

SEÇÃO II - QUÍMICA E MINERALOGIA DO SOLO

ADSORÇÃO DE FÓSFORO, SUPERFÍCIE ESPECÍFICA E ATRIBUTOS MINERALÓGICOS EM SOLOS DESENVOLVIDOS DE ROCHAS VULCÂNICAS DO ALTO PARANAÍBA (MG)⁽¹⁾

F. C. ROLIM NETO⁽²⁾, C. E. G. R. SCHAEFER⁽³⁾, L. M. COSTA⁽³⁾
M. M. CORRÊA⁽⁴⁾, E. I. FERNANDES FILHO⁽³⁾ & M. M. IBRAIMO⁽⁴⁾

RESUMO

Muitos solos tropicais com grau avançado de intemperismo, apesar de apresentarem teores totais de P relativamente elevados, mostram-se deficientes em P disponível, pela baixa solubilidade das principais formas de P encontradas. Neste trabalho, estudou-se o processo de adsorção de P em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas básicas e ultrabásicas do Alto Paranaíba em Minas Gerais, algumas das quais ricas em apatita, estabelecendo-se relações com atributos de solo, como superfície específica (SE) e mineralogia. Foram estudados onze horizontes B diagnósticos de perfis de solos da região, por meio de análises químicas, físicas e mineralógicas; foram determinadas as capacidades máximas de adsorção do fósforo (CMAF), SE pelo método direto BET-N₂ e indiretamente por cálculos, bem como foi feita a quantificação dos minerais de argila pelo método de alocação. Os valores da SE obtidos indiretamente de cada mineral, foram superestimados em relação à SE determinada pelo método BET-N₂ na fração argila total. Nos Latossolos estudados, com texturas e materiais de origem variáveis, desde rochas básico-alcálicas até ultrabásicas, a proporção e a área superficial da gibbsita e goethita têm participação destacada na adsorção de P. A faixa de valores de CMAF_{TFSA} encontrada está consistente com os valores na literatura reportados para Latossolos, embora os valores de CMAF_{TFSA} e CMAF_{ARG} corrigida, de 2,98 e 4,38 mg g⁻¹, respectivamente, do Latossolo Vermelho-Amarelo de rocha ultrabásica (P6), sejam comparáveis àqueles de solos subtropicais alofânicos derivados de cinzas vulcânicas. A CMAF_{ARG} corrigida para percentagem de argila evidenciou expressivos valores nos Cambissolos de rochas

⁽¹⁾ Recebido para publicação em setembro de 2003 aprovado em julho de 2004.

⁽²⁾ Professor Adjunto do Departamento de Tecnologia Rural, Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE. CEP 52171-900 Recife (PE). E-mail: fernandocataxo@yahoo.com

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa – UFV. Av. PH Rolfs s/n, Departamento de Solos, CEP 36571-000 Viçosa (MG). Bolsista do CNPq. E-mail: carlos.schaefer@solos.ufv.br

⁽⁴⁾ Doutorando em Solos e Nutrição de Plantas, Departamento de Solos, UFV. Bolsista CAPES. E-mail: marcelometri@yahoo.com

vulcânicas ultrabásicas (4,32 e 5,52), com valor menor naquele derivado do tufito (3,16 mg g⁻¹). Os valores de substituição isomórfica de Al na goethita são mais elevados que nas hematitas. Em contraste com os Latossolos, os Cambissolos mostraram variações grandes nos atributos químicos, mineralógicos e na CMAF, em virtude da natureza diversificada de materiais de origem e do menor grau de intemperismo.

Termos de indexação: sorção de P, óxidos de Fe, Latossolos, Cambissolos, óxidos de Al.

SUMMARY: PHOSPHORUS ADSORPTION, SPECIFIC SURFACE, AND MINERALOGICAL ATTRIBUTES OF SOILS DEVELOPED FROM VOLCANIC ROCKS FROM THE UPPER PARANAÍBA, MG (BRAZIL)

Despite relatively high levels of total P, most deeply-weathered tropical soils have very low levels of available P due to the low solubility of most P forms found in these soils. In this research we studied P adsorption of soils, some of which were rich in apatite, developed from basic to ultrabasic volcanic rocks in the Upper Paranaíba region of Minas Gerais State, in relation to the specific surface and clay mineralogy. Samples of eleven B horizons from representative Latosols (Oxisols) and Cambisols (Inceptisols) were used. Standard chemical, physical, and mineralogical characterizations were realized, as well as the determination of maximum P adsorption capacity (PMAC), specific surface (SS) by the BET-N₂ and indirect methods, and the quantification of individual clay minerals by allocation. The sum of the SS values obtained by the indirect method for each mineral overestimated the results, compared with the SS values obtained by the BET-N₂ method for the total clay fraction. Among the studied Latosols, exhibiting varying textures and basic-alkaline to ultrabasic parent materials, the proportion and surface area of gibbsite and goethite appeared closely related to P adsorption. The range of PMAC values for the fine earth (< 2 mm) fraction was also consistent with values reported in literature, although the Red-Yellow Latosol derived from ultrabasic rock (fine earth PMAC = 2.98 mg g⁻¹ and PMAC_{clay} = 4.38 mg g⁻¹) was similar to values of allophanic subtropical soils derived from volcanic ash. The PMAC_{clay} values were greater in the Cambisols derived from ultrabasic volcanics (4.32 and 5.52) than in those derived from tuffites (3.16 mg g⁻¹). Al-isomorphic substitution in goethites was found to be higher than in hematites. In contrast to the Latosols, the Cambisols presented larger variations in chemical and mineralogical attributes, as well as in PMAC values; this is attributed to their varied parent materials and lower weathering degree of the Cambisols.

Index terms: P sorption, Fe-oxides, Oxisols, Inceptisols, Al-oxides.

INTRODUÇÃO

Na maioria dos solos, o suprimento natural de P é insatisfatório ao adequado crescimento de plantas. Apesar de seu teor total no solo variar de 100 a 1.000 mg Kg⁻¹ (Brady & Weil, 1996), ou entre 200 e 3.000 mg kg⁻¹ (Novais & Smyth, 1999), menos de 0,1 % desse total está presente na solução do solo, cujos valores variam entre 0,002 e 2,0 mg L⁻¹ (Fardeau, 1996). O teor de 0,2 mg L⁻¹ foi estabelecido por Beckwith (1965) e Fox & Kamprath (1970) como a concentração de equilíbrio para o máximo crescimento da maioria das plantas, embora na maioria dos solos tropicais, este teor seja muito inferior.

