

## INTEMPERIZAÇÃO DE ROCHAS ULTRABÁSICAS NO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL

EGYDIO MENEGOTTO \*\*

**ABSTRACT** Results of a study on ultrabasic rock weathering under subtropical climate are presented.

The mineralogical evolution leads to the formation of nontronite and amorphous materials from the weathering of mafic-silicates, while the plagioclase, in the same rock, yields kaolinite and montmorillonite. The transformation of amorphous materials into goethite occurs in the soil and the clay minerals are preserved as aluminous nontronite.

The weathering action leads to strong loss of Mg and Ca, with partial retention of Si. Mg loss is more intense than that of Ca when both are components of silicates. If Ca is a carbonate component, as occurs in the serpentinites, its mobilization is quicker than that of Mg. Fe can be partially mobilized when it is contained in mafic silicates, but when it is a component of magnetite, as in serpentinites, Fe becomes absolutely fixed. Al and Ti are fixed. Mn, Cr, Ni, Co, V and Cu have the same behavior as Fe. Na behaves as Ca. During the first stages of weathering, K is lost, but it is fixed again in the soil by organic compounds and clay minerals.

The groundwater and supergenic mineral compositions are in equilibrium, and both indicate a *sial-ferritization* weathering type. The relative mobilities, based on the groundwater composition, show some differences as compared to the mobilities based on the use of the solid phase composition. Such differences are caused by some imprecisions in the methods themselves.

**INTRODUÇÃO** Com o objetivo de estabelecer um modelo evolutivo para a alteração de rochas ultrabásicas nas condições climáticas reinantes na região Sul do Brasil, foi feito um estudo sobre três maciços situados no Escudo Sul-rio-grandense. Esses três maciços, denominados de *Pedras Pretas*, *Passo do Ivo* e *Cerro Mantiqueiras*, estão localizados em latitudes compreendidas entre 30°S e 31°S (Fig. 1).

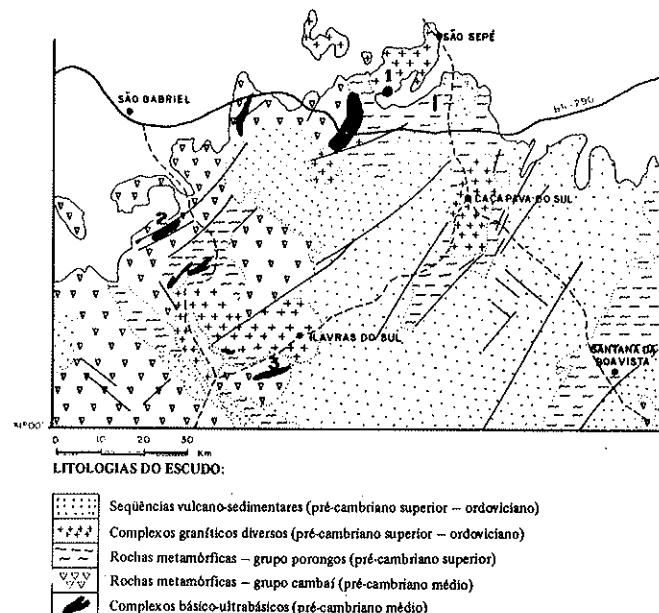


Figura 1 – Mapa de localização das áreas: 1. *Pedras Pretas*; 2. *Passo do Ivo*; 3. *Cerro Mantiqueiras*. (Carraro et al., 1974 - modificado).

Para alcançar esse objetivo, foi aplicada uma metodologia consagrada em trabalhos semelhantes, envolvendo coleta de amostras do manto de alteração (Melfi, 1967; Melfi & Levi, 1971; Levi & Melfi, 1972; Oliveira, 1980; Oliveira & Trescases, 1980; Schevciw, 1980; Trescases & Schevciw, 1980) e de água subterrânea, representada pelas fontes (Tardy, 1966, 1967 e 1969; Trescases, 1969 e 1975).

**O MATERIAL DE ORIGEM E AS CONDIÇÕES DO MEIO** A análise do condicionamento geológico local, da natureza das rochas e dos fatores ambientais é de fundamental importância para a avaliação dos processos desencadeados pela intemperização.

**Geologia** Todas as rochas ultrabásicas cuja alteração foi estudada neste projeto estão relacionadas aos complexos metamórficos que formam o embasamento mais antigo do Escudo Sul-rio-grandense, de idade provavelmente pré-cambriana média (Sartori, 1978; Menegotto, 1982).

