



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbcs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Brasil

MELO, V. F.; NOVAIS, R. F.; FONTES, M. P. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.
POTÁSSIO E MAGNÉSIO EM MINERAIS DAS FRAÇÕES AREIA E SILTE DE DIFERENTES SOLOS
Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 24, núm. 2, 2000, pp. 269-284
Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180218304005>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica
Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

SEÇÃO II - QUÍMICA E MINERALOGIA DO SOLO

POTÁSSIO E MAGNÉSIO EM MINERAIS DAS FRAÇÕES AREIA E SILTE DE DIFERENTES SOLOS⁽¹⁾

V. F. MELO⁽²⁾, R. F. NOVAIS⁽³⁾,
M. P. F. FONTES⁽³⁾ & C. E. G. R. SCHAEFER⁽³⁾

RESUMO

Os solos mais intemperizados, desenvolvidos nos trópicos úmidos, apresentam baixa reserva de nutrientes nas frações mais grosseiras. Para avaliar a presença de potássio e magnésio nos minerais, amostras das frações areia e silte de solos desenvolvidos de diferentes materiais de origem e estádios de intemperismo dos estados de MG, ES, RS e RR foram estudadas por difratometria de raios-X (DRX), análise termodiferencial, análise termogravimétrica diferencial e microscopia eletrônica. Os teores totais de elementos da TFSA e das frações do solo foram determinados por digestão fluorídrica das amostras. A fração silte também foi submetida a extrações sequenciais e seletivas dos minerais para estimar a contribuição das espécies minerais nos teores totais de K e Mg. A fração areia dos solos mais intemperizados é muito pobre em nutrientes, com predomínio de quartzo, indicando limitada reserva de K e Mg. Para os solos mais jovens, esta fração apresenta os maiores teores totais de K e Mg, superando as frações mais finas do solo, com presença de minerais primários, como mica, feldspato e anfibólio. Partículas de mica e agregados de caulinita foram as principais fontes de K e Mg totais para as frações areia e silte dos solos mais intemperizados. Os minerais micáceos nestes solos, identificados e analisados por microscopia eletrônica, apresentaram teores de K₂O variando de 33,3 a 62,8 e 27,4 a 98,1 g kg⁻¹ e de MgO de 76,5 a 116,8 e 19,7 a 68 g kg⁻¹ para as frações areia e silte, respectivamente. Devido aos baixos teores de mica na fração silte dos solos mais intemperizados (menor que 1%) e a alta proporção de quartzo, mesmo após a extração de caulinita, a concentração da amostra não foi suficiente para detecção de minerais micáceos por DRX. Apenas para o LV de Barroso (MG), verificou-se o aparecimento de discreta reflexão de mica.

Termos de indexação: reserva mineral, mica, caulinita, solos intemperizados.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do Primeiro Autor. Recebido para publicação em dezembro de 1998 e aprovado em março de 2000.

⁽²⁾ Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal do Paraná – UFPR. CEP 80035-050 Curitiba (PR).

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa – UFV. CEP 36571-000 Viçosa (MG). Bolsista do CNPq.

SUMMARY: POTASSIUM AND MAGNESIUM IN SAND AND SILT FRACTIONS OF DIFFERENT SOILS

The highly weathered soils developed in the humid tropics have low nutrient reserve in the coarse fractions. To evaluate K and Mg total contents in minerals in the sand and silt fractions, soil samples developed from different parent materials and weathering degree from MG, ES, RS and RR states, Brazil, were selected to be analyzed by X-ray diffraction (XRD), differential thermal analysis, thermogravimetry and electron microscopy. The total contents of K and Mg of the whole soil and its fractions were determined by HF extraction. To estimate the mineral contribution in the total contents of K and Mg, the silt fraction was submitted to mineral selective extractions. The sand fraction of the more weathered soils has very low K and Mg contents, with predominance of quartz. For the younger soils, this fraction showed higher K and Mg levels in the presence of primary minerals, such as mica, feldspar and amphibole. Mica particles and kaolinite flakes were the main sources of K and Mg for the sand and silt fractions of the highly weathered soils. The mica minerals were analyzed by electron microscopy, with K₂O contents ranging from 33.3 to 62.8 and 27.4 to 98.1 g kg⁻¹ and MgO contents from 76.5 to 116.8 and 19.7 to 68 g kg⁻¹ for sand and silt fractions, respectively. Because of low mica content in the silt fraction of the more weathered soils (less than 1%), and the high quartz level, even after kaolinite extraction, the mica was not detected by XRD. Only one soil showed a small mica peak.

Index terms: mineral reserve, mica, kaolinite, weathered soils.

INTRODUÇÃO

A argila é a principal fração do solo como fonte de K e Mg para as plantas (Smith & Mathews, 1957; Al-Kanani et al., 1984; Simard et al., 1989). Por outro lado, alguns trabalhos têm mostrado a importância das frações mais grosseiras como reserva desses nutrientes. Sadusky et al. (1987), estudando a cinética e os mecanismos de liberação de K de solos arenosos, encontraram que esses solos liberaram grande quantidade de K, justificando a ausência de respostas de plantas de milho à aplicação de fertilizantes potássicos. Grande parte dessa liberação ocorreu na fração areia, rica em feldspatos potássicos. Contudo, a fração areia de solos altamente intemperizados dos trópicos úmidos é constituída, principalmente, por quartzo e minerais resistentes, como rutilo, anatásio e zircão (Ricci et al., 1989; Santos, 1993; Melo et al., 1995).

Nos solos mais intemperizados, minerais resistentes que contêm K, como mica dioctaedral (muscovita) e vermiculita com hidróxi entrecamadas (VHE), podem resistir ao intemperismo (Malavolta, 1985; Rebertus et al., 1986) e serem responsáveis pelos baixos teores de K total normalmente encontrados nas frações areia e silte. Segundo Comerford et al. (1990), muitos solos arenosos da Flórida suportam ecossistemas nativos ou cultivados, apresentando apenas traços ou quantidades desprezíveis de K trocável decorrentes da presença de VHE. Alguns trabalhos em solos tropicais têm mostrado o efeito benéfico da retenção de K pelos

minerais VHE, evitando que o nutriente seja perdido por lixiviação e tornando-o disponível para as plantas ao longo dos cultivos (Sanz-Scovino & Rowell, 1988; Sanz-Scovino et al., 1992).

Este trabalho teve como objetivos avaliar a importância das frações silte e areia como reservas de K e Mg do solo, estudar a mineralogia e estimar a contribuição das espécies minerais nos teores totais de K e Mg dessas frações.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram selecionados 12 solos mais intemperizados desenvolvidos de diferentes materiais de origem (amostras 1 a 15). Com vistas em evidenciar a grande diferença na reserva de K e Mg conforme o estágio de desenvolvimento do solo, foram incluídos três solos mais jovens desenvolvidos de granito e gnaiss (amostras 16 a 21) (Quadro 1). De acordo com a profundidade dos solos, para os Argissolos, Luvissolos e Cambissolos, foram amostrados os horizontes B e C e, para os Latossolos, apenas o horizonte B, totalizando 21 amostras. O Argissolo Vermelho-Amarelo e os Cambissolos (amostras 16 a 21) localizam-se em áreas montanhosas e apresentam horizonte B pouco espesso, estrutura em blocos e os maiores teores de mica, feldspato e material amorfo na fração argila, sendo o horizonte C do PVA (amostra 17) o mais jovem, possuindo 28% de óxidos de ferro e alumínio extraídos pelo oxalato de amônio

Quadro 1. Solos amostrados, localização, material de origem e análise textural

Amostra	Classe ⁽¹⁾	Horiz.	Localização	Material de Origem	Análise textural ⁽³⁾				
					Argila	Silte	AF	AG	AT
					g kg ⁻¹				
1	Argissolo Amarelo 1 (PA)	B	Aracruz - ES	Grupo Barreiras ⁽²⁾	390	20	160	430	590
2	Argissolo Amarelo 1 (PA)	C	Aracruz - ES	Grupo Barreiras ⁽²⁾	630	10	90	270	360
3	Argissolo Amarelo 2 (PA)	B	Aracruz - ES	Grupo Barreiras ⁽²⁾	440	110	140	310	450
4	Argissolo Amarelo 2 (PA)	C	Aracruz - ES	Grupo Barreiras ⁽²⁾	440	130	130	300	430
5	Argissolo Amarelo 3 (PA)	B	Aracruz - ES	Grupo Barreiras ⁽²⁾	620	80	80	220	300
6	Argissolo Amarelo 3 (PA)	C	Aracruz - ES	Grupo Barreiras ⁽²⁾	440	60	70	430	500
7	Latossolo Amarelo 1 (LA)	B	Aracruz - ES	Grupo Barreiras ⁽²⁾	390	60	140	410	550
8	Latossolo Amarelo 2 (LA)	B	Aracruz - ES	Grupo Barreiras ⁽²⁾	240	140	190	430	620
9	Latossolo Amarelo (LA)	B	Boa Vista - RR	Grupo Barreiras ⁽²⁾	430	70	190	310	500
10	Latossolo Amarelo (LA)	B	Viçosa - MG	Embasamento Cristalino/Gnaisse	720	50	90	140	230
11	Latossolo Vermelho (LV)	B	Barroso - MG	Grupo Bambuí Calcário/pelíticas	500	210	110	180	290
12	Latossolo Vermelho (LV)	B	Ituiutaba - MG	Grupo Bauru/Arenito Adamantina	190	60	350	400	750
13	Argissolo Vermelho (PV)	B	Butiá - RS	Formação Rio Bonito/Arenito e Siltito	320	290	220	170	390
14	Latossolo Vermelho (LV)	B	Capinópolis - MG	Formação Serra Geral/Basalto	470	250	160	120	280
15	Latossolo Vermelho (LV)	B	Boa Vista - RR	Formação Apoteri/Basalto	610	150	110	130	240
16	Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA)	B	Aracruz - ES	Embasamento Cristalino/Granito	580	60	110	250	360
17	Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA)	C	Aracruz - ES	Embasamento Cristalino/Granito	30	260	170	540	710
18	Cambissolo Háplico (CX)	B	Butiá - RS	Embasamento Cristalino/Granito	400	150	200	250	450
19	Cambissolo Háplico (CX)	C	Butiá - RS	Embasamento Cristalino/Granito	150	100	390	360	750
20	Cambissolo Háplico (CX)	B	São Geraldo - MG	Embasamento Cristalino/Gnaisse	410	130	130	330	460
21	Cambissolo Háplico (CX)	C	São Geraldo - MG	Embasamento Cristalino/Gnaisse	190	180	200	430	630

⁽¹⁾ Classificação do solo até o nível de subordem, segundo EMBRAPA (1999). ⁽²⁾ Sedimentos inconsolidados litorâneos que estendem desde o Espírito Santo até à Bacia Amazônica, pobres em ferro e com predomínio de caulinita provenientes do desmonte de áreas continentais (granito/gnaiss). ⁽³⁾ AF = areia fina, AG = areia grossa e AT = areia total.