Quando encontrado em altos teores, pode ser indicativo de uma área com influência animal e, ou, humana em épocas pretéritas. É o caso dos solos denominados Terras Pretas de Índio, encontrados no Brasil, principalmente na região Amazônica, onde o P disponível (Mehlich-1) pode atingir valores da ordem de 3.000 mg kg⁻¹ (Lima, 2001). Em ecossistemas naturais, não perturbados pelo homem, vários processos biológicos e químicos permitem que as plantas, mesmo em condições de baixa disponibilidade, façam seu uso de maneira eficiente, podendo haver absorção direta de formas orgânicas de P, sem que haja passagem desse nutriente para a fase mineral do solo (Novais & Smyth, 1999). Adicionalmente, poucas perdas ocorrem com este

nutriente, uma vez que ele, além de não formar gases que poderiam escapar para a atmosfera, não é facilmente lixiviado do solo pela água de drenagem. Por outro lado, adições por meio da atmosfera e chuvas são desprezíveis (Brady & Weil, 1996). Não obstante, o P na solução pode ser submetido a perdas por erosão dos horizontes superficiais do solo, e mesmo por lixiviação em solos arenosos (Novais & Smyth, 1999).

No que se refere à fertilidade do solo, o P apresenta três problemas principais: o primeiro é com relação ao seu baixo teor no solo, geralmente não mais do que 1/10 a 1/4, quando comparado com o N, e 1/20 daquele do K; o segundo problema diz respeito à baixa solubilidade dos compostos de P comumente encontrados nos solos, tornando-o muito pouco disponível à absorção pelas plantas, e, finalmente, o terceiro problema diz respeito às mudanças para formas não-lábeis (fixação), quando fontes solúveis de P, na forma de fertilizantes e resíduos orgânicos, são adicionadas ao solo. Neste último caso, compostos não reativos são formados e, do total de fertilizante aplicado, em geral, somente uma pequena fração de P pode ser absorvido pelas plantas, no ano de aplicação.

O solo pode assumir o papel de fonte ou de dreno de P, quando apresentar reservas favoráveis à planta ou quando competir com a planta, fixando parte do P adicionado como fertilizante. Com o aumento do intemperismo, principalmente em condições tropicais, os solos mudam de fonte para dreno, tornando-se mais eletropositivos e com grande capacidade de adsorver e reter ânions, tais como os fosfatos. Neste contexto, destacam-se os Latossolos que, via de regra, apresentam-se bastante lixiviados, ácidos e muito pobres em P disponível. Em certos casos, como nos Latossolos argilosos do Cerrado brasileiro, o solo pode adsorver mais de 2 mg cm^{-3} de P, o que equivale a 4.000 kg ha^{-1} de P, ou seja, 9.200 kg ha^{-1} de P_2O_5 , incorporado a 0–20 cm de profundidade. Metade deste valor pode ser fixada (P não-lábil) em até um mês de contato com o solo (Novais & Smyth, 1999).

O teor e a constituição mineralógica da fração argila também assumem papel importante na caracterização de um solo como dreno ou fonte. Desta forma, solos muito intemperizados (oxidicos), com elevado teor de argila, exercerão predominantemente a função de drenos, enquanto aqueles poucos intemperizados (ricos em minerais primários silicatados) exercerão o papel de fontes (Novais & Smyth, 1999).

A interdependência entre o P-trocável ou lábil, denominado fator quantidade (Q), e o P-solução, denominado fator intensidade (I), para cada condição de solo (teor e qualidade dos constituintes minerais, principalmente da fração argila), resulta no conceito de Fator Capacidade de P do solo ou Poder Tampão de P do solo (FCP). Este fator é obtido pela relação

Q/I e definido como a resistência do solo em mudar o P-lábil quando se altera o P-solução, ou vice-versa (Novais & Smyth, 1999).

Outro aspecto, de relevante importância para o P, diz respeito ao estudo de sua adsorção aos colóides do solo, a depender do teor e qualidade desses. Para tal, desenvolveu-se o conceito de Capacidade Máxima de Adsorção de Fosfato (CMAF). Segundo Schaefer et al. (2004), esta capacidade é fortemente correlacionada com o conteúdo de Al_2O_3 e formas de Al nos microagregados do solo, com menor contribuição dos percentuais de Fe_2O_3 .

A concentração de P em solução, considerada como de elevada disponibilidade às plantas, depende, em grande parte, do processo de adsorção de P na superfície dos constituintes do solo. A importância deste processo, de forma geral, levou Fox & Kamprath (1970) à inclusão de critérios ligados a esse processo, nos sistemas de classificação de solos, em níveis categóricos mais baixos. Alguma diferenciação dos Latossolos brasileiros com base na CMAF tem sido estabelecida (Curi & Camargo, 1986), e sua quantificação despertou interesse e impulsos em trabalhos de Resende (1976), Lopes (1977), Bahia Filho (1982), Curi (1983), Ker (1995) e Fernandes (2000).

O objetivo deste trabalho foi o estudo de alguns dos processos de adsorção de P em solos desenvolvidos de rochas máficas e ultramáficas selecionados da região do Alto Paranaíba (MG), estabelecendo suas relações com alguns atributos de solo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Solos utilizados

Foram escolhidas três toplotossequências de solos, localizadas na região da Bacia do Alto Paranaíba, no estado de Minas Gerais. Foram avaliados 11 perfis, situados na faixa do contato geológico entre os grupos Bambuí, Araxá e corpos ígneo-vulcânicos de natureza alcalina até ultramáfica.

A primeira toplotossequência (T1), com quatro perfis, está situada nas proximidades da Serra do Salitre, localizada no município de mesmo nome. A segunda (T2), também com quatro perfis de solos, encontra-se na Serra Negra, no município de Patrocínio, e a terceira (T3), com três perfis, nas imediações da sede do município de Coromandel. As toplotossequências foram identificadas com o nome dos municípios em que estão localizadas.

Caracterização dos solos

Para a descrição morfológica dos 11 perfis de solos, seguiram-se os procedimentos descritos por

Lemos & Santos (1996), empregando-se na nomenclatura dos horizontes as normas constantes em Embrapa (1988a). Amostras deformadas foram coletadas de cada horizonte, com objetivo de realizar análises físicas, químicas e mineralógicas para a caracterização dos solos. Nas análises físicas e químicas de rotina, seguiram-se os procedimentos padrões do Manual de Métodos e Análise de Solo (Embrapa, 1997). Na classificação dos solos, adotaram-se as normas dos levantamentos pedológicos executados pela Embrapa (1988b) e do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 1999).

De cada solo foi selecionado um horizonte diagnóstico, no qual foram feitas análises a fim de verificar as possíveis inter-relações entre o P e as características físicas, químicas e mineralógicas dos materiais constituintes envolvidos.

Foram realizados ataques (triácido e sulfúrico) (Embrapa, 1997) e extrações com oxalato ácido de amônio (McKeague & Day, 1966) e ditionito-citrato-bicarbonato de Na (Mehra & Jackson, 1960) na TFSA e fração argila.

A fração argila com óxidos de Fe concentrados foi obtida mediante tratamento com NaOH 5 mol L⁻¹, segundo método proposto por Kämpf & Schwertmann (1982).

