total elemental analysis. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D.R., eds. Methods of soil analysis. 2.ed. Madison, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 1982. p.1-12.
- LINDSAY, W.L. Inorganic equilibria affecting micronutrients in soils. In: MORDVEDT, J.J.; COX, F.R.; SHUMAN, L.M. & WELCH, R.M., eds. Micronutrients in agriculture. Madison, Soil Science Society of America, p.89-112, 1991.
- LINDSAY, W.L. Soil and plant relationships associated with iron deficiency with emphasis on nutrient interactions. *J. Plant Nutr.*, 7:489-500, 1984.
- LOPES, A.S. Solos sob cerrado – características, propriedades e manejo. Piracicaba, Instituto da Potassa e Fosfato/Instituto Internacional da Potassa, 1983. 162p.
- MACHADO, P.L.O. & PAVAN, M.A. Adsorção de zinco por alguns solos do Paraná. *R. Bras. Ci. Solo*, 11:253-256, 1981.
- MARROCOS, P.C.L. Nutrição mineral da *Macadamia intergrifolia* Maiden e Betche. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1997. 91p. (Tese de Doutorado)
- MENARD, L.N. Efeitos do fósforo e alguns micronutrientes no crescimento e composição química do cafeeiro (*Coffea arabica* L. var. Caturra, K.M.G.) cultivado em solução nutritiva. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1956. 66p. (Tese de Doutorado)
- MENGEL, K. & KIRKBY, E.A. Principles of plant nutrition. Bern, International Potash Institute, 1982. 655p.
- NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.
- NUNES, F.N.; NOVAIS, R.F.; SILVA, I.R.; GEBRIM, F.O. & FONTES, P.C.R. Deficiência de ferro em cafezais induzida por excesso de fósforo na planta. In: III FERTIBIO, Rio de Janeiro, 2002. Resumos. Rio de Janeiro, 2002. p.35.
- NYE, P.H. & TINKER, P.B. Solute movement in the soil-root system. Berkeley, University of California Press, 1977. 342p.
- O’CONNOR, G.A.; LINDSAY, W.L. & OLSEN, S.R. Diffusion of iron and iron chelates in soil. *Soil Sci. Soc. Am.*, 35:407-410, 1971.
- O’CONNOR, G.A.; LINDSAY, W.L. & OLSEN, S.R. Iron diffusion to (sorghum) plant roots. *Soil Sci.*, 119:285-289, 1975.
- OLIVEIRA, F.H.T.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; ALVES, V.M.C. & VASCONCELLOS, C.A. Fluxo difusivo de zinco em amostras de solo influenciado por textura, íon acompanhante e pH do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:609-615, 1999.
- OLIVEIRA, F.H.T.; NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. & NEVES, J.C.L. Comparisons of phosphorus availability between anion exchange resin and Mehlich-1 extractions among Oxisols with different capacity factors. *Comm. Soil. Sci. Plant Anal.*, 31:615-630, 2000.
- PRICE, C.A. Iron compounds and plant nutrition. *An. Rev. Plant Physiol.*, 19:239-248, 1968.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S. & BATAGLIA, O.C. Análise química do solo para fins de fertilidade. Campinas, Fundação Cargill, 1987. 170p.

- RATTAN, R.K. & DEB, D.L. Self-diffusion of zinc and iron in soils as affected by pH, CaCO₃ calcium, carbonate, moisture, carrier and phosphorus levels. *Plant Soil*, 63:377-393, 1981.
- REID, R.K.; REID, C.P.P. & SZANISZLO, P.J. Effects of synthetic and microbially produced chelates on the diffusion of iron and phosphorus to a simulated root in soil. *Biol. Fertil. Soil*, 1:45-52, 1985.
- ROWELL, D.L.; MARTIN, M.W.; & NYE, P.H. The measurement and mechanism of ion diffusion in soils. III. The effect of moisture content and soil solution concentration on the self-diffusion of ions in soils. *J. Soil Sci.*, 18:2045-222, 1967.
- RUIZ, H.A.; FERNANDES, B.; NOVAIS, R.F.; & ALVAEZ V., V.H. Efeito da umidade do solo sobre o volume e o conteúdo de fósforo no exsudato xilemático de soja. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:39-42, 1988.
- SEM, A. & DEB, D.L. Diffusion of micronutrients in some Indian soils. II. Effect of soil moisture content on the self-diffusion coefficient of iron. *Ind. Agric.*, 21:167-171, 1977.
- SEM, A. & DEB, D.L. Significance of diffusion in the uptake of manganese and iron by maize plants (*Zea mays*) under varying manganese, iron and moisture levels (Delhi area, India). *Ind. Agric.*, 27:29-40, 1983.
- VILLANI, E.M.A.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F. & FONTES, L.E.F. Efeito da compactação do solo de amostras de Latossolos, níveis de fósforo e de água sobre a difusão de fósforo. In: SIMPOSIUM DA PESQUISA NA UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA, 2., Viçosa, 1990. Linhas de Pesquisa e Resumos, Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1990. p.220.
- VILLANI, E.M.A.; BARROS, N.F. & NOVAIS, R.F. Efeito de diferentes fontes de fósforo sobre sua difusão em solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 24., Goiânia, 1993. Resumos. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993a. p.53-54.
- VILLANI, E.M.A.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; FONTES, L.E.F. & NEVES, J.C.L. Difusão de fósforo em solos com diferentes texturas e níveis de umidade. *R. Bras. Ci. Solo*, 17:343-347, 1993b.