(Melo, 1998). A fração argila dos demais solos apresenta apenas quantidades traços de minerais primários facilmente intemperizáveis e maiores teores de minerais resistentes, como o anatásio (Melo, 1998).

A análise textural foi realizada de acordo com EMBRAPA (1979). Para a separar as frações, tomaram-se 80 g de cada amostra de solo para remoção de matéria orgânica, utilizando-se hipoclorito de sódio e dispersão do solo com NaOH 0,2 mol L⁻¹ (Jackson, 1979). A fração areia foi retida em peneira de 0,05 mm e as frações argila e silte foram separadas com base na lei de Stokes. Para garantir a separação das frações, o silte foi submetido à dispersão ultra-sônica por cinco minutos e o material resultante foi recolocado em recipiente próprio para a limpeza do silte por mais duas semanas.

As frações areia e silte foram analisadas por difratometria de raios-X (DRX) para identificação dos minerais presentes. Os difratogramas foram obtidos em goniômetro vertical Philips controlado por computador com velocidade de 1°2θ/min e amplitude de 4 a 65°2θ. O difratômetro, equipado com tubo de cobre e utilizando radiação CuKα, foi operado a 25 mA e 35 kV. Amostras da fração silte também foram estudadas por análise termogravimétrica (ATD) e análise termogravimétrica diferencial

(ATGD), utilizando-se atmosfera de nitrogênio e taxa de aquecimento de 10°C/min (Tan et al., 1986).

Para determinar os teores totais de elementos na TFSA e nas frações do solo, utilizou-se o método da digestão com ácido fluorídrico apresentado por Lim & Jackson (1986) com adaptações propostas por Melo (1998).

Selecionaram-se minerais que, aparentemente, eram fontes de K e Mg na fração areia das amostras 6, 9, 11, 13, 14, 15, 17, 19 e 21 (Quadro 1) para serem analisados por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os minerais selecionados foram montados sobre discos de alumínio, com auxílio de fita adesiva de dupla face, e recobertos com uma fina película de carbono (superfície condutora). Para estudar a fração silte, selecionaram-se as amostras 5, 6, 10, 11, 13, 14, 15, 19 e 21. Cerca de 0,6 mg de silte foi suspenso em 4 mL de água e, após dispersão ultra-sônica, três gotas da suspensão foram depositadas sobre o disco de alumínio com fita adesiva e deixadas em repouso para secar. As amostras foram também recobertas com película de carbono. As amostras das frações areia e silte foram examinadas em aparelho JEOL modelo JXA-840 acoplado com microsonda de dispersão de raios-X (MDRX) para análise química de partículas individuais. O aparelho foi operado a 20 kV e, na análise elementar quantitativa, utilizou-se o programa LINK-AN 10.000. Dado o maior

tamanho dos minerais da fração areia, a microanálise quantitativa foi realizada em três pontos distintos para obtenção de um valor médio representativo da composição química do mineral.

A fração silte foi submetida a extrações sequenciais e seletivas dos minerais para estimar a contribuição das espécies minerais nos teores totais de K e Mg. O esquema a seguir mostra a sequência de análises utilizadas para a fração silte: silte saturado com Na → extração de caulinita (aquecimento mais NaOH 0,5 mol L⁻¹) (Jackson, 1979; Jackson et al., 1986) → extração de óxidos de ferro, mica e demais minerais 2:1 [NaHSO₄(cristais)] (Jackson, 1979; Jackson et al., 1986) → extração de feldspato e outros minerais resistentes (digestão com HF) (Lim & Jackson, 1986). Após cada extração, os elementos foram determinados num aparelho Perkins de leitura simultânea dos elementos (plasma) e, para acompanhar as variações mineralógicas, os resíduos das extrações foram estudados por DRX. Detalhes sobre os métodos e adaptações utilizados nestas extrações podem ser obtidos em Melo (1998).

Foram feitas análises de correlação simples (Pearson) entre os teores dos elementos obtidos nas extrações sequenciais da fração silte por meio do programa estatístico SAEG, desenvolvido pelo Departamento de Biologia da Universidade Federal de Viçosa.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise textural

Em geral, as frações areia e argila são os principais constituintes dos solos estudados (Quadro 1). Os menores teores de argila são encontrados nos horizontes C dos solos mais jovens (amostras 17, 19 e 21) e no Latossolo desenvolvido de arenito (amostra 12). Os elevados teores de argila nos solos mais intemperizados são de extrema importância, haja vista que a fração areia destes solos é constituída basicamente de quartzo, com baixa reserva de nutrientes. Alguns Latossolos apresentaram altos teores de silte. Este fato pode ser atribuído à ineficiência do método de dispersão para solos mais intemperizados, com teores elevados de óxidos de ferro e gibbsita. O silte, nesses solos, é constituído por microagregados de minerais da fração argila com alta estabilidade, cimentados pelos óxidos de ferro. Resultados semelhantes foram obtidos por Netto (1996).

Teores totais de K e Mg

Os teores totais de K e Mg são baixos em solos mais intemperizados (amostras 1 a 15) (Quadro 2). Nesses solos, a fração areia é muito pobre em nutrientes, ressaltando a importância da fração argila. O LV de Ituiutaba (MG) (amostra 12)

apresenta baixos teores de K e Mg em decorrência do predomínio de areia (Quadro 1), sendo esta essencialmente quartzosa. Apesar da pobreza do material de origem (Arenito Bauru Formação Adamantina, constituído por grãos de quartzo e cimento argiloso, principalmente caulinita e hematita – RADAMBRASIL, 1983) e do alto grau de intemperismo, as frações mais finas desse solo apresentam teores relativamente altos de K e Mg, superando solos desenvolvidos de materiais mais ricos, como os LV desenvolvidos de basalto (amostras 14 e 15). Em geral, solos mais intemperizados revelaram teores totais de K e Mg similares para as frações argila e silte (Quadro 2). Contudo, a contribuição relativa da fração silte nos teores totais do solo é pequena em virtude da menor percentagem desta fração (Quadro 1).

Os altos teores de K e Mg nos solos mais jovens (amostras 16 a 21) são atribuídos à idade e à riqueza em minerais primários. Nesses solos, os teores totais de K e Mg das frações areia e silte foram superiores aos obtidos para a fração argila. Nos solos jovens, os minerais primários presentes nas frações mais grosseiras encontram-se num estágio menos avançado de intemperismo, preservando as formas estruturais de K e Mg.

Os menores teores de K e Mg para o LV de Boa Vista (RR) (amostra 15) em relação ao LV de Capinópolis (MG) (amostra 14) podem ser devidos a diferenças mineralógicas do basalto de origem, clima mais favorável ao intemperismo e maior perda de nutrientes em Roraima (alta precipitação e temperatura). Outra possibilidade é a presença de microestruturas no LV de Capinópolis (MG), formadas por cimentação de microagregados da rocha original semi-intemperizada, promovida pelo processo de latossolização, preservando estas estruturas ocluídas por películas de óxidos de ferro. Por outro lado, apesar da distância geográfica (Espírito Santo e Roraima), os LA do Grupo Barreiras (amostras 7, 8 e 9) apresentam teores semelhantes de nutrientes.