Fósforo remanescente

O P remanescente (P-rem) foi determinado na solução de equilíbrio, em amostras duplicatas, após agitação de uma amostra de 2,5 g de TFSA, pelo período de 1 h, com solução de 50 mL de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹, que continha 60 mg L⁻¹ de P, na proporção 1:10. A determinação nos extratos foi efetuada segundo Murphy & Riley (1962).

Capacidade máxima de adsorção de fosfato

A Capacidade máxima de adsorção de fosfato (CMAF), a energia de adsorção da isoterma de Langmuir (a) e o fator intensidade (I) foram determinados com base nos trabalhos de Alvarez V. & Fonseca (1990).

Superfície específica (métodos direto e indireto)

A superfície específica foi determinada no laboratório de Ciência da Partícula do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade da Flórida, nas frações: argila natural, argila desferrificada e argila com óxidos de Fe concentrados. Utilizou-se medição direta em atmosfera de N₂, com equipamento NOVA 1200 Quantachrome, sendo os cálculos de área realizados automaticamente pelo software NOVA Enhanced Data Reduction – versão 2.11, aplicando-se a equação BET (Brunauer, Emmett e Teller) a isotermas de adsorção de N₂ (Gregg, 1961).

A superfície específica calculada (método indireto) para a caulinita, goethita, hematita e gibbsita foi efetuada de acordo com o método utilizado por Ker (1995), Rodrigues Netto (1996) e Fernandes (2000).

Quantificação dos constituintes mineralógicos na fração argila

Foi realizada a partir dos dados do ataque sulfúrico e de difração de raios-X, segundo o método de alocação (Resende et al., 1987), com o programa computacional ALOCA (Moura Filho et al., 1995).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Superfície específica

Em todas as amostras, os valores de superfície específica (Quadro 1) evidenciam que houve diminuição quando do tratamento da argila com ditionito-citrato-bicarbonato e aumento após o tratamento da argila natural para a concentração de óxidos de Fe. Tal fato evidencia a elevada área e a influência destacada destes óxidos nos fenômenos de geração de sítios favoráveis à adsorção (Parfitt, 1978; Frossard et al., 1994). Em adição, Borggaard (1982) relatou que as propriedades físico-químicas dos óxidos de Fe são mais influenciadas pela superfície específica do que pelas feições mineralógicas que apresentam.

Em quase sua totalidade, os valores de superfície específica (Quadro 1) são inferiores aos encontrados por Ker (1995) para Latossolos do Brasil, principalmente nas amostras de argila tratada para a concentração de óxidos de Fe. Essa diferença advém dos diferentes métodos empregados neste trabalho (BET N₂) e daquele utilizado pelo referido autor (EMEG – etileno glicol mono-etil éter), ou até mesmo de uma superestimação dos resultados, hipótese aliás conjecturada pelo autor citado.

Os valores de SEA_{NAT} (Quadro 1) foram muito elevados em dois dos Cambissolos, nos quais se percebeu maior redução da superfície após o tratamento para a remoção dos óxidos de Fe. Nos Latossolos, a SE_{NAT} variou de 34 a 51,2 m² g⁻¹. Os valores de SEA_{NAT}/SEA_{DCB} foram maiores nos Cambissolos.

Comparando os valores de SEA_{NAT}, determinada com o método BET-N₂ (Quadro 1), com aqueles resultantes da soma da superfície individual calculada de cada mineral, determinada indiretamente (Quadro 2), constatou-se uma diferença grande entre eles, podendo-se concluir que os valores calculados foram superestimados. Esse erro resultou de um aumento sistemático dos valores calculados, quando comparados aos obtidos pelo método direto (BET N₂), variando de seis a 11 vezes.

Quadro 1. Superfície específica da fração argila com três tratamentos em horizontes diagnósticos dos solos das três topossequências estudadas

Perfil	Horizonte	Profundidade cm	Material de origem	SEA _{NAT} ⁽¹⁾	SEA _{DCB} ⁽¹⁾	SEA _{OXFe} ⁽¹⁾	SEA _{NAT} /SEA _{DCB}
				m ² g ⁻¹			
T1 – Topossequência Serra do Salitre Latossolo Vermelho ácrico típico (húmico)							
P1	Bw2	100–150+	Cobertura sobre rochas alcalinas	51,2	21,6	102,5	2,4
Cambissolo Háptico Ta eutrófico léptico							
P2	Bi	25–40	Alcalinas/ultramáficas	30,6	6,2	60,9	4,9
Neossolo Litólico húmico típico							
P3	A	0–40	Alcalinas/ultramáficas	-	-	-	-
Latossolo Vermelho ácrico típico							
P4	Bw2	75–110	Cobertura sobre clorita-xistos	41,9	21,4	70,1	1,9
T2 – Topossequência Patrocínio Latossolo Vermelho distrófico húmico							
P5	Bw2	80–150	Cobertura sobre dunito	37,5	25,1	74,9	1,5
Latossolo Vermelho-Amarelo ácrico típico							
P6	Bw2	80–125	Cobertura sobre Dunito	39,6	24,2	90,2	1,6
Cambissolo Háptico Ta eutrófico léptico							
P7	Bi	30–50	Dunito	56,3	7,6	59,4	7,5
Latossolo Vermelho distrófico húmico							
P8	Bw2	120–150+	Colúvio de rochas ultrabásicas e psamíticas	34,4	25,8	73,5	1,3
T3 – Topossequência Coromandel Latossolo Vermelho ácrico típico							
P9	Bw2	100–200+	Cobertura sobre tufito	33,7	13,8	78,4	2,4
Cambissolo Háptico Ta eutrófico léptico							
P10	Bi	20–60	Tufito	69,9	18,2	108,0	3,9
Latossolo Vermelho distroférico câmbico							
P11	Bw	50–80	Canga laterítica	45,6	23,4	71,8	1,9

⁽¹⁾ SEA_{NAT} = superfície específica da fração argila natural calculada pelo método BET N₂; SEA_{DCB} = superfície específica da fração argila tratada com ditionito-citrato-bicarbonato; SEA_{OXFe} = superfície específica da fração argila concentrada em óxidos de Fe.

