

SEÇÃO V - GÊNESE, MORFOLOGIA E CLASSIFICAÇÃO DO SOLO

BALANÇO GEOQUÍMICO DE SOLOS DERIVADOS DE ROCHAS BÁSICO-ULTRABÁSICAS NO AMBIENTE SUBTROPICAL DO RIO GRANDE DO SUL⁽¹⁾

L. F. S. PINTO⁽²⁾ & N. KÄMPF⁽³⁾

RESUMO

O balanço de massa da intemperização de solos desenvolvidos de rochas básico-ultrabásicas no Rio Grande do Sul, os menos intemperizados constatados até o presente no estado, mostrou nos horizontes superficiais uma concentração relativa mais elevada dos elementos móveis do que nos subsuperficiais, indicando a existência de descontinuidade entre eles. Tais feições, em conjunto com a mineralogia e com a morfologia dos perfis investigados, indicam a ocorrência de eventos erosivo-depositacionais em um passado pedogeneticamente recente, bem como uma contribuição importante de materiais intempericamente menos evoluídos para a composição mineral dos horizontes superficiais. Esses eventos erosivos e o rejuvenescimento superficial dos perfis explicam o pouco desenvolvimento e a semelhança química e mineralógica desses solos com os desenvolvidos de rochas básico-ultrabásicas em regiões temperadas.

Termos de indexação: rochas básico-ultrabásicas, brunizém, solos litólicos, intemperismo, balanço geoquímico.

SUMMARY: *GEOCHEMICAL BALANCE OF SOILS DERIVED FROM BASIC-ULTRABASIC ROCKS UNDER THE SUBTROPICAL CLIMATE OF RIO GRANDE DO SUL STATE, SOUTHERN BRAZIL*

The mass balance of weathering of soils derived from basic-ultrabasic rocks under the subtropical climate of southern Brazil, the least weathered soils found to date in the Rio Grande do Sul state, showed a higher relative concentration of the mobile elements in the surface horizons than in the subsurface horizons. These features, associated to the soil mineralogy and morphology, indicate the occurrence of erosive-depositional events in a pedogenetically recent past as well as a main contribution from less weathered materials to the mineral composition of the surface horizons. These erosive events and the profiles surface renewal explain the early stage of development of these soils and their chemical and mineralogical similarity to soils derived from basic-ultrabasic rocks of temperate regions.

Index terms: basic-ultrabasic rocks, udolls, weathering, geochemical balance.

⁽¹⁾ Parte da Dissertação de Mestrado em Solos, apresentada, pelo primeiro autor, à Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Recebido para publicação em agosto de 1996 e aprovado em setembro de 1997.

⁽²⁾ Professor do Departamento de Solos da FAEM/UFPel, Caixa Postal 354, CEP 96001-970 Pelotas (RS).

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS, Caixa Postal 776, CEP 90001-970 Porto Alegre (RS). Bolsista do CNPq.

INTRODUÇÃO

Os solos derivados de rochas básico-ultrabásicas no ambiente subtropical do Rio Grande do Sul apresentam perfis pouco profundos, pH próximo à neutralidade, alta CTC e saturação por bases e elevada reserva de ferro nos minerais primários, indicando solos muito pouco lixiviados, semelhantes aos de regiões temperadas (Pinto & Kämpf, 1996). A influência marcante do material de origem sobre a composição desses solos é denotada pelas razões Ca/Mg trocáveis mais baixas e pelos teores mais elevados de Cr, Ni e Co dos solos derivados de peridotito (rocha ultrabásica), em comparação com os solos derivados de piroxenitos/hornblenditos (rochas básicas a ultrabásicas).

Esses solos constituem os menos intemperizados até constatados no ambiente subtropical do Rio Grande do Sul. Como causa para o baixo grau de alteração, adicionalmente à exposição recente e ao tamponamento da solução do solo por íons liberados na alteração de minerais intemperizáveis das frações grosseiras, foi sugerida a adição superficial de materiais pouco intemperizados (Pinto & Kämpf, 1996). Essa é indicada, qualitativamente, pela maior presença de minerais intemperizáveis (anfíbólio, talco e clorita) nos horizontes superficiais, em comparação aos horizontes mais profundos, e pela ocorrência de uma linha de pedras no interior de um dos perfis e nas adjacências de outro.

O objetivo deste estudo foi utilizar a análise química total e o respectivo balanço geoquímico, como um referencial quantitativo, para caracterizar o grau de intemperização dos solos e sua distribuição ao longo do perfil, buscando averiguar a presença de descontinuidades nos perfis de modo a corroborar a hipótese de adição externa de material aos solos.

MATERIAL E MÉTODOS

A figura 1 representa a situação dos perfis na paisagem. No quadro 1, constam a identificação, a litologia, a classificação e a mineralogia dos solos. A localização, a descrição do meio físico e maiores detalhes sobre os solos encontram-se em Pinto & Kämpf (1996).