Mineralogia da fração areia e sua relação com os teores totais de K e Mg

Em geral, as amostras da fração areia dos solos desenvolvidos do Grupo Barreiras são constituídas em quase sua totalidade por grãos de quartzo. Apenas em alguns horizontes, verifica-se discreta reflexão de caulinita presente na forma de agregados (amostras 2, 4, 5 e 6). O difratograma de raios-X da fração areia da amostra 5 é apresentado na figura 1a. Contudo, com utilização de lupa, foi possível selecionar outros minerais na fração areia destes solos, tais como mica e agregados de Si, Al e Fe, para serem estudados por microscopia eletrônica de varredura (MEV) (Figura 2 e Quadro 3). Por serem minerais traços, não foi possível identificá-los por difratometria de raios-X (DRX). Pequena quantidade de minerais micáceos, considerando os altos teores

Quadro 2. Teores totais de K e Mg na terra fina seca ao ar (TFSA) e nas frações argila, silte e areia de amostras dos solos⁽¹⁾

Amostra	Classe	Horizonte	TFSA		Argila		Silte		Areia	
			K	Mg	K	Mg	K	Mg	K	Mg
mg kg ⁻¹										
1	PA 1	B	185	136	341	247	128	270	11	50
2	PA 1	C	209	129	286	179	322	322	12	49
3	PA 2	B	105	144	197	226	104	181	11	42
4	PA 2	C	99	115	181	138	221	172	11	80
5	PA 3	B	151	162	214	181	201	231	19	43
6	PA 3	C	191	111	371	167	358	245	13	44
7	LA 1	B	162	129	338	240	278	301	14	34
8	LA 2	B	211	135	451	268	225	317	40	47
9	LA	B	178	100	406	176	229	159	34	18
10	LA	B	170	135	252	142	697	593	89	42
11	LV	B	1.103	386	1.303	413	2.202	1.025	267	58
12	LV	B	359	443	926	1.533	1.143	1.757	126	168
13	PV	B	2.408	1.104	4.277	2.333	2.020	292	321	43
14	LV	B	282	880	398	737	406	2.234	55	450
15	LV	B	149	413	256	441	261	409	95	106
16	PVA	B	16.271	8.124	6.215	8.445	45.351	12.724	25.232	4.684
17	PVA	C	45.715	12.702	3.436	2.649	37.382	11.979	49.352	10.109
18	CX	B	20.474	1.409	5.078	1.551	28.102	1.531	25.177	458
19	CX	C	44.756	2.052	5.461	1.666	29.762	2.438	58.434	1.525
20	CX	B	6.526	5.183	2.312	2.362	8.113	6.338	7.693	5.508
21	CX	C	9.425	12.452	4.083	6.405	10.114	11.902	9.250	12.646

⁽¹⁾ Digestão da amostra com ácido fluorídrico (Lim & Jackson, 1986).

de K e Mg, é suficiente para fornecer os teores totais obtidos na fração areia das amostras 1 a 9 (Quadro 2). Unamba-Oparah (1985), trabalhando com solos altamente intemperizados da Nigéria, verificou que grande parte da reserva de K dos solos nas frações areia fina e silte era devida à presença de partículas de muscovita e flocos de mica.

Considerando os demais solos mais intemperizados (amostras 10 a 15), verificou-se que a mineralogia da fração areia foi semelhante à obtida para os solos desenvolvidos de sedimentos do Grupo Barreiras, com predomínio de quartzo e presença de minerais traços em algumas amostras: amostras 10 e 11 com traços de gibbsita e 14 e 15 com traços de hematita. O maior teor de K na fração areia do PV de Butiá (RS) (amostra 13), entre os solos mais intemperizados (Quadro 2), pode ser atribuído à maior presença de minerais micáceos (Figura 2b e Quadro 3).

Os agregados, principalmente com maior teor de silício, podem ser fontes de K e Mg não-trocáveis (amostras 13 e 14 - Quadro 3). A maior presença de K nos agregados ricos em silício fica clara nos agregados de caulinita da amostra 19 (Figura 2j,k). O teor médio de K₂O nestes agregados é de 5,1 g kg⁻¹ (Quadro 3). A composição química (K_i = 2,08) e a presença de camadas no interior do mineral (Figura 2k) evidenciam que os minerais são

agregados de caulinita. A importância desses agregados como fontes de K e Mg estruturais pode ser significativa, principalmente para solos mais intemperizados com predomínio de quartzo na fração areia.

Mesmo com predomínio de quartzo, a fração areia dos solos mais jovens (amostras 16 a 21) apresenta minerais primários, tais como: mica, feldspato e anfibólio (hornblenda) (Figuras 1 e 2), responsáveis pelos altos teores totais de K e Mg (Quadro 2). A fração areia do horizonte C desses solos, em relação ao horizonte B, é mais rica em mica e feldspatos e apresenta maiores teores de K e Mg totais (Quadro 2). A fração areia do CX de São Geraldo (MG) (amostra 21) é a amostra com maior abundância em minerais 2:1, com predomínio de pequenas partículas de biotita/esmectita. O menor teor de K total entre as amostras de solos jovens deve-se ao baixo teor de K destes minerais em relação às partículas dos demais solos (Quadro 3) e à menor presença de feldspato. As partículas de biotita sofreram intemperismo com perda de K e aumento do espaço interplanar (biotita/VHE e biotita/esmectita) (Figura 1d). Os altos teores de Mg total para esta amostra (Quadro 2) são atribuídos à presença de minerais micáceos e hornblenda (Figura 2e e Quadro 3).

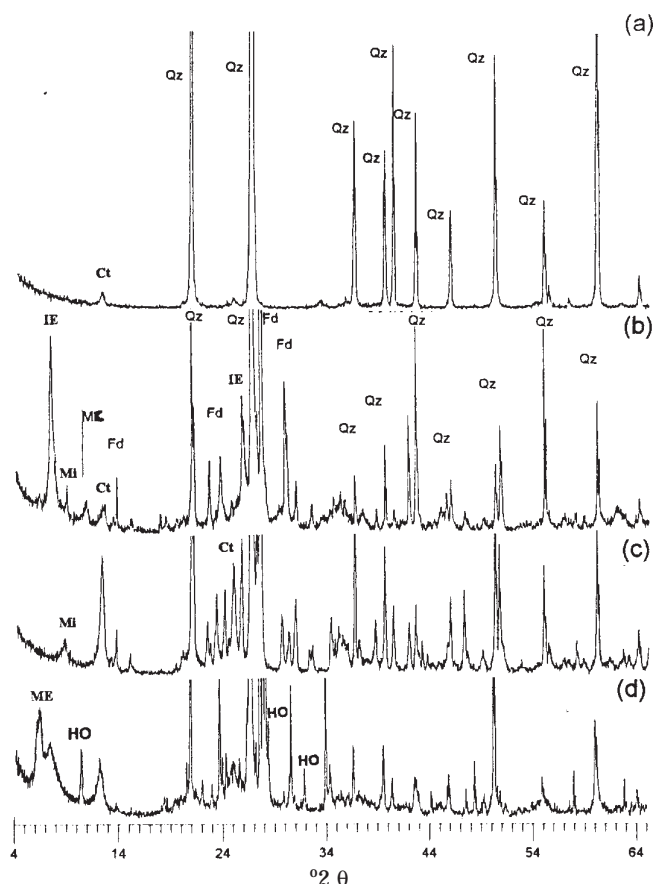


Figura 1. Difratoograma de raios-X de amostra não orientada da fração areia das amostras 5 (a), 17 (b), 19 (c) e 21 (d): IE - interestratificado bitotita/VHE, Mi - mica, MC - mica/caulinita, Ct - caulinita, Fd - feldspato potássico, Qz - quartzo, ME - mica/esmectita e Ho - hornblenda.

Quadro 3. Composição química de partículas individuais da fração areia de amostras dos solos⁽¹⁾

Amostra	Classe	Horizonte	Partícula/Mineral	Figura	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	MgO	CaO	Na ₂ O
g kg ⁻¹												
6	PA3	C	Biotita	2a	401,9	170,0	193,6	37,6	62,8	116,8	0,0	13,0
13	PV	B	Biotita	2b	439,9	283,3	131,9	15,2	33,3	76,5	0,8	119,8
13	PV	B	Agregado caulinita - óxidos de ferro	-(2)	171,2	162,8	626,3	6,0	2,9	6,0	1,8	23,3
11	LV	B	Agregado Al/Fe	2h	24,6	431,8	521,7	14,5	0,9	4,0	0,6	1,8
14	LV	B	Agregado Fe/Si-Al	2i	27,8	55,5	895,7	9,7	0,0	1,3	0,0	9,3
14	LV	B	Agregado caulinita - óxidos de ferro	-(2)	344,5	321,6	300,8	13,5	2,2	8,9	1,2	7,5
19	CX	C	Agregado de caulinita	2j e 2k	543,3	443,0	4,2	0,0	5,1	1,0	0,2	3,6
17	PVA	C	Biotita	2c	401,2	165,0	208,0	39,1	59,4	113,7	0,0	11,4
17	PVA	C	Ortoclásio	2f	634,6	190,8	2,0	0,4	163,9	1,3	0,0	7,0
19	CX	C	Microclínio	2g	644,3	183,3	1,7	0,0	166,6	0,0	0,0	4,0
19	CX	C	Muscovita	2d	485,1	350,2	26,2	1,9	112,1	10,8	0,0	4,9
21	CX	C	Biotita	-(2)	456,8	317,0	114,1	13,9	27,0	56,0	0,0	14,9
21	CX	C	Hornblenda	2e	429,5	117,1	194,6	6,9	13,4	100,4	117,5	20,9
21	CX	C	Biotita ⁽³⁾	-(2)	398,5	237,8	199,1	26,0	12,4	104,6	4,6	9,1

⁽¹⁾ Análise química por meio de microsonda de dispersão de raios-X (microscopia eletrônica de varredura). Valores médios das microanálises em três pontos distintos em cada partícula. ⁽²⁾ Partículas da fração areia analisadas por MDRX e que não foram micrografadas. ⁽³⁾ Pequenas partículas de biotita/esmectita, de acordo com os difratogramas de raios-X.