Quadro 2. Superfície específica calculada dos principais constituintes mineralógicos encontrados na fração argila de horizontes diagnósticos das três topossequências estudadas

Perfil	Horizonte	Hematita	Goethita	Gibbsita	Caulinita	Total
		m ² g ⁻¹				
P1	Bw2	69,59	175,54	91,67	64,30	401,10
P2	Bi	67,70	125,72	71,05	83,34	347,81
P3	A	-	-	-	-	-
P4	Bw2	64,89	125,62	102,03	64,29	356,83
P5	Bw2	52,37	100,69	81,32	45,26	279,64
P6	Bw2	50,04	138,06	91,67	45,26	325,03
P7	Bi	76,06	100,89	81,50	73,82	332,27
P8	Bw2	50,03	100,71	81,27	64,29	296,30
P9	Bw2	43,54	88,24	70,99	45,26	248,03
P10	Bi	22,17	75,79	-	26,23	-
P11	Bw	37,02	113,13	91,70	45,26	287,11

Após o cálculo dos coeficientes de correlação (Quadro 3) entre os valores de superfície específica determinada diretamente e destes com os da superfície individual calculada, analisado apenas o grupo dos sete Latossolos estudados, obteve-se uma indicação das relações existentes. Observou-se que a superfície específica da goethita correlacionou-se positiva e significativamente com a superfície específica total calculada ($r = 0,93^{**}$), com a superfície específica determinada na fração argila natural ($r = 0,84^*$) e com óxidos de Fe concentrados ($r = 0,81^*$). Isto pode ser explicado pelo menor tamanho e, conseqüentemente, maior área específica

da goethita do que de outros óxidos, como assinalado por Schwertmann & Kämpf (1985), Anand & Gilkes (1987), Barrón et al. (1988), Schwertmann (1988), Mesquita Filho & Torrent (1993) e Torrent et al. (1994).

Uma estimativa adequada da contribuição dos óxidos de Fe na superfície específica pode ser obtida pela relação SEA_{NAT}/SEA_{DCB} (Quadro 1). Os Latossolos mostraram relações entre 1,3 (P8) e 2,4 (P9), enquanto os Cambissolos apresentaram relações bem mais elevadas, de 3,9 (P10) até 7,5 (P7). O caráter mais reativo da fração oxidica dos Cambissolos do tufito é evidenciado pela superfície dos óxidos de Fe concentrados, que devem ter menor cristalinidade, por serem solos menos evoluídos.

Quadro 3. Correlações entre alguns dos valores de superfície específica determinados e calculados das amostras dos Latossolos das três topolitosseqüências estudadas (n = 7)

Correlação	r
$SE_{SOMA} \times SE_{Gt}$	0,93**
$SE_{SOMA} \times SE_{Hm}$	0,86*
$SE_{SOMA} \times SE_{Gb}$	0,74°
$SE_{SOMA} \times SE_{Ct}$	0,68°
$SE_{NAT} \times SE_{Gt}$	0,84*
$SE_{NAT} \times SE_{Gb}$	0,66°
$SE_{OXFe} \times SE_{Gt}$	0,81*

SE_{SOMA} = soma das superfícies individuais calculadas; SE_{NAT} = superfície específica da fração argila natural; SE_{OXFe} = superfície específica da fração argila com óxidos de ferro concentrados; SE_{Gt} = superfície específica calculada da goethita; SE_{Hm} = superfície específica calculada da hematita; SE_{Gb} = superfície específica calculada da gibbsita; SE_{Ct} = superfície específica calculada da caulinita. **, * e °: Significativos a 1, 5 e 10 % de probabilidade.

Considerando os valores de Ki (Quadro 4) dos perfis P2 e, especialmente, do P7, respectivamente, 1,71 e 7,88, constata-se que estes perfis têm correspondência com os valores mais elevados de P remanescente (Quadro 5), respectivamente, 17 e 22 mg L⁻¹. Nestes perfis, incluindo o perfil P3 do Neossolo, a $CMAF_{TFSA}$ apresenta-se com os menores valores (Quadro 5), pois o desenvolvimento incipiente (poucos óxidos) e a natureza do material de origem favoreceram a menor retenção de P em relação aos demais. Apesar da elevada superfície específica do P7 (Quadro 1), que poderia contribuir para um valor menor de P-rem e bem mais alto de $CMAF_{TFSA}$ (Quadro 5), o fato de ser rico em P extraível pelo Mehlich-1, com valor de 244,3 mg kg⁻¹ (Quadro 4), evidencia o menor caráter dreno do solo, como conceituado por Novais & Smyth (1999).

Em contraste com os demais Cambissolos (P2 e P7), situação semelhante não ocorreu com o perfil P10 de Cambissolo, o qual mostrou baixo valor de

Quadro 4. Teores de óxidos do ataque sulfúrico, relações Ki e Kr, fósforo extraído por Mehlich-1 e P (total) pelo ataque triácido em várias frações de horizontes dos solos das três topolitosseqüências estudadas

Topol.	Perfil	Horizonte	Ataque sulfúrico ⁽¹⁾			Ki	Kr	P Mehlich-1 ⁽²⁾ TFSA	P total ⁽³⁾		
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃				TFSA	Areia	Argila
			— dag kg ⁻¹ —					— mg kg ⁻¹ —			
T1	P1	Bw2	8,3	17,7	6,2	0,80	0,65	0	1.340	280	1.540
	P2	Bi	13,0	12,9	6,2	1,71	1,31	3,5	1.740	660	3.200
	P3	A	1,9	5,0	2,0	0,65	0,51	535,6	6.000	3.060	16.000
	P4	Bw2	9,3	30,7	5,2	0,51	0,46	0,1	260	20	340
T2	P5	Bw2	10,6	36,7	9,9	0,49	0,42	0,5	1.020	580	980
	P6	Bw2	8,1	36,8	6,3	0,37	0,34	0,1	1.780	920	1.820
	P7	Bi	10,2	2,2	21,2	7,88	1,10	244,3	1.820	2.120	1.800
	P8	Bw2	5,4	21,4	10,0	0,43	0,33	1,0	1.560	520	1.960
T3	P9	Bw2	6,5	31,4	7,6	0,35	0,30	0,0	860	540	1.960
	P10	Bi	13,7	11,1	13,5	2,10	0,60	5,3	2.960	1.820	2.020
	P11	Bw	8,1	18,6	19,9	0,74	0,44	1,9	1.260	520	1.240

Topol. = topolitosseqüência.

⁽¹⁾ Determinado em absorção atômica. ⁽²⁾ Determinado por colorimetria; Ki = relação $\%SiO_2 \times 1,7 / \%Al_2O_3$; Kr = $\%SiO_2 \times 1,7 / (\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3 \times 0,64)$; TFSA = terra fina seca ao ar. ⁽³⁾ Determinado em plasma.

P-rem e alto valor de CMAF (Quadro 5). Neste caso, por tratar-se de um solo derivado do intemperismo de tufito, material de origem vulcânica com elevado teor de amorfos, mostra alta capacidade de retenção de P, como evidenciado por Alvarez V. (1982) e Shoji et al. (1993) em solos de origem vulcânica.

P disponível

Os elevados teores de P-Mehlich-1 encontrados nos perfis P3 e P7 (Quadro 4), aliados aos teores de argila (Quadro 5), são considerados como pertencentes às classes boa e muito boa de disponibilidade do nutriente, propostas por Alvarez V. et al. (1999). Estes teores de P disponível, bem como seus respectivos teores de P-total na TFSA, P-total na argila e na areia, devem estar relacionados com a presença de apatita nos corpos ultrabásicos/alcalinos, como relatados por Barbosa et al. (1970). Ainda segundo Alvarez V. et al. (1999), o restante dos solos enquadra-se nas classes baixo (P10) e muito baixo (demais solos).