Para decomposição e análise química total das amostras de rocha e das frações de solo (terra fina, cascalho e calhaus), moídas em almofariz de ágata até passar em peneira de 150 mesh, foram utilizados dois métodos: (a) quatro digestões sucessivas, em beckers de teflon, de $1,000 \pm 0,100$ g de amostra, a primeira com HClO_4 , H_2SO_4 e HNO_3 , as três seguintes com HF e HClO_4 (Lim & Jackson, 1982); (b) fusão por NaOH, em cadinhos de níquel, de $50 \pm 0,10$ mg de amostra (Hallmark et al., 1982). Na solução obtida pela fusão com NaOH, foi determinado o Si por colorimetria (Govett, 1961); na solução da digestão com

Quadro 1. Identificação, material de origem, classificação e mineralogia dos solos de rochas básico-ultrabásicas do Passo do Ivo (RS)

Perfil	Material de origem ⁽¹⁾	Classificação brasileira ⁽²⁾	Soil Taxonomy ⁽³⁾	Horizonte	Areia	Silte	Mineralogia ⁽⁴⁾ Argila 2-0,2 µm	Argila < 0,2 µm
P1a	Piroxenito/ hornblendito	Brunizém abrupto textura média/muito argilosa	Typic Argiudoll	A	Qz, Af	Af, Qz	Cl/Es, Cl	Cl/Es
				Bt	Af, Qz	Af, Qz	Cl, Cl/Es, Tc	Cl/Es
				C	Af	Af, Cl, Qz	Cl/Es	Es, Cl/Es
P1b	Piroxenito/ hornblendito	Solo litólico eutrófico A chernozêmico textura média	Entic Hapludoll	A	Af, Qz	Qz, Af, Cl	Es, Cl/Es, Af, Tc	Cl/Es, Tc
				A/C	Af, Qz, Cl	Af, Qz, Cl	Cl, Cl/Es, Tc, Af	Es, Cl/Es, Tc
				C	Af, Cl, Sp	Af, Cl, Qz	Cl/Es, Cl, Af, Tc	Es, Cl/Es
P2	Peridotito	Brunizém raso textura média cascalhenta	Typic Hapludoll	A	Cl, Af	Af, Cl, Qz	Cl, Cl/Es	Cl, Cl/Es, Es
				Bi	Cl, Af	Af, Cl, Qz	Cl, Es, Cl/Es	Cl/Es, Es
				C	Cl, Af	Cl, Af	Cl/Es, Es	Es, Cl/Es
P3	Peridotito	Brunizém vértico textura argilosa	Vertic Hapludoll	A	Cl, Af, Qz	Af, Qz, Cl	Cl, Cl/Es, Tc, Af	Cl, Cl/Es
				2B	Cl, Af, Qz	Cl, Qz, Af	Cl, Es, Cl/Es, Af	Es, Cl/Es
				2C	Cl, Af, Sp	Cl, Sp, Af	Es, Cl, Tc, Cl/Es, Sp	Es, Cl/Es

⁽¹⁾Oliveira (1982). ⁽²⁾Camargo et al. (1987) e EMBRAPA (1988). ⁽³⁾EUA (1992). ⁽⁴⁾Qz: Quartzo; Af: Anfíbólio; Sp: Serpentina; Tc: Talco; Cl: Clorita; Es: Esmectita; Cl/Es: interestratificado Clorita-Esmectita.

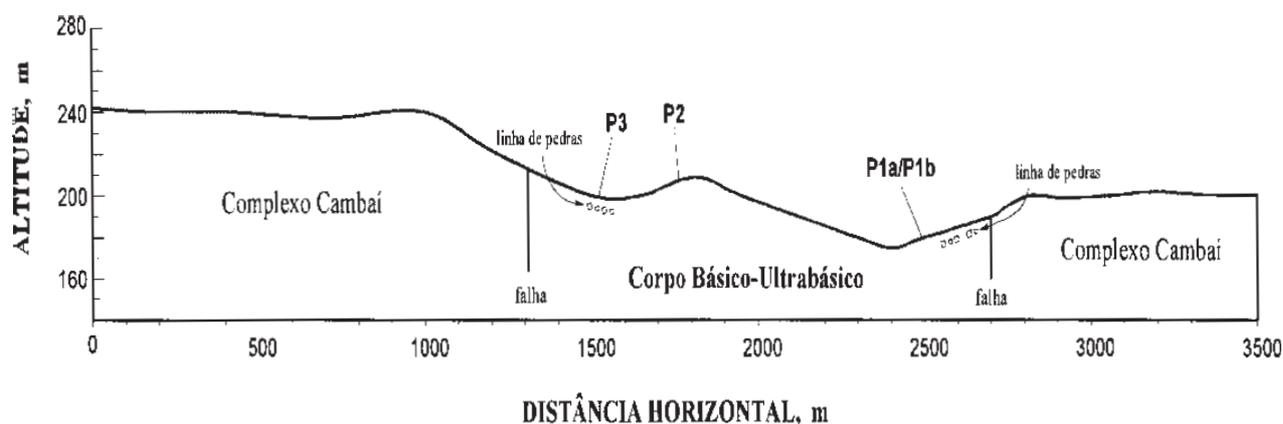


Figura 1. Posição dos perfis na paisagem e relação com as rochas graníticas do Complexo Cambaí.

HF, os elementos: Al, Mg, Ca, Fe, Mn, Cr, Ni, Co, Cu e Zn foram dosados por espectroscopia de absorção atômica; Na e K, por espectrofotometria de chama; Ti e P, por colorimetria (Maxwell, 1968). A perda ao fogo (P.F.) foi determinada pela perda de peso da amostra por aquecimento a 900°C, em cadinho de platina.

Obteve-se o balanço geoquímico por meio do cálculo isoquímico ou isoelemental (razão de concentração dos elementos), considerando como referência o Al, elemento de mobilidade muito baixa, tendo sido utilizada a expressão de Tardy (1969), apresentada por Carvalho (1995):

$$mi = \frac{ic}{ir} \cdot \frac{yr}{yc}$$

em que: mi = mobilidade do elemento qualquer; ic = teor do elemento qualquer no produto do intemperismo; ir = teor do elemento qualquer no material original; yr = teor do elemento "imóvel" no material original; yc = teor do elemento "imóvel" no produto do intemperismo.

O método parte do pressuposto de que o elemento de referência apresenta mobilidade nula no intemperismo, correspondendo a um valor de mi igual à unidade em todos os horizontes do solo. Dessa forma, as alterações na concentração de outros elementos no material intemperizado indicadas por uma razão < 1 representam saída (perdas), enquanto as indicadas por razão > 1 representam entrada (ganhos).