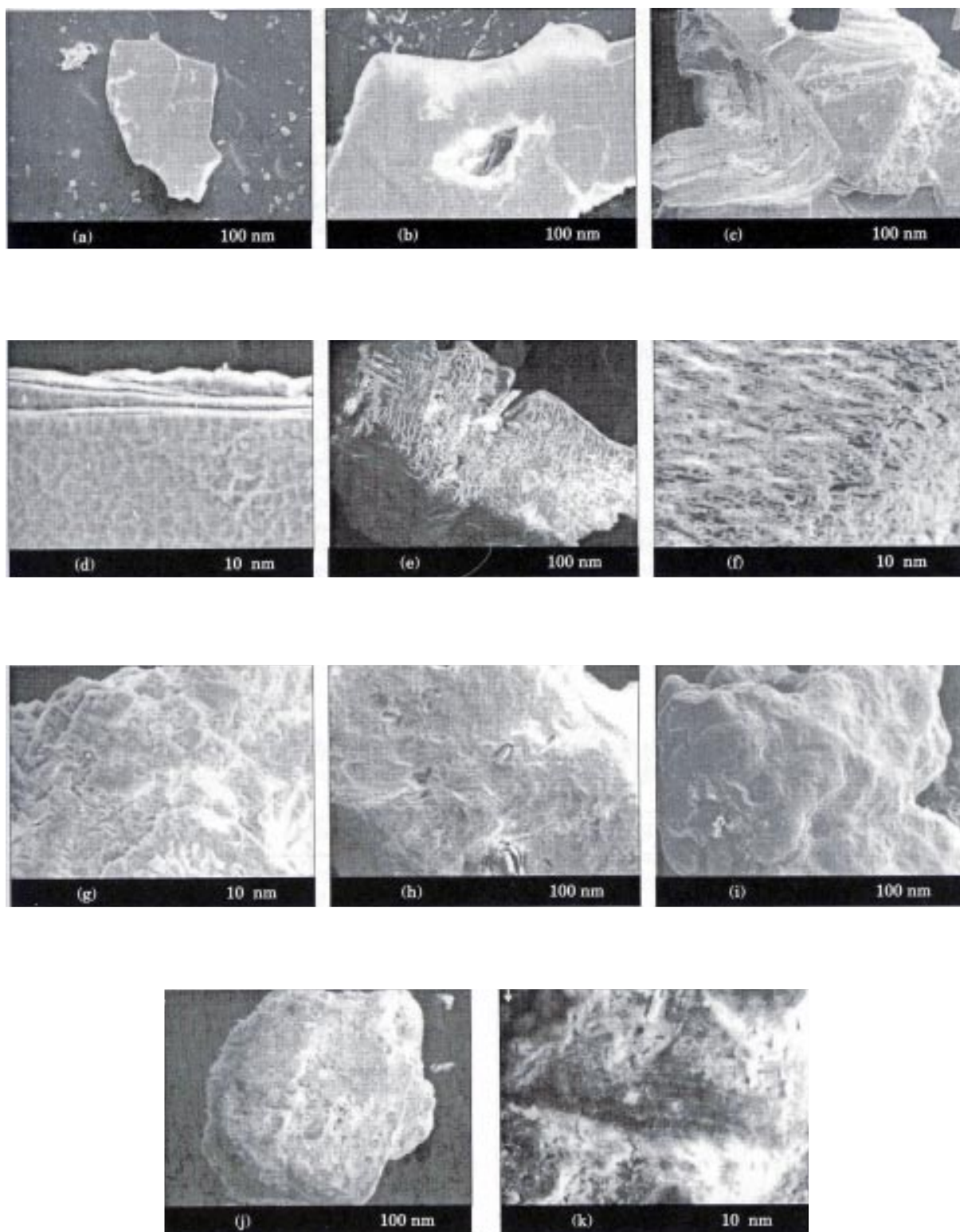


Figura 2. Micrografias (MEV) de partículas de biotita (a - amostra 6, b - amostra 13 e c - amostra 17), muscovita (d - amostra 19), hornblenda (e - amostra 21), ortoclásio (f - amostra 17), microclínio (g - amostra 19), agregado de Fe e Al (h - amostra 11), agregado de Fe, Al e Si (i - amostra 14) e agregado de caulinita com detalhe das camadas do mineral (j e k - amostra 19) presentes na fração areia dos solos.

As partículas de feldspato no CX de Butiá (RS) (amostra 19) estão menos intemperizadas que as do PVA de Aracruz (ES) (amostra 17). A superfície do feldspato da amostra 19 é mais lisa, indicando menor grau de intemperismo (Figuras 2f,g); contudo, os teores de K_2O são semelhantes (Quadro 3). O maior teor de K total da fração areia para a amostra 19 (Quadro 2) é atribuído à maior quantidade de feldspato potássico (maior intensidade das reflexões do mineral por DRX). Com base nas reflexões dos difratogramas das frações areia, silte e argila (DRX), os feldspatos das amostras 17 e 19 foram identificados como ortoclásio e microclínio, respectivamente. Dentro do grupo feldspato potássico, o microclínio é mais estável que o ortoclásio (Barshad, 1965; Huang, 1989). Segundo esses autores, esta diferença é devida ao menor volume ocupado pelos átomos de oxigênio no microclínio (sistema triclínio), quando comparado com o sistema monoclinóio do ortoclásio.

Fração Silte

Análise sequencial da fração silte

Extração de caulinita - O aquecimento a 550°C por quatro horas provocou uma redução de peso da amostra em decorrência da perda da água adsorvida entre 105 e 350°C e desidroxilação da caulinita e gibbsita nas amostras em que o mineral estava presente (4, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 20 e 21). De

acordo com Jackson (1979), a quantidade de água estrutural, na forma de hidroxila, para a caulinita e a gibbsita, em minerais padrão, é de 14 e 34,6%, respectivamente. Com a perda de água, a caulinita transforma-se em material amorfo e a gibbsita em $\alpha-Al_2O_3$ (Jackson et al., 1986).

A remoção restante é devida ao tratamento com NaOH 0,5 mol L⁻¹ que promove a extração do material amorfo desidratado, liberando Si, Al e demais elementos constituintes. Em razão da alta estabilidade, apenas pequena parte do $\alpha-Al_2O_3$ pode ser removida pela solução de NaOH (Jackson et al., 1986). A extração total, aquecimento mais NaOH, é apresentada no quadro 4. Os teores de Mg e Ca extraídos são baixos e os de K apresentam maiores valores para os solos mais jovens.

Extração de óxidos de ferro, mica e demais minerais 2:1 - Após a extração da caulinita, a fração silte foi submetida ao tratamento com NaHSO₄ para extração de óxidos de ferro, mica e demais minerais 2:1, o que resultou numa redução de peso da amostra de 7 a 80% (Quadro 5). Esta variação é devida às diferenças mineralógicas da fração silte dos solos. Os menores valores de extração estão relacionados com amostras com predomínio de quartzo e, por outro lado, maiores extrações são atribuídas à maior presença de óxidos de ferro e gibbsita, com maior liberação de Fe e Al. O Ti obtido é devido à dissolução

Quadro 4. Teores de elementos e óxidos obtidos com a extração de caulinita nos tratamentos sequenciais da fração silte de amostras dos solos⁽¹⁾

Amostra	Classe	Horizonte	Remoção ⁽²⁾	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K	Mg	Ca
			%	g kg ⁻¹			mg kg ⁻¹		
1	PA 1	B	5,73	25,4	18,2	0,6	30,71	0,93	1,15
2	PA 1	C	51,48	239,3	202,8	3,7	102,37	0,23	0,37
3	PA 2	B	2,94	12,0	10,7	0,3	12,87	0,93	2,10
4	PA 2	C	60,63	280,1	244,3	4,3	83,60	0,38	0,00
5	PA 3	B	25,28	114,7	93,6	1,9	32,24	0,62	0,00
6	PA 3	C	31,48	138,7	113,4	1,4	99,54	0,17	0,00
7	LA 1	B	6,53	28,0	22,0	0,7	35,29	0,11	0,90
8	LA 2	B	7,87	36,0	26,9	0,5	6,64	0,80	1,32
9	LA	B	2,88	12,6	10,0	0,5	5,93	0,49	0,96
10	LA	B	16,81	53,9	61,0	0,2	37,08	0,32	0,00
11	LV	B	35,38	39,3	121,9	0,1	464,05	0,39	0,00
12	LV	B	4,85	21,2	18,3	0,2	196,59	0,67	0,00
13	PV	B	1,15	5,3	3,2	0,2	82,26	0,72	1,26
14	LV	B	8,66	33,6	31,2	0,3	73,57	0,01	0,00
15	LV	B	51,94	238,0	205,9	2,2	105,33	0,00	2,41
16	PVA	B	10,15	31,3	26,3	0,7	215,42	1,92	0,00
17	PVA	C	29,39	102,3	103,9	1,1	570,37	1,20	0,00
18	CX	B	40,39	171,1	143,6	2,1	1.279,37	0,91	0,00
19	CX	C	45,30	195,4	156,3	2,8	1.827,67	1,32	0,00
20	CX	B	35,09	126,2	112,1	1,4	881,58	17,99	0,00
21	CX	C	32,19	121,5	104,4	1,2	1.096,06	16,90	0,00

⁽¹⁾ Extração pelo aquecimento a 550°C e NaOH 0,5 mol L⁻¹. ⁽²⁾ Remoção = redução em peso da amostra pelo tratamento com aquecimento a 550°C e NaOH 0,5 mol L⁻¹ [(peso inicial da amostra - peso final)/peso inicial] x 100.

de anatásio pelo tratamento. A diferença entre remoção com base no peso e a soma dos óxidos devem-se, principalmente, à formação de precipitado de baixa cristalinidade de Si-S durante a extração (Melo, 1998). O consumo de Si para a formação do mineral de baixa cristalinidade fez com que os valores para a relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ fossem baixos. Segundo Jackson et al. (1986), a formação deste mineral após o tratamento com NaHSO_4 é devida à precipitação do Si proveniente dos minerais silicatados dissolvidos com o S do sal utilizado.

Em geral, os teores de K e os valores estimados de mica são baixos (Quadro 5). Por esta razão, os minerais micáceos da fração silte dos solos mais intemperizados não foram detectados por DRX. Mesmo após o tratamento com aquecimento e NaOH $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ para os solos mais intemperizados com maior teor de caulinita, a concentração da amostra não foi suficiente para detecção de minerais micáceos (DRX) em razão do alto teor de quartzo. Somente para o LV de Barroso (MG) (amostra 11), verificou-se o aparecimento de discreta reflexão de mica (Figura 3). Nessa amostra, obteve-se a maior percentagem de mica entre os solos mais intemperizados, extraída com NaHSO_4 (Quadro 5). Contudo, em algumas amostras, partículas de mica foram identificadas (MEV) e analisadas por MDRX (Quadro 6).