Capacidade máxima de adsorção de fosfato (CMAF)

Os valores de CMAF_{TFSA} variaram de 0,55 a 2,98 mg g⁻¹ (Quadro 5), com amplitude de 2,43 e média de 1,49 mg g⁻¹. Com exceção de 1,90 mg g⁻¹ (Perfil 10) e 2,98 mg g⁻¹ (Perfil 6), o restante dos valores enquadra-se na faixa dos valores de CMAF indicados por Novais & Smyth (1999), ao citarem Latossolos de Cerrado. Em solos da Amazônia, Lima (2001) encontrou valores de CMAF variando de 0,21 a 2,17 mg g⁻¹, enquanto Singh et al. (1983), também trabalhando com solos da Amazônia, observaram valores entre 0,16 e 0,98 mg g⁻¹ de P.

A faixa de valores de CMAF_{TFSA} encontrada (Quadro 5) está consistente com os valores de Ker (1995), para Latossolos, com destaque para o Latossolo Vermelho-Amarelo (P6), com valor mais elevado tanto da CMAF_{TFSA} quanto da CMAF_{ARGCO}, respectivamente 2,98 e 4,38 mg g⁻¹. Esses valores são muito elevados e comparáveis àqueles de solos subtropicais de cinzas vulcânicas (Fassbender, 1966; Alvarez V., 1982), onde há presença de alofanos.

A CMAF_{ARGCO} corrigida para percentagem de argila (Quadro 5) evidenciou expressivos valores nos Cambissolos de rochas ígneas (P2 = 4,32; P7 = 5,52 mg g⁻¹), à exceção daquele derivado do tufito (P10 = 3,16 mg g⁻¹). Estes valores elevados em P2 e P7 estão associados a valores de P-rem mais elevados, indicando que a desorção de P nestes solos pode ser mais intensa, em virtude de sua constituição mineralógica não-oxidica. No caso do P10, de tufito, o valor de CMAF_{ARGCO} de 3,16 mg g⁻¹ deve está relacionado com P-rem baixo, indicando a influência de aluminossilicatos amorfos na adsorção, caso típico de solos desenvolvidos de cinzas vulcânicas.

Segundo os critérios sugeridos por Curi et al. (1988), os valores da CMAF_{TFSA} (Quadro 5) variaram entre a classe média (1,0–2,5 mg g⁻¹) e alta (> 2,5 mg g⁻¹), para os Latossolos, em que apenas o Bw2 do Latossolo Vermelho-Amarelo (P6) apresentou valores superiores a 2,5 mg g⁻¹. Dentre os Cambissolos, observou-se que os desenvolvidos de rochas ígneas máficas/ultramáficas cristalinas (Bi do P2 e P7) apresentaram valores mais baixos de CMAF_{TFSA}, pelos menores teores de óxidos de Fe e Al, no primeiro, e de óxidos de Al, no segundo, e menor grau de desenvolvimento. Por outro lado, o

Quadro 5. Matéria orgânica (MO), argila, fósforo remanescente (P-rem), capacidade máxima de adsorção de fosfato (CMAF), energia de adsorção (a) e fator intensidade em horizontes diagnósticos dos solos das três topolitosseqüências estudadas

Topol.	Perfil	Horizonte	MO	Argila	P Rem	CMAF _{TFSA}	CMAF _{ARGCO}	a	Intensidade (potencial de fosfato)
			g kg ⁻¹	dag kg ⁻¹	mg L ⁻¹	mg g ⁻¹		L mg ⁻¹	(0,5 pCa + pH ₂ PO ₄)
T1	P1	Bw2	10,85	44	0	1,49	3,83	6,15	8,61
	P2	Bi	38,93	26	17	1,12	4,32	0,67	7,78
	P3	A	130,83	11	15	0,91	8,23	0,39	7,58
	P4	Bw2	21,70	53	0	1,95	3,68	8,92	8,01
T2	P5	Bw2	29,36	70	1	1,36	1,94	9,78	7,86
	P6	Bw2	22,34	68	0	2,98	4,38	2,30	8,00
	P7	Bi	22,34	10	22	0,55	5,52	2,32	8,25
	P8	Bw2	21,70	40	2	1,24	3,10	2,04	7,53
T3	P9	Bw2	15,96	65	0	1,55	2,39	3,14	7,70
	P10	Bi	15,96	60	1	1,90	3,16	1,54	7,90
	P11	Bw	7,66	23	1	1,38	5,99	3,19	7,96

Topol. = topolitosseqüência; CMAF_{TFSA} = capacidade máxima de adsorção de fosfato na terra fina seca ao ar; CMAF_{ARGCO} = capacidade máxima de adsorção de fosfato corrigida para argila, com base na textura; a = energia de adsorção; I= fator intensidade.

Cambissolo desenvolvido do tufito (P10) exibiu valores mais elevados que o próprio Latossolo (P9) que lhe é associado na toposseqüência, fornecendo indícios da importância de formas amorfas de aluminossilicatos na adsorção de P neste solos.

Em relação à posição na paisagem, os valores de $CMAF_{TFSA}$ foram variáveis nas três toposseqüências. Enquanto, na T1, o Latossolo Vermelho de topo (P4) apresenta o maior valor, em T2, o Latossolo Vermelho-Amarelo (P6) da parte intermediária mostrou maior $CMAF$ que o Latossolo Vermelho de topo (P5). Em T3, conforme comentado, o Cambissolo (P10), em posição intermediária, mostrou valor de $CMAF_{TFSA}$ maior que os Latossolos da seqüência, pelas razões supramencionadas. Portanto, mais importante que a posição topográfica é a natureza mineralógica e textural do solo e do substrato geológico.

Correlacionando a $CMAF_{TFSA}$ com alguns atributos dos solos (Quadro 6), foi encontrada apenas correlação significativa e negativa com o Fe extraído pelo ditionito-citrato-bicarbonato ($r = -0,73^{\circ}$), indicando que as formas mais cristalinas de Fe podem não ter participação decisiva na adsorção de fosfatos. Caso isto fosse verdadeiro, esperar-se-ia correlação positiva e significativa com o Fe extraído pelo oxalato, indicativo de formas menos cristalinas e com maior superfície específica e reatividade, pois, segundo relatos existentes na literatura (McLaughlin et al., 1981; Parfitt, 1989), a baixa cristalinidade dos óxidos de Fe está associada à maior adsorção de fosfato.