Para o cálculo isoquímico, utilizou-se a composição total do solo (calhaus + cascalho + terra fina), estimada pela média ponderada da composição química das frações. Nos perfis 1a, 1b e 3, em que não foi determinada a composição química das frações calhaus e cascalho, estimou-se a composição total, considerando: (a) nos horizontes A, a composição das frações calhaus e cascalho igual à do quartzo, levando em conta a inspeção visual com lupa do material > 2 mm; (b) nos horizontes B (ou A/C) e C, a composição das frações calhaus e cascalho igual à do material de origem, levando em conta a proximidade da

composição dessas frações com a da rocha observada no perfil 2 (Quadro 2).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Vê-se, no quadro 2, a composição química total dos horizontes dos solos e do material de origem.

Segundo a classificação química das rochas, baseada no teor de SiO_2 (Le Maitre, 1989), as rochas básicas devem conter entre 450 e 520 g kg^{-1} de SiO_2 , enquanto as ultrabásicas menos do que 450 g kg^{-1} de SiO_2 . As rochas ultrabásicas, em comparação com as básicas, apresentam baixo teor de Al, alto Mg e baixo Ca, além de teores mais elevados de Cr, Ni e Co. Portanto, os teores de SiO_2 , e de Al_2O_3 , MgO e CaO das rochas (Quadro 2) indicam um material de origem com um caráter básico, nos perfis 1a e 1b, e ultrabásico, no perfil 3, o que está de acordo com as litologias apresentadas por Oliveira (1982) para o local (Quadro 1). Entretanto, no material de origem do perfil 2, o valor de 465 g kg^{-1} de SiO_2 e o teor relativamente alto de CaO (além de K_2O e de Na_2O) indicam um caráter básico, discordando do tipo litológico assinalado por Oliveira (1982) (peridotito, Quadro 1). Por outro lado, seu baixo teor de Ti e o Cr e Ni mais altos indicam uma filiação ultrabásica. Semelhantemente, os valores mais baixos de Cr na rocha apontam para o perfil 1a um caráter mais básico, em relação ao perfil 1b, localizado ao seu lado. Essa variação combina com a interpretação de Santos et al. (1990), que apontam a ocorrência das rochas do complexo básico-ultrabásico do Passo do Ivo na forma de camadas ou lentes de espessura variável, intimamente associadas, observáveis em várias escalas.

Na rocha do perfil 3, o valor bem mais elevado de P.F., representando alto grau de hidratação, reflete o predomínio de clorita Mg e serpentina, minerais que contêm, aproximadamente, 245 g kg^{-1} de OH (Pinto, 1994). No material de origem do perfil 1b, o valor de P.F. combina com a ocorrência subordinada de clorita

com anfibólitos e algum piroxênio (Pinto & Kämpf, 1996). Por outro lado, os baixos valores de P.F. nos materiais de origem dos perfis 1a e 2, representando um grau de hidratação menor que o da hornblenda, com, aproximadamente, 40 g kg⁻¹ de OH (Pinto, 1994), evidenciam a presença de piroxênios em maior proporção do que a sugerida pela difratometria de raios X (Pinto & Kämpf, 1996). O aumento nos valores de P.F. da rocha para o solo é devido não só à formação de argilominerais, por exemplo, a esmectita, que contém, aproximadamente, 100 g kg⁻¹ de OH (Pinto, 1994), mas também ao acúmulo de matéria orgânica (horizontes A apresentam entre 26 e 50 g kg⁻¹ C (Pinto & Kämpf, 1996).

As quantidades de Cr, Ni e Co no solo são bastante elevadas nos horizontes superficiais (Quadro 2), sendo maiores nos perfis 2 e 3, localizados em área de material de composição peridotítica (Quadro 1). Os teores de Cr, com exceção do Perfil 1b, são mais elevados nos horizontes superficiais, enquanto os de Ni tendem a ser maiores em subsuperfície. No Perfil 1a, os valores de Cr, em subsuperfície, são bem mais baixos do que nos outros perfis, em níveis mais próximos do material de origem, de caráter mais básico.

Berrow & Rieves (1986) encontraram, em solos da Escócia, valores mais baixos de Cr e Ni nos horizontes

superficiais, que explicaram com base no acúmulo superficial de matéria orgânica (efeito de diluição). Nos solos do presente estudo, que apresentam quantidade considerável de matéria orgânica (Pinto & Kämpf, 1996), esse efeito não se expressou, provavelmente por ocorrer, nesses solos, uma ligação do Cr com a matéria orgânica, sugerida pelas razões Cr_o/Cr_d mais elevadas nos horizontes A (Pinto & Kämpf, 1996). Essa, entretanto, não pode explicar sua maior concentração nos horizontes superficiais, uma vez que a presença de Cr nos minerais primários ainda é muito elevada em relação ao presente nos óxidos e na matéria orgânica nesses horizontes, como indicada pela grande diferença entre o Cr total (Quadro 2) e o extraído por ditionito (Pinto & Kämpf, 1996). Além disso, a tendência de o Cr acompanhar os óxidos de Fe (McGrath & Smith, 1990), claramente observada nesses solos (Pinto & Kämpf, 1996), resultaria no aumento de seus teores nos horizontes B. Dessa forma, a maior concentração de Cr nos horizontes superficiais, mais arenosos (Pinto & Kämpf, 1996), suporta a hipótese de adição superficial de minerais primários portadores de Cr.