A extração da caulinita da fração silte nos solos mais jovens intensificou a reflexão de mica (Figura 3 - amostra 19). A baixa cristalinidade do mineral de Si-S formado após a extração com NaHSO_4 pode ser comprovada pela grande largura a meia altura de sua reflexão. Para os solos mais jovens (amostras 16 a 21), os minerais micáceos apresentaram o mesmo comportamento observado para a fração argila (Melo, 1998). Os minerais interestratificados de mica/VHE presentes nas amostras 16, 17, 20 e 21 apresentaram reflexão característica em 12 \AA e a mica das amostras 18 e 19 em 10 \AA (Figura 3). Micrografias desses minerais são apresentadas na figura 4a,b. Os teores de K e Mg para as amostras com mica/VHE (16, 17, 20 e 21) são próximos (Quadro 5), indicando que o mineral é resultante do intemperismo de biotita. Possivelmente, a presença de VHE conferiu maior estabilidade à biotita, reduzindo o intemperismo do mineral interestratificado. Nas amostras 18 e 19, os teores de K foram muito superiores aos de Mg, indicando que a muscovita é a principal mica da fração silte destas amostras. Outros autores relataram a presença de mineral interestratificado mica/VHE (Nwadiolo & Lietzke, 1989) e VHE em fase separada na fração silte de solos (Harris et al., 1988; Comerford et al., 1990; Sanz-Scovino et al., 1992).

Os teores de Mg para os LV desenvolvidos de basalto (amostras 14 e 15) foram muito superiores

Quadro 5. Teores de elementos e óxidos obtidos com a extração de óxidos de ferro, mica e demais minerais 2:1 nos tratamentos sequenciais da fração silte de amostras dos solos⁽¹⁾

Amostra	Classe	Horizonte	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Total ⁽²⁾	Remoção ⁽³⁾	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	K	Mg	Ca	Mn	Mica ⁽⁴⁾
g kg ⁻¹								%	mg kg ⁻¹					
1	PA 1	B	0,4	0,0	6,0	10,2	16,7	8,39	0,00	27,7	90,5	20,1	97,4	0,03
2	PA 1	C	2,8	106,4	45,5	36,2	191,1	24,52	0,03	192,8	486,8	351,2	163,3	0,23
3	PA 2	B	0,5	0,0	4,5	11,1	16,2	12,24	0,00	27,4	68,0	134,3	99,3	0,03
4	PA 2	C	2,7	141,9	57,5	46,0	248,4	31,09	0,02	102,0	324,3	79,8	160,4	0,12
5	PA 3	B	1,5	27,3	75,7	23,6	128,2	20,86	0,05	55,9	164,4	128,4	129,4	0,07
6	PA 3	C	1,1	27,0	137,9	34,9	201,1	28,61	0,04	226,2	220,1	362,7	146,2	0,27
7	LA 1	B	0,9	1,3	10,9	16,4	29,7	12,73	0,67	102,6	173,7	105,9	140,4	0,12
8	LA 2	B	0,6	2,2	9,2	13,3	25,5	8,50	0,28	100,0	167,1	93,3	115,5	0,12
9	LA	B	0,4	0,0	1,2	3,8	5,5	12,24	0,00	150,0	68,6	48,5	88,0	0,18
10	LA	B	0,8	32,2	99,0	90,7	223,8	31,39	0,03	202,2	462,2	361,4	660,1	0,24
11	LV	B	2,1	411,2	220,6	5,1	639,9	79,99	0,01	2.113,6	724,6	476,8	607,2	2,55
12	LV	B	0,8	7,3	94,4	47,2	152,8	23,95	0,11	646,4	742,4	83,3	1.898,0	0,78
13	PV	B	0,3	0,6	6,9	9,5	17,5	7,32	0,57	382,0	156,5	51,1	110,4	0,46
14	LV	B	1,1	17,6	399,8	138,6	563,2	60,72	0,06	194,1	1.392,3	295,7	3.784,4	0,23
15	LV	B	1,8	109,7	275,0	42,0	433,5	52,60	0,02	104,0	789,9	481,2	3.190,9	0,13
16	PVA	B	1,3	49,6	77,9	22,2	151,7	27,92	0,03	11.237	12.182	234,4	446,4	13,54
17	PVA	C	3,9	195,8	102,5	10,8	313,8	46,66	0,02	15.859	15.806	283,8	492,7	19,10
18	CX	B	2,2	201,4	49,0	6,6	259,9	34,36	0,01	7.055,8	2.352,7	216,5	388,3	8,50
19	CX	C	2,3	205,9	40,5	6,9	256,6	34,72	0,01	12.476	4.279,1	101,1	650,0	15,03
20	CX	B	3,3	247,0	211,4	39,5	502,6	61,18	0,01	9.636	8.731,6	833,3	837,9	11,61
21	CX	C	4,2	227,3	219,0	29,1	481,6	63,92	0,02	11415,1	16.501	1.564,5	1.271,4	13,75

⁽¹⁾ Extração com NaHSO_4 . ⁽²⁾ Total = soma dos óxidos ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{TiO}_2 + \text{MnO}_2 + \text{K}_2\text{O} + \text{MgO} + \text{CaO}$). ⁽³⁾ Remoção = redução em peso da amostra pelo tratamento com NaHSO_4 [(peso inicial - peso final)/peso inicial] x 100. ⁽⁴⁾ Teor de mica estimado considerando uma concentração média de 100 g kg^{-1} de K_2O .

Quadro 6. Composição química de partículas individuais de mica e de feldspato presentes na fração silte de amostras dos solos⁽¹⁾

Amostra	Classe	Horizonte	Partícula	Figura	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	MgO	CaO	Na ₂ O
g kg ⁻¹												
5	PA3	B	Biot.	-	472,8	273,5	115,1	16,9	46,2	68,0	0,8	6,6
11	LV	B	Musc.	-	486,5	348,9	26,8	16,1	98,1	20,6	0,2	5,3
14	LV	B	Biot.	-	505,0	247,9	149,1	40,1	27,4	19,7	4,9	5,5
19	CX	C	Musc.	4a	506,8	356,2	36,6	4,0	61,0	19,0	5,7	5,4
21	CX	C	IE	4b	405,2	223,1	170,8	23,9	33,1	129,0	2,3	12,1
11	LV	B	FdK	4e	706,2	183,3	12,1	7,4	76,3	6,1	1,0	0,0
14	LV	B	Plag.	4c	563,6	241,7	37,2	21,1	3,6	0,9	51,0	84,2
19	CX	C	Plag.	4d	614,0	248,0	2,0	0,0	3,2	2,0	55,3	83,0
21	CX	C	FdK	-	648,1	192,3	2,6	0,2	153,9	2,2	0,0	6,4

⁽¹⁾ Análise química por meio de microsonda de dispersão de raios-X (microscopia eletrônica de varredura). Valores médios das análises de diferentes partículas do mesmo mineral. Partículas: Musc. - muscovita, IE - interestratificado biotita/VHE, Biot. - biotita, FdK - feldspato potássico e Plag. - plagioclásio Ca/Na.

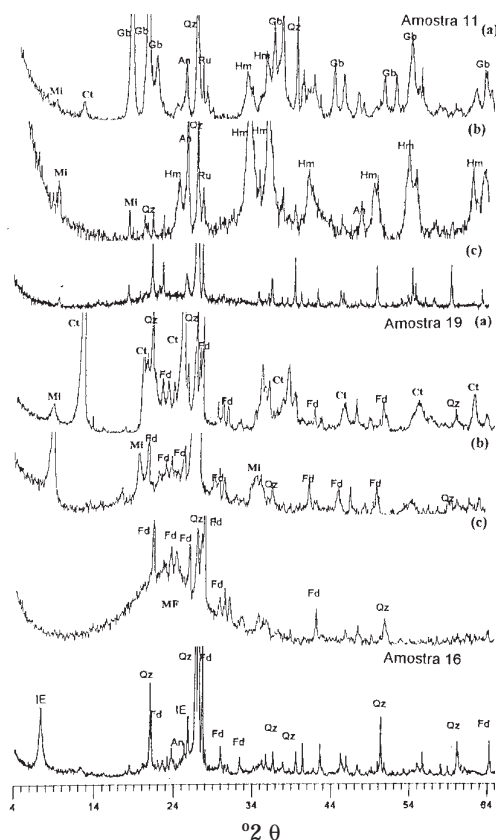


Figura 3. Difratogramas de raios-X da fração silte das amostras 11 e 19 mostrando a mineralogia com os tratamentos sequenciais [sem tratamento (a), após aquecimento e NaOH 0,5 mol L⁻¹ (b) e após NaHSO₄ (c)] e da amostra 16 sem tratamento: Mi - mica, IE - interestratificado biotita/VHE, Ct - caulinita, Gb - gibbsita, Qz - quartzo, An - anatásio, Ru - rutilo, Hm - hematita, Fd - feldspato e MF - mineral formado após NaHSO₄.

aos de K (Quadro 5), provavelmente, pela presença de minerais ferromagnesianos, como os piroxênios.

Dissolução final do resíduo (extração de feldspato) - Considerando os elementos extraídos pelo HF, a soma dos óxidos fica muito distante de 100% (Quadro 7). A fração silte das amostras é constituída predominantemente por quartzo e o Si é perdido durante a digestão com HF na forma de gás SiF₄ (Lim & Jackson, 1986). A baixa soma dos óxidos para o LV de Boa Vista (RR) (amostra 15) concorda com a reflexão de alta intensidade de quartzo (DRX) observada nesta amostra (Melo, 1998).