Mesmo com teores consideráveis de matéria orgânica, como nos casos dos Perfis P2 ($3,89 \text{ dag kg}^{-1}$), P3 ($13,08 \text{ dag kg}^{-1}$) e P5 ($2,94 \text{ dag kg}^{-1}$) – (Quadro 5), não foi constatada correlação significativa entre esta e a $CMAF_{TFSA}$. Na literatura, há trabalhos que ilustram tanto correlações positivas quanto

negativas, sendo as positivas decorrentes de pontes de cátions (Al, Fe e Ca) adsorvidos, os quais retêm o P (Sanyal & De Datta, 1991), enquanto as negativas seriam resultantes do bloqueio dos sítios de adsorção (oxidróxidos) por ácidos orgânicos (Parfitt, 1978; Sanchez & Uehara, 1980; Evans Jr., 1985; Fontes, 1990).

As correlações mais expressivas encontradas envolvendo a $CMAF_{TFSA}$ estão ligadas à gibbsita (Gb), Al do ataque sulfúrico (Al_S) e % argila, sendo porém não significativas. O teor de argila no solo poderia exercer influência, aumentando os valores de adsorção de P (Novais & Smyth, 1999; Silva, 1999; Lima, 2001); no entanto, não se constatou correlação significativa entre seu percentual e a $CMAF_{TFSA}$. Tal fato é indicativo da maior influência da constituição mineralógica da fração argila, em detrimento de seu teor, sobre os valores de $CMAF_{TFSA}$, conforme relatado em trabalhos de Novais (1977), Bahia Filho (1982) e Ker (1995).

Como observado anteriormente (Quadro 3), a superfície específica da goethita correlacionou-se significativamente com a superfície específica total calculada ($r = 0,93^{**}$), com a superfície específica determinada na fração argila natural ($r = 0,84^*$) e com a superfície específica da fração argila concentrada com óxidos de Fe ($r = 0,81^*$), evidenciando a importância da constituição mineralógica da fração argila na superfície de reação e, conseqüentemente, na adsorção de P.

Vale ressaltar, ainda, que foi constatada correlação positiva e significativa, a 5 % de probabilidade ($r = 0,85^*$), entre os teores de argila e os teores de gibbsita, indicando indiretamente a participação deste mineral na adsorção de P, reforçando a idéia de que a qualidade da argila é mais importante do que seus teores. Quando presente em teores elevados, a gibbsita pode ser o

Quadro 6. Coeficientes de correlação linear simples entre a $CMAF_{TFSA}$ e algumas variáveis dos solos estudados (n = 7)

$CMAF_{TFSA}$	a	I	MO	%arg	Gt	Hm	Hm/Gt + Hm	Gb	Ct
	-0,18 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,46 ^{ns}	0,31 ^{ns}	-0,63 ^{ns}	-0,64 ^{ns}	0,49 ^{ns}	0,14 ^{ns}
$CMAF_{TFSA}$	Si_S	Al_S	Fe_S	Ki	Kr	Fe_{OX}	Fe_{DCB}		
	0,14 ^{ns}	0,56 ^{ns}	-0,43 ^{ns}	-0,39 ^{ns}	-0,21 ^{ns}	-0,58 ^{ns}	-0,73 ^o		
$CMAF_{TFSA}$	SE_{NAT}	SE_{DCB}	SE_{OXFe}	SE_{Gt}	SE_{Hm}	SE_{Gb}	SE_{Ct}		
	0,00 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,31 ^{ns}	0,32 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,38 ^{ns}	-0,22 ^{ns}		

TFSA = terra fina seca ao ar; a = energia de adsorção; I = fator intensidade; MO = matéria orgânica; %arg = percentagem de argila; Gt = goethita; Hm = hematita; Gb = gibbsita; Ct = caulinita; Si_S , Al_S e Fe_S = Si, Al e Fe do ataque sulfúrico; Ki = relação $\%SiO_2 \times 1,7 / \%Al_2O_3$; Kr = $\%SiO_2 \times 1,7 / (\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3 \times 0,64)$; Fe_{OX} = Fe extraído com oxalato; Fe_{DCB} = Fe extraído com ditionito-citrato-bicarbonato; SE_{NAT} = superfície específica da fração argila natural; SE_{DCB} = superfície específica da fração argila tratada com ditionito-citrato-bicarbonato; SE_{OXFe} = superfície específica da fração argila com óxidos de Fe concentrados; SE_{Gt} = superfície específica calculada da goethita; SE_{Hm} = superfície específica calculada da hematita; SE_{Gb} = superfície específica calculada da gibbsita; SE_{Ct} = superfície específica calculada da caulinita.

^oe ^{ns}: Significativo a 10 % e não-significativo, respectivamente.

fator determinante no fenômeno da adsorção de P em Latossolos brasileiros, assumindo mais importância do que os óxidos de Fe, como assinalado por Bahia Filho (1982), Dick (1986), Curi et al. (1988) e Mesquita Filho & Torrent (1993). Mesmo tendo participação importante na adsorção de P, a gibbsita é menos efetiva do que a goethita (McLaughlin et al., 1981; Frossard et al., 1994).

Tem sido constatado na literatura que a goethita, pelos seus teores, e principalmente, pela sua área específica mais elevada (menor tamanho do cristalito), assume papel preponderante na fase rápida e lenta de adsorção, com a presença de maior número de grupamentos OH, aumentando as reações da superfície desse mineral com o P (Parfitt, 1989; Barrow, 1990; Torrent et al., 1992).

Os teores e superfície específica da caulinita e da hematita não apresentaram correlação significativa com a CMAF_{TFSA} (Quadro 6), evidenciando a sua menor participação na adsorção de P. Há trabalhos que mostram a importância da participação desses minerais na adsorção de P, enquanto outros exibem resultados com baixa ou nenhuma correlação. Algumas especulações têm sido feitas; segundo uma delas, sendo interativo o fenômeno de adsorção de P, a presença da goethita e da gibbsita, mais ativas e eficazes, seria responsável quase que totalmente pela CMAF, reduzindo, assim, o efeito da caulinita e da hematita.

Os dados resultantes dos cálculos realizados no ALOCA (Quadro 7) permitiram visualizar e, guardadas as devidas proporções, confirmar as

observações de campo e de dados de análises químicas (Rolim Neto, 2002). Os valores da relação Al₂O₃/Fe₂O₃, à exceção do P7 de Cambissolo, são superiores à unidade, assumindo o valor máximo de 9,24. Aliado a esses valores, percebe-se elevada percentagem de gibbsita, principalmente quando comparada à da hematita, indicando forte presença desse hidróxido de Al e sua influência no aumento de adsorção de P. De maneira geral, os maiores percentuais são de goethita e hematita, com alternância de valores, para mais ou para menos.

Com relação à substituição isomórfica do Fe (raio iônico = 0,065) pelo Al (raio iônico = 0,053), nos óxidos de Fe (Quadro 7), constata-se que, à exceção dos Perfis P1 de Latossolo Vermelho e P7 de Cambissolo, os valores de 22,05 a 44,43 e 4,75 a 18,90, para goethita e hematita, respectivamente, situam-se dentro das faixas encontradas por Curi (1983), Schwertmann & Kämpf (1985), Palmieri (1986) e Ker (1995). Esses valores de substituição, mais altos na goethita, quando comparados aos da hematita, acarretam diminuição mais expressiva na sua célula unitária e, conseqüentemente, maior área específica e maior participação no fenômeno de adsorção de P, como relatado por Parfitt (1978), McLaughlin et al. (1981) e Frossard et al. (1994).