Não se pode, entretanto, concluir com base somente nos valores da composição química total, pois o

Quadro 2. Composição química total do solo e do material de origem dos perfis

Perfil	Horizonte	Profundidade cm	Fração	g kg ⁻¹										mg kg ⁻¹					
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	P.F. ⁽¹⁾	Cr	Ni	Co	Cu	Zn
Perfil 1a	A ₁	0-9	T. fina	544,5	125,5	81,7	24,0	124,6	8,1	10,3	6,3	2,9	1,0	83,6	1.000	375	215	100	65
	A ₂	9-23	T. fina	563,8	120,3	70,7	25,5	117,3	8,2	8,4	4,9	2,6	0,9	100,7	170	330	205	105	100
	Bt	23-40	T. fina	449,3	229,0	40,2	18,0	149,4	6,6	2,3	2,7	2,3	0,5	140,3	335	475	250	140	165
	BC	40-60	T. fina	441,5	200,3	96,0	26,6	140,2	6,8	2,6	2,2	2,3	0,4	118,4	195	405	235	130	155
	C	60-90	T. fina	483,4	130,6	161,6	25,5	122,8	6,1	5,0	1,7	2,6	0,2	86,7	180	395	215	120	70
	R			482,3	58,5	222,3	110,3	103,8	4,1	8,3	1,9	2,2	0,3	23,5	630	320	140	110	140
Perfil 1b	A	0-15/27	T. fina	562,2	86,9	95,3	51,6	89,9	4,8	10,2	5,2	1,7	0,8	96,5	1.180	235	110	75	65
	A/C	15/27-50/57	T. fina	516,9	105,2	112,6	57,5	114,3	5,2	6,2	2,6	2,3	0,7	90,8	1.775	425	160	155	75
	C	50/57-80	T. fina	476,1	108,0	147,5	60,9	132,1	3,7	3,7	1,6	2,6	0,3	94,5	1.675	560	205	200	90
	R			485,8	46,9	212,4	94,1	123,4	3,7	4,9	1,3	2,6	0,1	53,8	1.235	410	165	110	65
Perfil 2	A	0-17	T. fina	433,4	65,9	201,6	23,3	173,3	4,2	8,0	1,7	4,9	0,8	88,2	2.770	1.485	430	200	95
			20-2 mm	435,1	57,0	236,4	57,4	139,3	2,4	6,3	0,1	4,7	0,1	82,2	5.180	1.330	370	110	100
	Bi	17-32	T. fina	411,3	71,6	197,2	26,4	208,9	3,2	7,7	1,5	3,3	0,8	87,8	1.990	1.590	340	290	80
	C	32-45	T. fina	519,1	65,4	120,2	18,3	198,1	2,4	6,4	1,1	2,8	0,5	91,8	2.260	1.610	330	430	40
			20-2 mm	480,1	42,2	243,8	77,3	101,3	2,4	9,6	0,8	2,2	0,2	57,3	1.930	825	180	215	60
			>20 mm	465,5	49,4	243,8	63,1	109,4	2,5	7,8	0,8	1,5	0,7	70,6	1.990	570	145	320	60
R			465,1	50,3	241,6	94,9	105,2	1,9	13,1	1,8	2,0	0,3	33,3	2.010	645	170	220	120	
Perfil 3	A	0-40	T. fina	450,7	80,5	118,5	23,7	171,9	5,3	6,0	2,6	3,1	1,1	169,9	4.265	940	220	90	140
	2Btv	40-70	T. fina	400,2	93,0	176,5	14,7	211,6	2,8	2,7	0,6	3,3	0,2	149,5	4.215	1.735	335	110	120
	2C	70-90	T. fina	413,3	54,6	248,2	15,3	188,9	1,5	2,4	0,3	2,3	0,1	121,4	2.690	1.305	280	80	120
	R			426,6	31,0	299,9	21,0	161,3	1,0	2,3	0,2	1,9	0,2	117,3	1.615	1.080	215	85	95

⁽¹⁾ P.F. = Perda ao fogo (perda de peso por ignição).