O K, Na e Ca obtidos são provenientes da dissolução de feldspato potássico, albita e anortita, respectivamente. A abundância de feldspato potássico nas amostras 16, 17, 18 e 19 justifica os elevados teores de K obtidos. Estas amostras apresentam reflexão de alta intensidade em 3,2 Å (Figura 3). Partículas de feldspato potássico e plagioclásio Ca/Na foram identificadas por MEV e analisadas por MDRX (Figura 4d e Quadro 6). Mesmo nos solos mais intemperizados, por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e transmissão (MET), foi possível identificar partículas de feldspato para a fração silte (Figura 4c,e e Quadro 6).

A alta correlação entre Al e K ($r = 0,97^{***}$) e Al e Na ($r = 0,71^{***}$) comprova que a liberação de K e Na no resíduo foi devida à dissolução de feldspato. A associação entre albita e anortita é evidenciada pela correlação significativa entre Na e Ca ($r = 0,91^{***}$) e pelas análises químicas de partículas de plagioclásio (Quadro 6). A alta correlação entre Ti e Fe ($r = 0,99^{***}$) é devida à presença de formas resistentes destes elementos, dissolvidas pelo HF.

Quadro 7. Teores de elementos e óxidos obtidos com a extração de feldspato e outros minerais resistentes nos tratamentos sequenciais da fração silte de amostras dos solos⁽¹⁾

Amostra	Classe	Horizonte	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Total ⁽²⁾	Zr	K	Na	Mg	Ca	FdK ⁽³⁾
			g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹			%
1	PA 1	B	2,5	6,1	10,8	20,5	257	102	168	101	99	0,07
2	PA 1	C	3,3	2,5	6,7	14,5	243	199	580	144	227	0,14
3	PA 2	B	1,9	7,4	15,0	25,4	296	99	113	109	114	0,07
4	PA 2	C	2,5	3,0	8,4	16,5	264	149	1.059	119	213	0,11
5	PA 3	B	1,7	5,5	12,0	20,7	398	126	200	116	161	0,09
6	PA 3	C	1,8	3,6	17,7	25,2	671	181	319	107	206	0,13
7	LA 1	B	4,1	3,6	9,4	18,6	440	178	185	110	141	0,13
8	LA 2	B	5,2	2,8	7,1	16,4	358	147	186	99	153	0,11
9	LA	B	2,1	1,9	2,2	8,0	649	148	225	79	168	0,11
10	LA	B	2,7	44,3	54,0	105,9	1.611	735	416	326	326	0,56
11	LV	B	16,1	24,0	49,1	99,3	618	1.942	1.693	1.948	877	1,39
12	LV	B	2,0	47,3	71,6	123,8	193	478	303	773	221	0,34
13	PV	B	3,5	1,5	2,0	10,2	79	1.435	543	137	233	1,02
14	LV	B	3,0	199,3	211,3	418,6	443	308	366	1.866	298	0,22
15	LV	B	2,1	2,0	2,2	8,4	135	252	668	154	366	0,18
16	PVA	B	82,6	10,2	10,4	171,2	183	43.816	6.842	807	3.711	31,29
17	PVA	C	76,0	1,6	1,8	145,9	11	50.472	3.991	101	361	36,05
18	CX	B	76,3	1,5	0,9	148,7	127	55.444	2.164	67	202	39,60
19	CX	C	81,9	2,0	0,4	159,5	184	58.822	3.021	70	223	42,01
20	CX	B	32,4	2,7	1,0	57,6	95	8.513	4.762	770	2.559	6,08
21	CX	C	37,5	3,4	0,7	70,6	29	8.161	8.423	705	5.049	5,82

⁽¹⁾ Digestão da amostra com ácido fluorídrico. ⁽²⁾ Total = soma dos óxidos (Al₂O₃ + TiO₂ + Fe₂O₃ + ZrO₂ + K₂O + NaO + MgO + CaO).

⁽³⁾ Teor de feldspato potássico estimado, considerando uma concentração média de 168 g kg⁻¹ de K₂O.

Contribuição dos minerais extraídos nas análises sequenciais no peso da amostra e mineralogia da fração silte

Considerando a abundância de quartzo no silte, em geral, o residuo obtido após o tratamento com NaHSO₄ representa o principal constituinte dessa fração, uma vez que o quartzo é resistente a este tratamento (Quadro 8). Para a maioria das amostras, a percentagem de quartzo é superior a 50% (Quadro 9). A quantidade de quartzo é menor nas amostras com maior percentagem de caulinita, gibbsita, hematita, minerais micáceos e feldspato potássico. O elevado teor de anatásio, na amostra 14, de ortoclásio, nas amostras 16 e 17, e de microclínio, nas amostras 18 e 19 (Quadro 9), faz com que grande parte do residuo (HF) (Quadro 8) seja formado por estes minerais em detrimento ao quartzo. A percentagem de anatásio e zirconita foi estimada com base nos teores totais de TiO₂ e ZrO₂ da fração silte sem tratamento. A caulinita e a gibbsita foram estimadas pelos diagramas da ATGD.

Verifica-se aumento no teor de caulinita do horizonte B para o C nos PA desenvolvidos de sedimentos do Grupo Barreiras (amostras 1 a 6) (Quadro 9), o que resultou numa maior extração pelo NaOH 0,5 mol L⁻¹ (Quadro 8). Esta tendência também foi verificada para a fração argila (Melo, 1998), provavelmente, pelo fato de o horizonte C constituir um ambiente mais conservador, preservando a caulinita nesta fração. Outra possibilidade é que o

sedimento do Grupo Barreiras depositado na subsuperfície era mais rico em caulinita. A caulinita é o principal mineral da fração silte das amostras 15 e 19 e a gibbsita da amostra 11 (Quadro 9). O alto teor de quartzo do arenito de origem do LV de Ituiutaba (MG) (amostra 12) e do PV de Butiá (RS) (amostra 13) determinou a alta percentagem do mineral na fração silte. Em geral, a quantidade de mica e feldspato no silte dos solos mais intemperizados (amostras 1 a 15) é inferior a 0,5% (minerais traços) (Quadro 9).

O Fe₂O₃ total das amostras sem tratamento, após descontar o Fe₂O₃ da biotita, foi alocado à goethita e hematita (Quadro 9). Nas amostras em que se observaram reflexões por DRX de goethita e hematita (amostras 6, 18 e 19), a alocação foi feita com base na relação Gt/(Gt + Hm) (Torrent & Cabedo, 1989). Mesmo com baixos teores na fração silte, a identificação da goethita e hematita por DRX foi favorecida pela concentração desses minerais após a extração da caulinita (aquecimento e NaOH 0,5 mol L⁻¹). O teor de hematita do LV de Capinópolis (MG) (amostra 14) está superestimado pela presença de ilmenita e pequena quantidade de maghemita na fração silte. Os altos teores de Fe₂O₃ pelo HF (Quadro 7) são devidos à dissolução de ilmenita (FeO.TiO₂) e, principalmente, de hematita que resistiram ao tratamento com NaHSO₄. A presença de ilmenita, anatásio e rutilo no residuo garantiram o alto teor de TiO₂ extraído pelo HF para esta amostra.

Quadro 8. Contribuição percentual dos minerais extraídos nas análises sequenciais no peso da fração silte de amostras dos solos⁽¹⁾

Amostra	Classe	Horizonte	Aquecimento e extração com NaOH	NaHSO ₄	HF
			%		
1	PA 1	B	5,7	10,3	84,0
2	PA 1	C	51,5	0,7	47,8
3	PA 2	B	2,9	15,0	82,1
4	PA 2	C	60,6	1,6	37,8
5	PA 3	B	25,3	10,5	64,2
6	PA 3	C	31,5	12,0	56,5
7	LA 1	B	6,5	12,2	81,3
8	LA 2	B	7,9	7,8	84,3
9	LA	B	2,9	13,8	83,3
10	LA	B	16,8	25,6	57,6
11	LV	B	35,4	49,9	14,7
12	LV	B	4,9	24,8	70,3
13	PV	B	1,2	9,9	88,9
14	LV	B	8,7	55,4	35,9
15	LV	B	51,9	18,8	29,3
16	PVA	B	10,2	25,9	63,9
17	PVA	C	29,4	32,8	37,8
18	CX	B	40,3	18,2	41,5
19	CX	C	45,3	17,8	36,9
20	CX	B	35,1	40,8	24,1
21	CX	C	32,2	43,7	24,1

⁽¹⁾ Extrações sequenciais: aquecimento a 550°C por quatro horas e extração com NaOH 0,5 mol L⁻¹ e extrações com NaHSO₄ e HF.