CONCLUSÕES

1. Os valores de superfície específica, determinados pelo método direto BET N₂ em todos

Quadro 7. Quantificação, efetuada pelo Programa ALOCA⁽¹⁾, dos constituintes mineralógicos, substituição isomórfica e algumas relações na fração argila de alguns horizontes dos solos estudados, exceto do P3 (Neossolo Litólico)

Atributo	Perfil de solo e respectivo horizonte									
	P1 Bw2	P2 Bi	P4 Bw2	P5 Bw2	P6 Bw2	P7 Bi	P8 Bw2	P9 Bw2	P10 Bi	P11 Bw
Ct (%)	9,75	8,22	6,16	22,80	17,42	5,84	11,61	13,98	-30,44	9,15
Gt (%)	23,07	7,65	16,56	16,07	19,17	21,24	0,61	17,22	12,82	20,24
Hm (%)	6,63	8,88	4,07	9,77	0,80	13,18	29,78	5,46	0,99	14,23
Mag (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gb (%)	8,19	3,70	29,47	35,90	38,19	0,00	24,14	33,27	8,62	12,39
Mica (%)	7,38	18,00	12,62	-	-	-	-	-	54,62	7,54
% Si amorfa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,49	0,00	0,00	0,00	0,00
% mol Al na Gt	38,92	22,05	44,43	33,28	38,92	0,00	26,80	33,28	26,80	33,28
% mol Al na Hm	111,89	18,90	18,90	11,89	8,32	4,75	4,75	11,89	4,75	4,75
Hm / Hm + Gt	0,22	0,54	0,20	0,38	0,04	0,38	0,98	0,24	0,07	0,41
Al ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃	4,47	3,26	9,24	5,80	9,14	0,16	3,35	6,46	1,29	1,46
SiO ₂ /Fe ₂ O ₃	3,56	5,57	4,75	2,84	3,41	1,28	1,43	2,27	2,69	1,08

(1) Segundo Moura Filho et al. (1995). Ct = caulinita; Gt = goethita; Hm = hematita; Mag = maguemita; Gb = gibbsita; Si = sílica.

os horizontes, nas frações argila natural, argila desferrificada e com óxidos de Fe concentrados, são compatíveis com os da literatura.

2. Os valores de superfície específica, determinados individualmente para os minerais pelo método indireto, quando comparados aos valores totais obtidos pelo método direto BET-N₂ da fração argila natural, apresentam-se superestimados.

3. No conjunto de Latossolos, com textura e filiação geológica variáveis, desde alcalino-básicas até ultrabásicas, a percentagem e a área superficial dos óxidos de Fe e Al, respectivamente, goethita e gibbsita, têm participação no aumento da adsorção de fosfato.

4. Os Latossolos mostraram comportamento quanto à CMAF comparável aos de Latossolos de outras regiões. Por outro lado, os Cambissolos apresentaram variações notáveis entre os atributos químicos, mineralógicos e comportamento do P, função dos materiais vulcânicos de origens diferentes, tais como: tufito e rochas alcalino-ultramáficas.

LITERATURA CITADA

- ALVAREZ V., V.H. Efeito de los factores cantidad, intensidad y capacidad amortiguadora de fosfatos en la evaluación del fósforo disponible de suelos derivados de cenizas volcánicas de la Meseta Tarasca. Chapingo, Colégio de Posgraduados, 1982. 300p. (Tese de Doutorado)
- ALVAREZ V., V.H. & FONSECA, D.M. Definição de doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios em casa de vegetação. R. Bras. Ci. Solo, 14:49-55, 1990.
- ALVAREZ V.; V.H.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; CANTARUTTI, R.B. & LOPES, A.S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A.C., GUIMARÃES, P.T.G. & ALVAREZ V., V.H., eds. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, 5ª aproximação. Viçosa, Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359p.
- ANAND, R.R. & GILKES, R.J. Iron oxides in lateritic soil from Western Australia. J. Soil Sci., 38:607-622, 1987.
- BAHIA FILHO, A.F.C. Índices de disponibilidade de fósforo em Latossolo do Planalto Central com diferentes características texturais e mineralógicas. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1982. 179p. (Tese de Doutorado)
- BARBOSA, O.; BRAUN, O.P.G.; DYER, R.C. & CUNHA, C.A.B.R. Geologia da região do Triângulo Mineiro. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM, 1970. 140p. (Boletim, 136)
- BARRÓN, V.; HERRUZO, M. & TORRENT, J. Phosphate adsorption by aluminous hematites of different shapes. Soil Sci. Soc. Am. J., 52:647-651, 1988.
- BARROW, N.J. Relating chemical processes to management system. In: SYMPOSIUM OF PHOSPHORUS REQUIREMENTS FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE IN ASIA AND OCEANIA, 1., Manila, 1990. Proceedings. Manila, IRRI, 1990. p.199-209.
- BECKWITH, R.S. Sorbed phosphate at standard supernatant concentration as an estimate of the phosphate needs of soils. Austr. J. Exp. Agric. An. Husb., 5:52-58, 1965.
- BORGGAARD, O.K. The influence of iron oxides on the surface area of soils. J. Soil Sci., 33:443-449, 1982.
- BRADY, N.C. & WEIL, R.R. The nature and properties of soils. 11.ed. New Jersey, Prentice Hall, 1996. 727p.
- CURI, N. Lithosequence and toposequence of Oxisols from Goiás and Minas Gerais States, Brazil. West Lafayette, Purdue University, 1983. 158p. (Tese de Doutorado)
- CURI, N. & CAMARGO, O.A. Phosphorus adsorption characteristics of Brazilian Oxisols. In: INTERNATIONAL SOIL CLASSIFICATION WORKSHOP: CLASSIFICATION, CHARACTERIZATION AND UTILIZATION OF OXISOLS, 8., Rio de Janeiro, 1986. Proceedings. Rio de Janeiro, Embrapa, 1986. Pt.1, p.56-63.
- CURI, N.; CAMARGO, O.A.; GUEDES, G.A.A. & SILVEIRA, J.V. Sorção de fósforo em materiais de Latossolos do Brasil sudeste. In: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DE APTIDÃO AGRÍCOLA, 3., Rio de Janeiro, 1988. Anais. Rio de Janeiro, Embrapa, 1988. p.267-282.
- DICK, D.P. Caracterização de óxidos de ferro e adsorção de fósforo na fração argila de horizontes B latossólicos. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1986. 196p. (Tese de Mestrado)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Definição e notação de horizontes e camadas do solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1988a. 54p. (Documentos SNLCS, 3)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Critérios para distinção de classes de solos e de fases de unidades de mapeamento: normas em uso pelo SNLCS. Rio de Janeiro, 1988b. 67p. (Documentos SNLCS, 11)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos e análises de solo. Rio de Janeiro, 1997.
- EVANS Jr., A. The adsorption of inorganic phosphate by a sandy soil as influenced by dissolved organic compounds. Soil Sci., 140:251-255, 1985.
- FARDEAU, J.C. Dynamics of phosphate in soils. An isotopic outlook. Fert. Res., 45:91-100, 1996.