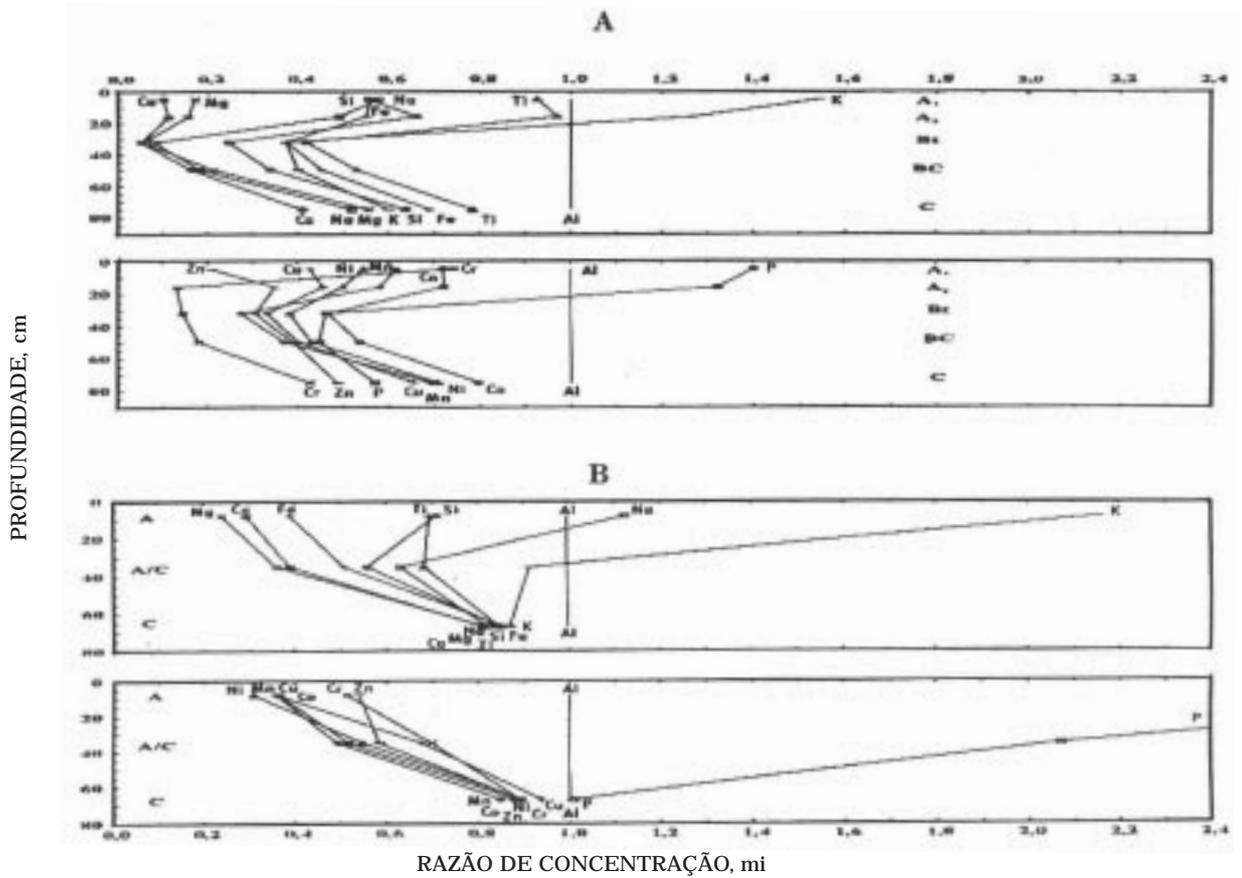


Figura 2. Relação entre a razão de concentração dos elementos (mi) e a profundidade no perfil 1a(A) e perfil 1b(B).

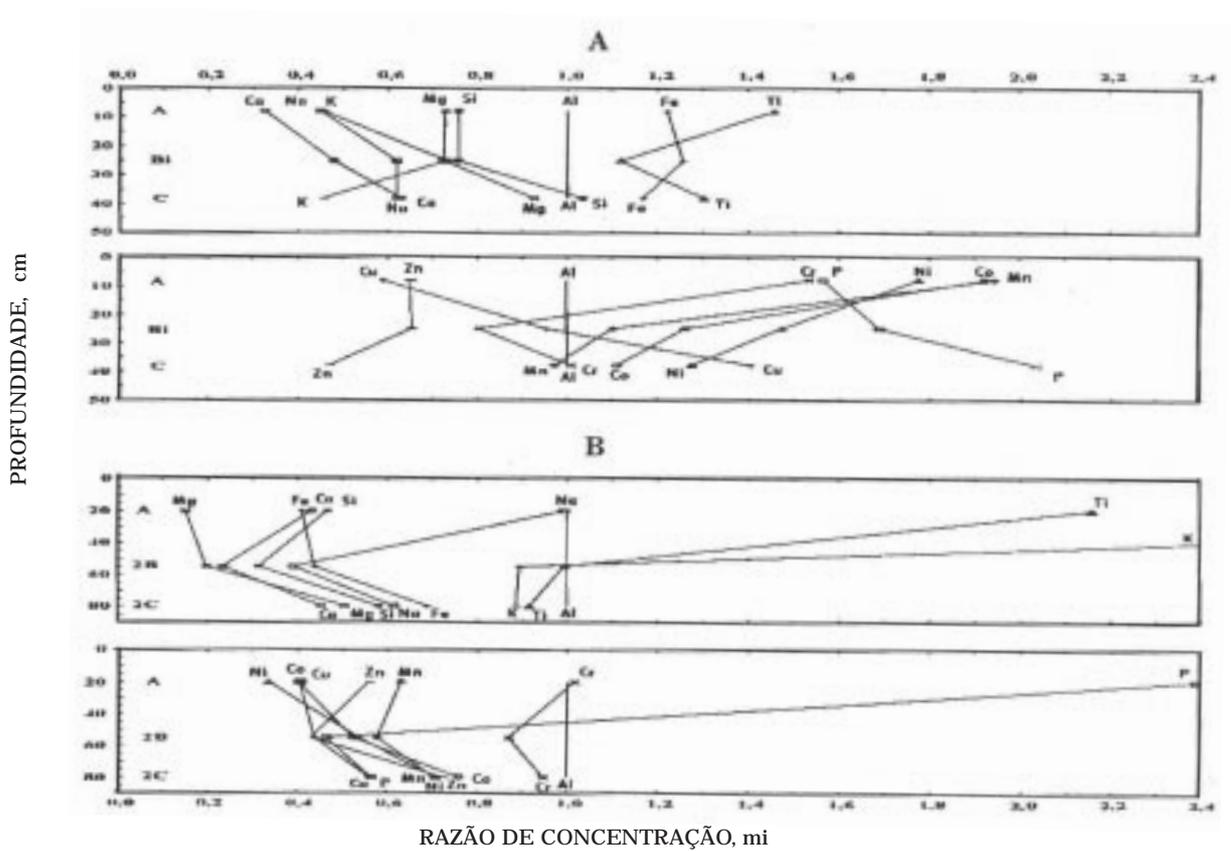


Figura 3. Relação entre a razão de concentração dos elementos (mi) e a profundidade no perfil 2 (A) e perfil 3 (B).

intemperismo consiste em uma perda diferencial de elementos, concentrando relativamente os menos móveis. A magnitude da perda ou dos ganhos dos elementos, bem como sua escala de mobilidade relativa, pode, contudo, ser estimada pelo balanço geoquímico por meio do cálculo isoquímico (Carvalho, 1995). A razão de concentração dos elementos (mi), que expressa os índices de mobilidade, e a profundidade dos perfis encontram-se nas figuras 2 e 3.