Quadro 9. Mineralogia da fração silte de amostras dos solos⁽¹⁾

Amostra	Classe	Horiz.	Caulinita	Gibbsita	Goethita	Hematita	Anatásio	Zircônia	Mica	Feld. K	Plag. Na	Plag. Ca	Total	Qz ⁽²⁾
			%											
1	PA 1	B	5,4		1,8		2,5	0,034	0,08	0,061	0,161	0,058	10,1	89,9
2	PA 1	C	51,5		3,9		2,9	0,018	0,22	0,068	0,315	0,075	59,0	41,0
3	PA 2	B	2,6		1,8		3,2	0,038	0,06	0,058	0,105	0,065	7,9	92,1
4	PA 2	C	60,2	1,2	4,2		3,1	0,016	0,12	0,040	0,455	0,056	69,3	30,7
5	PA 3	B	24,7		8,0		2,7	0,040	0,11	0,058	0,146	0,072	35,8	64,2
6	PA 3	C	29,8		9,7	2,7	4,0	0,060	0,14	0,073	0,205	0,081	46,8	53,2
7	LA 1	B	6,0		2,1		2,7	0,057	0,15	0,103	0,171	0,079	11,4	88,6
8	LA 2	B	7,7		1,4		1,9	0,048	0,14	0,089	0,178	0,090	11,6	88,4
9	LA	B	2,7		0,7		0,7	0,086	0,06	0,088	0,213	0,097	4,7	95,3
10	LA	B	11,6	9,5	13,6		10,8	0,147	0,36	0,303	0,272	0,130	46,7	53,3
11	LV	B	8,5	52,2		15,3	4,3	0,014	0,43	0,205	0,284	0,090	81,3	18,7
12	LV	B	3,2	1,7		15,8	12,7	0,022	0,65	0,240	0,242	0,108	34,7	65,3
13	PV	B	1,2			1,1	1,3	0,011	0,14	0,911	0,549	0,144	5,4	94,6
14	LV	B	7,2	4,2		45,4	21,6	0,025	1,18	0,079	0,150	0,075	79,9	20,1
15	LV	B	51,2	2,2		16,1	2,4	0,006	0,35	0,053	0,222	0,074	72,7	27,3
16	PVA	B	6,7	2,0	5,5		2,7	0,019	10,14	20,010	4,970	1,647	53,8	46,2
17	PVA	C	22,0	9,1	4,3		0,8	0,001	10,33	13,620	1,713	0,095	62,1	37,9
18	CX	B	36,8	1,6	0,6	2,6	0,5	0,008	1,30	16,420	1,020	0,058	60,8	39,2
19	CX	C	42,0		2,0	0,1	0,4	0,011	2,17	15,520	1,268	0,057	63,6	36,4
20	CX	B	27,1	11,9	13,6		2,5	0,004	5,25	1,464	1,303	0,428	63,6	36,4
21	CX	C	26,1	5,5	12,6		1,9	0,001	10,36	1,405	2,307	0,845	61,0	39,0

⁽¹⁾ Feld. K - feldspato potássico, Plag. Na - plagioclásio sódico e Plag. Ca - plagioclásio cálcico. ⁽²⁾ Percentagem de quartzo = 100% - total.

Contribuição dos minerais extraídos nas análises sequenciais nos teores totais de K e Mg da fração silte

Potássio - Os menores teores de K estão associados à extração com NaOH 0,5 mol L⁻¹ (extração de caulinita) (Quadro 10). Por outro lado, os teores mais altos foram para os tratamentos que visavam à extração de minerais primários, como mica (NaHSO₄) e feldspato (HF). Contudo, quando se associa concentração com a quantidade do mineral, a caulinita constitui importante fonte de K para a fração silte, principalmente, para o horizonte C dos PA desenvolvidos de sedimentos do Grupo Barreiras (amostras 1 a 6) e para o LV de Boa Vista (RR) (amostra 15).

Verificou-se variação entre o predomínio do tratamento NaHSO₄ e HF na extração de formas estruturais de K, refletindo a interação de abundância e teor de K da mica e feldspato presentes nas amostras. Para as amostras 16, 17, 18 e 19, a concentração de K e o elevado teor de feldspato potássico (Quadro 9) resultaram na contribuição de 60 a 80% do K total (Quadro 10). O baixo teor de feldspato e os teores relativamente altos de mica nas

amostras 20 e 21 fizeram com que cerca de 70% do K total fosse extraído pelo NaHSO₄.

Magnésio - A baixa concentração de Mg na caulinita da fração silte foi refletida na distribuição percentual do Mg total, com valores próximos de zero para a extração com NaOH 0,5 mol L⁻¹ (Quadro 10). A principal fonte de Mg é a biotita extraída pelo NaHSO₄. Para algumas amostras, a contribuição do HF foi expressiva. Parte do Mg liberado pela biotita (extração com NaHSO₄) foi precipitada com Si e S para formação do mineral de baixa cristalinidade, posteriormente removido pelo HF (Melo, 1998). Por meio de micrografias (microscopia eletrônica de transmissão) (Figura 4e) e microanálise (MDRX), este mineral apresenta a seguinte composição química (g kg⁻¹): SiO₂ - 900; SO₃ - 82,3; Al₂O₃ - 10,2; Fe₂O₃ - 1,7; MgO - 4; CaO - 3 e K₂O - 1,4 (Melo, 1998). Outra possibilidade é a dissolução pelo HF de partículas de biotita que resistiram ao tratamento com NaHSO₄, liberando K e Mg. Nas amostras com maior teor de mica (amostras 16 a 21), a quase totalidade do Mg total (95,4 a 99,7%) encontra-se associada a partículas de biotita extraídas pelo NaHSO₄ (Quadro 10).

Quadro 10. Teores de K e Mg e contribuição percentual dos minerais extraídos nas análises sequenciais nos teores totais destes nutrientes da fração silte de amostras dos solos⁽¹⁾

Amostra	Classe	Hor.	Teor de K				Participação no K total			Teor de Mg				Participação no Mg total		
			Total	NaOH	NaHSO ₄	HF	NaOH	NaHSO ₄	HF	Total	NaOH	NaHSO ₄	HF	NaOH	NaHSO ₄	HF
			mg kg ⁻¹				%			mg kg ⁻¹				%		
1	PA 1	B	128,4	30,7	27,7	101,6	21,6	18,4	60,0	269,5	0,93	90,5	101,2	0,6	49,1	50,3
2	PA 1	C	321,6	102,4	192,8	198,9	35,2	32,2	32,7	321,9	0,23	486,8	143,9	0,1	76,1	23,8
3	PA 2	B	104,4	12,9	27,4	99,2	10,6	22,0	67,4	181,4	0,93	68,0	108,8	0,6	41,3	58,1
4	PA 2	C	220,8	83,6	102,0	149,1	46,4	22,3	31,3	172,2	0,38	324,3	119,0	0,2	71,6	28,2
5	PA 3	B	201,3	32,2	55,9	125,8	20,8	27,0	52,2	230,8	0,62	164,4	115,6	0,3	61,4	38,3
6	PA 3	C	358,1	99,5	226,2	180,8	27,9	43,5	28,6	244,8	0,17	220,1	107,0	0,1	70,6	29,3
7	LA 1	B	278,2	35,3	102,6	178,2	12,8	34,7	52,5	300,8	0,11	173,7	110,2	0,0	64,3	35,7
8	LA 2	B	224,7	6,6	100,0	147,3	3,0	41,3	55,7	317,3	0,80	167,1	98,8	0,3	64,7	35,0
9	LA	B	229,3	5,9	150,0	148,4	2,2	52,9	44,9	158,8	0,49	68,6	79,2	0,4	49,5	50,1
10	LA	B	696,8	37,1	202,2	734,9	5,9	26,8	67,4	593,2	0,32	462,2	325,9	0,1	67,4	32,5
11	LV	B	2.202,1	464,1	2.113,6	1.941,8	21,9	64,5	13,5	1.024,9	0,39	724,6	1.947,7	0,0	65,0	35,0
12	LV	B	1.143,0	196,6	646,4	478,5	17,1	53,6	29,3	1.756,6	0,67	742,4	773,5	0,1	55,8	44,1
13	PV	B	2.020,3	82,3	382,0	1.434,7	4,7	21,8	73,5	292,0	0,72	156,5	137,1	0,3	55,1	44,6
14	LV	B	405,6	73,6	194,1	308,1	20,3	49,0	30,6	2.234,0	0,01	1.392,3	1.865,8	0,0	65,5	34,5
15	LV	B	261,2	105,3	104,0	251,6	46,0	21,8	32,2	409,1	0,00	789,9	153,7	0,0	88,9	11,1
16	PVA	B	45.351,4	215,4	11.237,8	43.816,2	0,6	26,4	73,1	12.724,3	1,92	12.182,0	806,9	0,0	95,4	4,6
17	PVA	C	37.382,4	570,4	15.859,8	50.471,7	1,9	36,3	61,8	11.979,3	1,20	15.806,1	101,0	0,0	99,6	0,4
18	CX	B	28.101,7	1.279,4	7.055,8	55.443,6	4,5	14,8	80,7	1.530,6	0,91	2.352,7	67,3	0,1	97,9	2,0
19	CX	C	29.762,1	1.827,7	12.476,4	58.822,3	6,0	22,5	71,5	2.438,0	1,32	4.279,1	69,7	0,1	98,8	1,1
20	CX	B	8.113,3	881,6	9.636,0	8.512,7	9,6	68,1	22,3	6.338,4	17,99	8.731,6	770,5	0,3	96,4	3,3
21	CX	C	10.113,5	1.096,1	11.415,1	8.160,5	10,2	71,6	18,2	11.902,4	16,90	16.501,5	705,0	0,1	98,3	1,6

⁽¹⁾Extrações sequenciais: aquecimento a 550°C por quatro horas e extração com NaOH 0,5 mol L⁻¹ e extrações com NaHSO₄ e HF.