- FASSBENDER, H.W. La adsorción de fosfatos en suelos fuertemente ácidos y su evaluación usando la Isoterma de Langmuir. *Fit. Lat. Am.*, 3:203-216, 1966.
- FERNANDES, R.B.A. Atributos mineralógicos, cor, adsorção e dessorção de fosfatos em Latossolos do Sudeste brasileiro. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2000. 265p. (Tese de Doutorado)
- FONTES, M.R. Interactions of goethite and humic acid in some Oxisols from Brazil. Raleigh, North Carolina State University, 1990, 75p. (Tese de Doutorado)
- FOX, R.L. & KAMPRATH, E.J. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34:902-907, 1970.
- FROSSARD, E.; BROSSARD, M.; HEDLEY, M.J. & METHERELL, A. Reactions controlling the cycling of P in soils. In: TIESSEN, H., ed. P cycling in terrestrial and aquatic ecosystem; a global perspective. New York: John Wiley, 1994. p.1-65.
- GREGG, S.J. The surface chemistry of solids. New York, Reinhold Publishing, 1961. 393p.
- KÄMPF, N. & SCHWERTMANN, U. The 5-M-NaOH concentration treatment for iron oxides in soils. *Clays Clay Miner.*, 30:401-408, 1982.
- KER, J.C. Mineralogia, sorção e dessorção de fosfato, magnetização e elementos traços de Latossolos do Brasil. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1995. 181 p. (Tese de Doutorado)
- LEMO, R.C. & SANTOS, R.D. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 3.ed. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. 83p.
- LIMA, H.N. Gênese, química, mineralogia e micromorfologia de solos da Amazônia Ocidental. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2001. 176p. (Tese de Doutorado)
- LOPES, O.F. Caracterização de um Latossolo Vermelho Escuro no Norte de Minas Gerais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1977. 89p. (Tese de Mestrado)
- McKEAGUE, J.A. & DAY, J.H. Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soil. *Can. J. Soil Sci.*, 46:13-22, 1966.
- McLAUGHLIN, R.R.; RYDEN, J.C. & SYERS, J.R. Sorption of inorganic phosphate by iron and aluminum containing components. *J. Soil Sci.*, 32:365-377, 1981.
- MEHRA, J.P. & JACKSON, M.L. Iron oxides removal from soils and clays by a dithionite-citrate-bicarbonate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Miner.*, 7:317-327, 1960.
- MESQUITA FILHO, M.V. & TORRENT, J. Phosphate sorption as related to mineralogy of a hydrosequence of soils from Cerrado Region (Brazil). *Geoderma*, 58:107-123, 1993.
- MOURA FILHO, G.; RESENDE, M. & CRUZ, C.D. ALOCA – Programa de estimativa de minerais do solo. Versão 1.0. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., Viçosa, 1995. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1995 (software)
- MURPHY, J. & RILEY, J.P. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*, 27:31-36, 1962.
- NOVAIS, R.F. Phosphorus supplying capacities of previously heavily fertilized soils. Raleigh, North Carolina State University, 1977. 153p. (Tese de Doutorado)
- NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.
- PALMIERI, F. A study of a climosequence of soils derived from volcanic rock parent material in Santa Catarina and Rio Grande do Sul States, Brazil. West Lafayette, Purdue University, 1986. 259p. (Tese de Doutorado)
- PARFITT, R.L. Anion adsorption by soil and soil materials. *Adv. Agron.*, 30:1-50, 1978.
- PARFITT, R.L. Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. *J. Soil Sci.*, 40:359-369, 1989.
- RESENDE, M. Mineralogy, chemistry, morphology and geomorphology of some soils of the Central Plateau of Brazil. West Lafayette, Purdue University, 1976. 237p. (Tese de Doutorado)
- RESENDE, M.; BAHIA FILHO, A.F.C. & BRAGA, J.M. Mineralogia da argila de Latossolos estimada por alocação a partir do teor total de óxidos do ataque sulfúrico. *R. Bras. Ci. Solo*, 11:17-23, 1987.
- RODRIGUES NETTO, A. Influência da mineralogia da fração argila sobre propriedades físico-químicas de solos brasileiros. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1996. 144p. (Tese de Doutorado)
- ROLIM NETO, F.C. Gênese, química, mineralogia e micromorfologia de topolitosseqüências de solos do Alto Paranaíba, MG. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2002. 143p. (Tese de Doutorado)
- SANCHEZ, P.A. & UEHARA, G. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C. & KAMPRATH, E.J., eds. The role of phosphorus in agriculture. Madison, American Society of Agronomy, 1980. p.471-514.
- SANYAL, S.K. & De DATTA, S.K. Chemistry of phosphorus transformations in soil. *Adv. Soil Sci.*, 16:1-120, 1991.
- SCHAEFER, C.E.G.R.; GILKES, R.J. & FERNANDES, R.B.A. EDS/SEM study on microaggregates of Brazilian Latosols, in relation to P adsorption and clay fraction attributes. *Geoderma*, 20:1-33, 2003.
- SCHWERTMANN, U. Some properties of soil and synthetic iron oxides. In: STUCKI, J.W.; GOODMAN, B.A. & SCHWERTMANN, U., eds. Iron in soils and clay minerals. Dordrecht, Reidel, 1988. p.203-250.
- SCHWERTMANN, U. & KÄMPF, N. Properties of goethite and hematite in kaolinitic soils of Southern and Central Brazil. *Soil Sci.*, 139:344-350, 1985.
- SHOJI, S.; NANZYU, M. & DAHLGREN, R. Volcanic ash soils: genesis, properties and utilization. Amsterdam, Elsevier, 1993. 227p. (Developments in soil science: 21)

- SILVA, J.R.T. Solos do Acre: caracterização física, química e mineralógica e adsorção de fosfato. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 117p. (Tese de Doutorado)
- SINGH, R.; MÖLLER, M.R.F. & FERREIRA, W.A. Características da sorção do fósforo relacionadas com propriedades selecionadas de solos dos trópicos úmidos da Amazônia. R. Bras. Ci. Solo, 7:233-241, 1983.
- TORRENT, J.; SCHWERTMANN, U. & BARRÓN, V. Phosphate sorption by natural hematites. Eur. J. Soil Sci., 45:45-51, 1994.
- TORRENT, J.; SCHWERTMANN, U. & BARRÓN, V. Fast and slow phosphate sorption by goethite-rich natural materials. Clays Clay Miner., 1:14-21, 1992.