Os elementos mais móveis são os mais rapidamente liberados dos minerais primários mais instáveis e são, por último, aprisionados em minerais secundários; inversamente, os elementos menos móveis são os retidos em minerais primários resistentes ou que, por serem menos solúveis, são rapidamente aprisionados em minerais secundários (Lelong et al., 1976). Dessa forma, a influência tanto da estabilidade dos minerais primários, nos quais os elementos estão incluídos, como das variáveis pedoambientais na mobilidade dos elementos, pode ser avaliada com base nas perdas iniciais dos materiais de origem, indicadas pelos valores de mi nos horizontes C (Figuras 2 e 3), comparando-as com a mineralogia do solo (Quadro 1) e das rochas (Pinto & Kämpf, 1996).

Os valores de mi nos horizontes C dos perfis 1b e 2 (Figuras 2b e 3a) são, em média, mais elevados do que os dos perfis 1a e 3 (Figuras 2a e 3b), indicando menores perdas de elementos, compatíveis com a morfologia e com o menor grau de desenvolvimento desses solos (Pinto & Kämpf, 1996).

As perdas iniciais mais elevadas do Ca, indicadas pelos valores mais baixos de mi nos horizontes C (Figuras 2 e 3), sugerem a presença desse elemento em um mineral menos resistente ao intemperismo do que o anfibólio. Como minerais portadores de Ca, além do anfibólio e do piroxênio, cuja presença subordinada foi detectada pela difratometria de raios X no material de origem dos perfis 1a e 2 (Pinto & Kämpf, 1996), poderiam também ocorrer carbonatos ou plagioclásio cálcico, minerais muito instáveis, identificados por microscopia óptica por Oliveira (1982) nas rochas básico-ultrabásicas do Passo do Ivo. Esses minerais, no entanto, não foram detectados pela difratometria de raios X. Por outro lado, as perdas semelhantes entre o Ca e o Mg nos horizontes C dos perfis 1b e 3 estão associadas à resistência muito baixa ao intemperismo da serpentina (mineral magnésiano), indicada pela sua diminuição da rocha (Pinto & Kämpf, 1996) para o horizonte 2C, no perfil 3, e pelo seu desaparecimento da fração areia dos horizontes C para os horizontes suprajacentes, nos perfis 1b e 3 (Quadro 1).

O Na e o K, contidos na hornblenda (Menegotto, 1983), mostram, à exceção do perfil 2, perdas menores do que o Ca nos horizontes C (Figuras 2 e 3). Essa observação apóia a interpretação de que o Ca estaria também contido em um mineral menos resistente ao intemperismo do que a hornblenda, portadora desses três elementos.

A distribuição dos valores de mi dos elementos ao longo do perfil do solo, indicativos da sua mobilidade, pode ser analisada, também, por comparação com os

dados de literatura. Perel'man (1967) apresenta uma classificação geral da mobilidade dos elementos dos quais o quadro 3 relaciona apenas os elementos analisados no presente estudo. Deve ser levado em conta, porém, que não existe uma ordem rígida de mobilidade de elementos durante o intemperismo, em razão de numerosos fatores que interferem durante os processos sucessivos de hidrólise, solubilização, formação de minerais secundários (Lelong et al., 1976). Assim, a mobilidade dos elementos, apresentada no quadro 3, pode, dentro do perfil de intemperização, sofrer algumas modificações. Por exemplo, o Mn, devido à oxidação mais lenta do que a do Fe migra mais do que esse na forma reduzida, acumulando na parte inferior dos perfis; da mesma forma, a observação geológica tem constatado, em perfis de intemperização de rochas ultrabásicas, que o Co acompanha o Mn e que o Ni também se concentra na porção inferior (Lelong et al., 1976).

No perfil de solo, o avanço da frente de intemperização deve promover um gradiente de perdas progressivamente maiores em direção à superfície. Dessa maneira, no caso de solos autóctones, as razões de concentração dos elementos menos móveis devem, da rocha para o horizonte A, tender a mostrar valores mais elevados e a diminuir menos do que as dos elementos mais móveis, refletindo a perda diferencial dos elementos mais móveis e concentração dos menos móveis. Entretanto, havendo adição superficial de material menos intemperizado, essa variação esperada dos valores de mi deve sofrer modificações dos horizontes B ou A/C para os horizontes A.

De fato, nos horizontes C e nos intermediários (B ou A/C), os valores de mi dos elementos considerados mais móveis (Ca, Na, Mg) são os mais baixos e mostram decréscimos dos horizontes C para os intermediários (Figuras 2 e 3), confirmando, em geral, o comportamento previsto. O valor mi do Si inferior ao do Na no perfil 3 (Figura 3b) pode ser explicado pelo relativo enriquecimento do anfibólio (portador do Na) em relação à serpentina (silicato magnésiano), cuja baixa estabilidade é indicada pelo decréscimo mais intenso do Mg. No perfil 2, os vários ganhos no horizonte C (Figura 3a) e os menores teores totais de Al, Na e K nas frações > 2 mm em relação à rocha (Quadro 2) indicam um caráter mais ultrabásico para o material original do horizonte C, decorrente da heterogeneidade do material de origem do solo, causada pela variabilidade das rochas do complexo básico-ultrabásico do Passo do Ivo, dispostas em camadas ou lentes intimamente associadas (Santos et al., 1990).