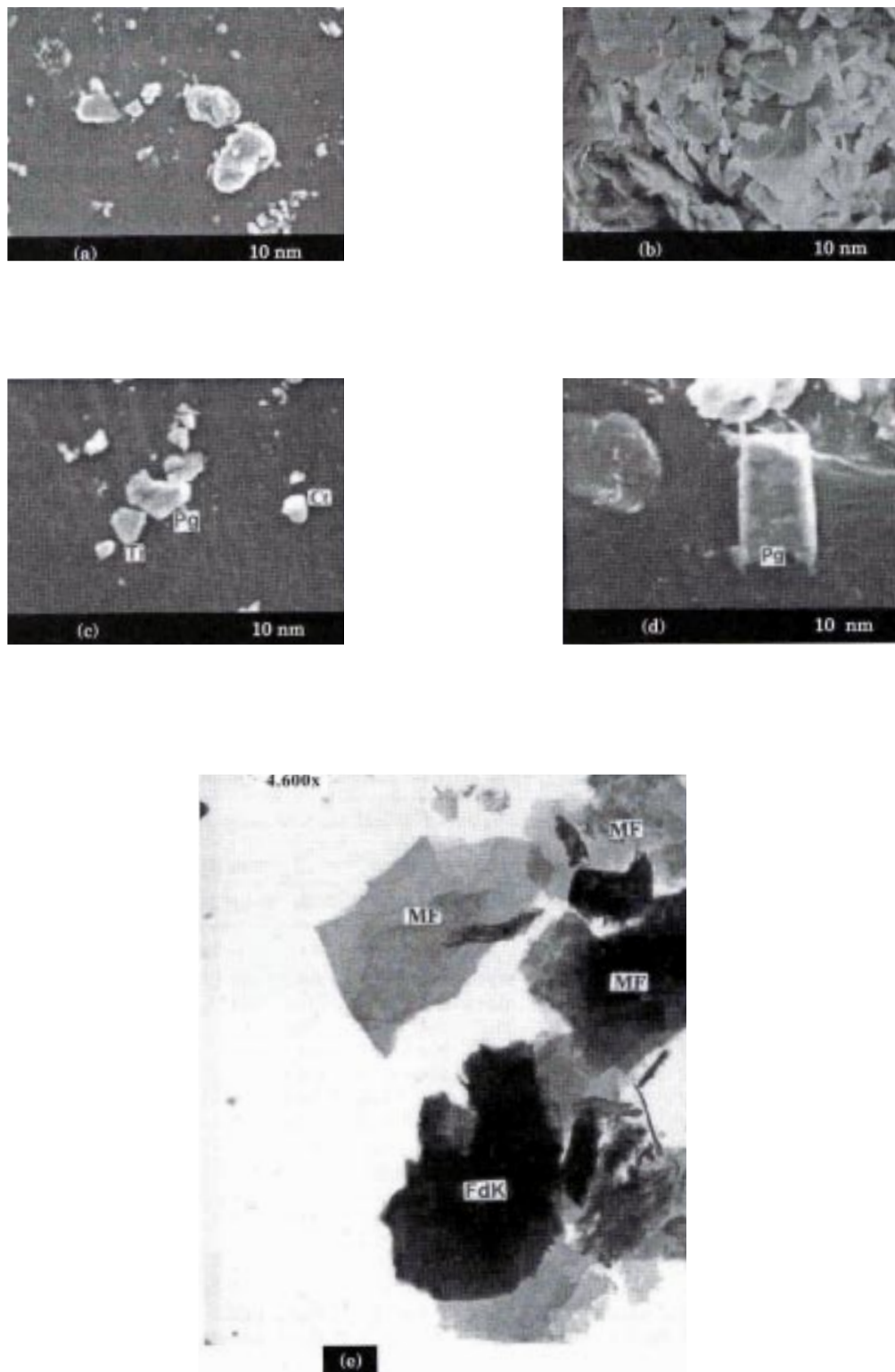


Figura 4. Micrografias de partículas na fração silte por MEV: muscovita e plagioclásio Ca/Na na amostra 19 (a e d, respectivamente), interestratificado biotita/VHE na amostra 21 (b), plagioclásio Ca/Na na amostra 14 (c) e feldspato potássico na amostra 11 por MET (e). Pg - plagioclásio Ca/Na, Ct - caulinita, FdK - feldspato potássico, Ti - óxido de Ti/Fe, MF - mineral formado após tratamento com NaHSO₄.

CONCLUSÕES

1. A importância da fração areia nos teores totais de K e Mg diminuiu com o aumento do intemperismo do solo.

2. Os minerais micáceos identificados e analisados nas frações areia e silte dos solos mais intemperizados foram responsáveis pelos baixos teores totais de K e Mg obtidos para essas frações. Outra importante fonte de formas não-trocáveis desses nutrientes foram os agregados de caulinita presentes nas frações areia e silte de alguns solos.

3. Considerando os baixos teores de mica na fração silte dos solos mais intemperizados (menor que 1%) e a alta proporção de quartzo, mesmo após a extração de caulinita, a concentração da amostra não foi suficiente para detecção de minerais micáceos por difratometria de raios-X. Apenas para o LV de Barroso (MG), verificou-se o aparecimento de discreta reflexão de mica.

4. As frações areia e silte dos solos jovens, desenvolvidos de granito e gnaiss, apresentaram altos teores totais de K e Mg e minerais primários, tais como: mica, feldspato e anfíbólio. Os minerais micáceos na fração silte foram identificados como muscovita e interestratificados biotita/vermiculita com hidróxi entre camadas.

LITERATURA CITADA

- AL-KANANI, T.; MACKENZIE, A.F. & ROSS, G.F. Potassium status of some Quebec soils: K released by nitric acid and tetraphenylboron as related to particle size and mineralogy. *Can. J. Soil Sci.*, 64:99-106, 1984.
- BARSHAD, I. Chemistry of soil development. In: BEAR, F.E., ed. *Chemistry of the soil*. New York, Reinhold Publishing Corporation, 1965. p.1-70.
- COMERFORD, N.B.; HARRIS, W.G. & LUCAS, D. Release of nonexchangeable potassium from a highly weathered, forested Quartzipsamment. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:1421-1426, 1990.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solo. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1997. não paginado.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Rio de Janeiro. Sistema Brasileiro de classificação de solos. Brasília, Serviço de Produção de Informação- SPI, 1999. 412p.
- HARRIS, W.G.; HOLLIEN, K.A.; YUAN, T.L.; BATES, S.R. & ACREE, W.A. Nonexchangeable potassium associated with hydroxy-interlayered vermiculite from Coastal Plain soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:1489-1492, 1988.
- HUANG, P.M. Feldspars, olivines, pyroxenes, and amphiboles. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. *Minerals in soil environments*. 2. ed. Madison, Soil Science Society of America, 1989. p. 975-1051.
- JACKSON, M.L. Soil chemical analysis - advanced course. Madison, Prentice-Hall, 1979. 895p.
- JACKSON, M.L.; LIM, C.H. & ZELAZNY, L.W. Oxides, hydroxides, and aluminosilicates. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. Parte 1: Physical and mineralogical methods. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.101-150.
- LIM, C.H. & JACKSON, M.L. Dissolution for total elemental analysis. In: PAGE, A.L., ed. *Methods of soil analysis*. Parte 2: Chemical and microbiological properties. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.1-12.
- MALAVOLTA, E. Potassium status of tropical and sub tropical region soils. In: MUNSON, R.D., ed. *Potassium in agriculture*. Madison, Soil Science Society of America, 1985. p.163-200.
- MELO, V.F.; COSTA, L.M.; BARROS, N.F.; FONTES, M.P.F. & NOVAIS, R.F. Reserva mineral e caracterização mineralógica de alguns solos do Rio Grande do Sul. *R. Bras. Ci. Solo*, 19: 159-164, 1995.
- MELO, V.F. Potássio e magnésio em minerais de solos e relação entre propriedades da caulinita com formas não trocáveis destes nutrientes. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1998. 205p. (Tese de Doutorado)
- NETTO, A.R. Influência da mineralogia da fração argila sobre propriedades físico-químicas de solos brasileiros. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1996. 144p. (Tese de Mestrado)
- NWADIALO, B.E. & LIETZKE, D.A. Mineralogy and weathering of soils in the Tennessee Copper Basin. *Soil Sci.*, 147:162-173, 1989.
- RADAMBRASIL, PROJETO. Levantamento de recursos naturais. Ministério das Minas e Energia, Secretaria Geral, Programa de Integração Regional. Vol. 3, Folha SE 22 Goiânia. Rio de Janeiro, RJ, 1983.
- REBERTUS, R.A.; WEED, S.B. & BUOL, S.W. Transformations of biotite to kaolinite during saprolite-soil weathering. *Soil Sci Soc. Am. J.*, 50:810-819, 1986.
- RICCI, M.S.C.; DEFELIPO, B.V.; COSTA, L.M. & REZENDE, S.B. As frações granulométricas do solo como reserva de potássio para as plantas. *R. Bras. Ci. Solo*, 13:181-186, 1989.
- SADUSKY, M.L.; SPARKS, D.L.; NOLL, H.R. & HEDRICK, G.J. Kinetics and mechanisms of potassium release from sandy Middle Atlantic Coastal Plain soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:1460-1465, 1987.
- SANTOS, A.R. Caracterização mineralógica e avaliação da reserva mineral de alguns nutrientes, em solos sob eucalipto, da região do Vale do Rio Doce. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1993. 97p. (Tese de Mestrado)
- SANZ-SCOVINO, J.I. & ROWELL, D.L. The use of feldspars as potassium fertilizers in the savannah of Colombia. *Fert. Res.*, 17:71-83, 1988.
- SANZ-SCOVINO, J.I.; WEIL, S. & JONES, A.A. The mineralogy and potassium reserves of a soil from Carimagua, Colombia. *Geoderma*, 52:291-302, 1992.
- SIMARD, R.R.; KIMPE, C.R. & ZIZKA, J. The kinetics of nonexchangeable potassium and magnesium release from Quebec soils. *Can. J. Soil Sci.*, 69:663-675, 1989.

- SMITH, J.A. & MATTHEWS, B.C. Release of potassium by 18 Ontario soils during continuous cropping in the greenhouse. *Can. J. Soil Sci.*, 37:1-10, 1957.
- TAN, K.B.; HAJEK, B.F. & BARSHAD, I. Thermal analysis techniques. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis. Parte 1: Physical and mineralogical methods*. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.151-183.
- TORRENT, J. & CABEDO, A. Sources of iron oxides in Reddish Brown soil profiles from calcarenites in Southern Spain. *Geoderma*, 37:57-66, 1986.
- UNAMBA-OPARAH, I. The potassium status of the sandy soils of northern Imo, state, Nigeria. *Soil Sci.*, 139:437-445, 1985.