Por outro lado, observam-se, dos horizontes B ou A/C para o horizonte A, tanto o aumento da razão de concentração (mi) dos elementos mais móveis como grande diminuição nas suas taxas de decréscimo (Figuras 2 e 3). Além disso, no perfil 2, Ni, Mn e Co, que deveriam possuir tendência de migrar e concentrar-se nas partes inferiores, mostram valores de mi mais elevados do que o Fe, aumentando essas razões em direção à superfície (Figura 3a). Essas

Quadro 3. Mobilidade e acumulação biológica dos elementos químicos no ambiente supergênico (adaptado de Perel'man, 1967)

Mobilidade	Elemento	Acumulação biológica	Elemento
a) móveis	Ca, Na, Mg	a) muito forte	P
b) fracamente móveis	K, Si, P		
c) móveis e fracamente móveis em meio oxidante e imóveis em meio fortemente redutor	Zn, Ni, Cu	b) forte	Ca, K, Mg, Na, Zn
d) imóveis em meio oxidante e móveis e fracamente móveis em meio redutor	Fe, Mn, Co	c) moderada	Si, Fe, Cu, Ni, Co
e) pobremente móveis na maioria dos ambientes	Al, Ti, Cr	d) fraca	Al, Ti, Cr

variações, contrárias à expectativa de que o avanço da frente de intemperização promova um gradiente de perdas progressivamente maiores em direção à superfície, indicam, em todos os perfis, que os horizontes superficiais são relativamente menos intemperizados do que os horizontes imediatamente abaixo. Dessa forma, essas feições suportam a hipótese de adição superficial e indicam descontinuidades para todos os perfis analisados, isto é, não somente para o perfil 3, que é o único que apresenta linha de pedras no interior do perfil.

A disposição vertical das rochas do complexo básico-ultrabásico do Passo do Ivo sob a forma de camadas ou lentes (Santos et al., 1990) ajuda a interpretar as variações dos valores de *mi*. Assim, no perfil 1a, de caráter mais básico, ou seja, com maior teor de SiO₂ e de CaO e menor de Cr, Ni e Co, a adição de material mais ultrabásico tenderia a aumentar no horizonte superficial a razão de concentração do Mg, em relação ao Ca, e dos metais Cr, Ni e Co, em relação a Cu e Zn (Figura 2a). Inversamente, no perfil 1b, a adição de material mais básico aumentaria o valor de *mi* do Ca, em relação ao Mg, e o do Cu e Zn, em relação ao do Cr, Ni e Co (Figura 2b); o que explica o menor teor de Cr no horizonte superficial. No perfil 2 (Figura 3a), cujo material de origem apresenta caráter intermediário em meio a peridotitos mais ultrabásicos, aplicar-se-ia a situação do perfil 1a, enquanto, no perfil 3 (Figura 3b), de composição bastante ultrabásica, a do perfil 1b.

Além da adição externa ao perfil, a entrada de elementos de fora do horizonte superficial poderia advir da ciclagem de nutrientes e bioacumulação via retirada pelas raízes de elementos de horizontes inferiores. A situação de perdas progressivas poderia ser modificada por um expressivo transporte mecânico de material contendo elementos imóveis (Al e Fe em argilominerais e óxidos), que, assim, tenderia a “envelhecer” os horizontes subjacentes e a “rejuvenescer” os horizontes superiores.

As séries de acumulação biológica para os elementos analisados (Quadro 3) representam uma das feições básicas da pedogênese. O sistema de ciclagem organismos-solo-organismos dos elementos, porém, não é fechado, havendo perdas de elementos por lixiviação, compensadas pelas plantas que retiram

esses elementos da reserva mineral. Nos solos estudados, esse efeito deve também existir; no entanto, a concentração de Ca, Mg, Na e K nos minerais primários é muito elevada, o que é atestado pelos altos teores de anfibólios do tipo hornblenda, que contém Ca, Mg, Na e K, e de clorita, portadora de Mg, nos horizontes A (Quadro 1). Dessa forma, a proporção de elementos mais móveis no sistema de biociclagem - organismos, matéria orgânica e complexo trocável dos solos - em relação àquela contida na estrutura dos minerais, é ainda muito pequena para permitir que a biociclagem governe a distribuição dos teores totais desses elementos no solo. O efeito da biociclagem sobre o fósforo, que apresenta um coeficiente de acumulação biológica muito forte (Quadro 3), deve ser mais pronunciado.

O transporte mecânico de material com elementos imóveis (Al e Fe) pelo processo de “lessivage” ocorreu em maior grau no perfil 1a, o que é indicado pela cerosidade forte e abundante no horizonte Bt (Pinto & Kämpf, 1996). No entanto, até mesmo um cálculo superestimativo (e no caso irreal), transferindo toda a argila dispersa dos horizontes Bt e BC para o A na forma de caulinita e óxidos de Fe, que seria a situação mais extrema de transferência de Al, não reverte a situação de concentração dos elementos mais móveis nos horizontes superficiais (Pinto, 1994).

A posição dos solos na paisagem também ajuda a interpretar as variações dos valores de *mi* dos elementos via adição superficial de material. Os perfis 1a, 1b e 3 ocupam superfícies lateralmente abaixo dos gnaisses e granitos do Complexo Cambaí (Figura 1), que, por serem rochas ácidas, poderiam fornecer minerais mais ricos em Si, Na, K, Ti e P e mais resistentes ao intemperismo do que os materiais de rochas ultrabásicas. No caso do perfil 2, essa possibilidade seria bem mais remota, pelo fato de localizar-se em uma elevação isolada para o interior do complexo ultrabásico (Figura 1). De fato, verifica-se que, nos horizontes A dos perfis 1a, 1b e 3 (Figuras 2 e 3b), são encontrados ganhos de K, Na, Ti e P, sendo os maiores no perfil 3, coincidentes com a maior proximidade das rochas encaixantes. Por outro lado, no perfil 2 (Figura 3a), os ganhos são somente de Ti, elemento muito pouco móvel, e de P, que é bastante suscetível de concentração pela biociclagem.

A descontinuidade entre os horizontes superficiais e os horizontes subjacentes, indicada pelas razões de concentração mais elevadas dos elementos mais móveis nos horizontes A e marcada pela presença de uma linha de pedras entre os horizontes A e B, no perfil P3 (Pinto & Kämpf, 1996) pode ser decorrente de eventos erosivo-deposicionais do passado, o que indica uma história poligenética para os solos estudados. Mudanças climáticas abruptas, registradas no Quaternário do Rio Grande do Sul e relacionadas com o último ciclo glacial (Bombin & Klamt, 1974; Lorscheitter & Romero, 1985), podem representar uma causa provável para uma dinâmica erosiva mais vigorosa em um passado relativamente recente, capaz de expor material jovem para o início de formação de solo e de ter causado o rejuvenescimento das partes superiores dos perfis de modo, ainda hoje, perceptível na composição química e mineralógica dos solos.

CONCLUSÕES

1. Os solos desenvolvidos de rochas básico-ultrabásicas estudados mostram, nos horizontes superficiais, uma razão de concentração mais elevada dos elementos de maior mobilidade que a dos horizontes subjacentes, indicando uma descontinuidade entre eles. Os ganhos superficiais de K e Na indicam contaminações por rochas ácidas.

2. O rejuvenescimento dos horizontes superficiais, causado pela adição de materiais menos intemperizados a um material em estágio mais avançado de intemperismo, torna esses solos, química e mineralogicamente, semelhantes aos desenvolvidos de rochas ultrabásicas em regiões temperadas.

LITERATURA CITADA

- BERROW, M.L. & RIEVES, G.A. Total chromium and nickel contents of Scottish soils. *Geoderma*, Amsterdam, 37:15-27, 1986.
- BOMBIN, M. & KLAMT, E. Evidências paleoclimáticas em solos do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., Porto Alegre, 1974. Anais. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Geologia, 1974. v.3. p.183-193.
- CAMARGO, M.N.; KLAMT, E. & KAUFFMANN, J.H. Classificação de solos usada em levantamentos pedológicos no Brasil. *B. Inf. SBCS*, Campinas, 12:11-33, 1987.
- CARVALHO, I.G. Fundamentos da geoquímica dos processos exógenos. Salvador, Bureau Gráfica, 1995. 239p.
- 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, 1988. 67p. (Documentos SNLCS, 11)
- EUA. Soil Survey Staff. Keys to soil taxonomy. Blacksburg, Pocahontas Press, 1992. 556p. (SMSS Technical Monograph, 19)
- GOVETT, G.J.S. Critical factors in the colorimetric determination of silica. *Anal. Chim. Acta*, Amsterdam, 25:69-80, 1961.
- HALLMARK, C.T.; WILDING, L.P. & SMECK, N.E. Silicon. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D.R. eds. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*, Madison, American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, 1982. p.263-273. (Agronomy Monography, 9)
- LELONG, F.; TARDY, Y.; GRANDIN, G.; TRESCASES, J.J. & BOULANGE, B. Pedogenesis, chemical weathering and processes of formation of some supergene ore deposits. In: WOLF, K.H. ed. *Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits, I - Principles and general studies*, Amsterdam, Elsevier, 1976. v.3. p.93-173.
- LE MAITRE, R.W. A Classification of igneous rocks and glossary of terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences subcommission on the systematics of igneous rocks. Oxford, Blackwell, 1989. 193p.
- LIM, C.H. & JACKSON, M.L. Dissolution for total elemental analysis. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D.R., eds. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. Madison, American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, 1982. p.1-12. (Agronomy Monography, 9)
- LORSHEITTER, M.L. & ROMERO, E.J. Palynology of quaternary sediments of the core T15 Rio Grande Cone, South Atlantic, Brazil. In: RABASSA, J. ed. *Quaternary of South America and Antarctica Peninsula, Mar Del Plata*, Ashgate, 1985. v.3. p.55-92.
- MAXWELL, J.A. *Rock and mineral analysis*. New York, John Wiley, 1968. 584p. (Chemical Analysis Monograph, 27)
- MENEGOTTO, E. Intemperização de rochas ultrabásicas no Rio Grande do Sul, Brasil. *R. bras. Geoc.*, São Paulo, 13:178-189, 1983.
- Mc GRATH, S.P. & SMITH, S. Chromium and nickel. In: ALLOWAY, B.J. ed. *Heavy metals in soils*. London, Blackie and Son, 1990. p.125-150.
- OLIVEIRA, M.T.G. Petrologia do maciço máfico-ultramáfico do Passo do Ivo São Gabriel, Rio Grande do Sul. *Acta Geol. Leopold.*, São Leopoldo, 6:131-218, 1982.
- PERELMAN, A.I. *Geochemistry of epigenesis*. New York, Plenum Press, 1967. 266p.
- PINTO, L.F.S. Evolução de solos originados de rochas ultrabásicas no ambiente subtropical do Rio Grande do Sul, Brasil. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1994. 208p. (Dissertação de Mestrado)
- PINTO, L.F.S. & KÄMPF, N. Solos derivados de rochas ultrabásicas no ambiente subtropical do Rio Grande do Sul. *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 20:447-458, 1996.
- SANTOS, E.L.; AZEVEDO, G.C.; MACIEL, L.A.C.; MOSSMANN, R. & REMUS, M.V.D. Mapeamento geológico de sequências metavulcano-sedimentares do oeste do escudo sul-riograndense, RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36., Natal, 1990. Anais. Natal, Sociedade Brasileira de Geologia, 1990. v.6. p.2976-2990.