**COMPLEXO BÁSICO-ULTRABÁSICO DAS PEDRAS PRETAS** É formado por uma unidade ultrabásica composta por peridotitos, circundada por uma unidade básica constituída de gabros (Rêgo, 1980, 1982). A litologia ultrabásica é representada fundamentalmente por plagioclásio harzburgito, como média ponderada das variedades de peridotitos encontradas. Entretanto, varia desde dunito até olivina norito, com ritmocidade vertical, em conjuntos bastante delgados. A mineralogia dessas rochas, consideradas em conjunto, é constituída por proporções variáveis dos seguintes minerais, cujas variações de teor determinam os diferentes tipos litológicos encontrados (Tab. 1): olivina,

\* Trabalho financiado pelo CNPq e FAPERGS, representando o resumo de parte da tese de doutoramento defendida perante o Instituto de Geociências da UFRGS, sob orientação dos professores Milton Luiz L. Formoso e Jean-Jacques Trescases.

\*\* Departamento de Geociências, UFSM – Cidade Universitária, Santa Maria, (CEP 97 100), RS

parcialmente serpentinizada; ortopiroxênio (enstatita) quase totalmente transformado em anfibólito (cummingtonita) pelo metamorfismo; plagioclásio (labradorita), em parte metamorfizado, dando uma mistura microcristalina de clorita, actinolita e andesina. Em menores proporções, ocorrem espinélio verde (pleonasto), espinélios opacos (magnetita, mais raro cromita), talco, flogopita, carbonato, clorita (clinocloro) e raros prismas aciculares de antofilita.

*Tabela 1 – Composição modal das principais litologias ultrabásicas de Pedras Pretas (%): 1. dunitos intensamente serpentinizados (4 amostras); 2. harzburgitos parcialmente serpentinizados (12 amostras); 3. plagioclásio harzburgitos (32 amostras); 4. olivina noritos (15 amostras).*

	1	2	3	4
Olivina	1,2	26,0	18,0	16,0
Serpentina	92,2	39,0	32,0	20,0
Ortopiroxênio	–	2,0	1,0	1,0
Anfibólitos	4,0	25,0	35,0	33,0
Clorita	0,6	2,0	2,0	3,5
Talco	–	0,5	0,5	–
Flogopita	–	0,5	1,0	–
Plagioclásio	–	–	6,0	24,0
Espinélio verde	–	2,0	2,0	1,0
Opacos	2,0	3,0	2,5	1,5
Carbonato	Tr	Tr	Tr	–
Olivina + serpentina	93,4	65,0	50,0	36,0
Σ maficos	98,0	95,0	89,5	73,5

**COMPLEXO BÁSICO-ULTRABÁSICO DE PASSO DO IVO** Com a forma de uma faixa alongada é composto predominantemente por peridotito, tendo pequenas ocorrências de gabros relacionados à parte sul (Oliveira, 1981). As litologias ultrabásicas são representadas principalmente por clinopiroxênio-hornblenda peridotito e hornblenda peridotito, associados a menores ocorrências de olivina-hornblenda piroxenito, olivina-clinopiroxênio hornblendito, raros talcos serpentinitos e serpentinitos. A composição mineralógica consta dos seguintes minerais primários (Tab. 2): olivina, clinopiroxênio (diopsídio-augita), hornblenda e espinélio opaco (magnetitita-cromita). Como produtos secundários endógenos, destacam-se: serpentina, originada a partir da olivina; anfibólitos (tremolita e/ou cummingtonita) provenientes do metamorfismo do piroxênio e da própria hornblenda; clorita (clinocloro) formando grandes folhas que envolvem minerais opacos e contendo massas fusiformes de carbonato distribuídas ao longo das clivagens; talco associado a clorita microfolheácea e carbonato microgranular; pequenos grãos de magnetita dispersos ou impregnando os demais minerais.

**COMPLEXO ULTRABÁSICO DE CERRO MANTIQUEIRAS** É formado por uma faixa serpentinitica; representando o metamorfismo e a hidratação endógena de antigos dunitos, harzburgitos e lherzolitos (Goffi, 1962; Menegotto, 1982). A composição mineralógica dessas rochas evidencia a presença predominante de minerais

*Tabela 2 – Composição modal das principais litologias ultrabásicas de Passo do Ivo (%): 1. clinopiroxênio-hornblenda peridotitos e hornblenda peridotitos coletados em toposequências (média de 20 amostras); 2. olivina-hornblenda piroxenito (1 amostra); 3. olivina-clinopiroxênio hornblenditos (média de 3 amostras); 4. talco serpentinitos "meta-harzburgitos" (média de 6 amostras); 5. serpentinito "metadunito" (1 amostra).*

	1	2	3	4	5
Olivina	25,5	18,0	23,0	–	–
Serpentina	29,0	8,0	10,0	44,5	90,0
Clinopiroxênio	7,0	(?)	9,0	–	–
Piroxênio (clino + orto)	–	48,0	–	–	–
Anfibólitos	25,0	17,0	42,0	8,0	–
Clorita	8,0	6,0	10,0	8,0	–
Talco	Tr	Tr	1,5	33,5	7,0
Opacos	5,0	3,0	3,5	3,5	3,0
Carbonato	0,5	–	1,0	2,5	Tr
Olivina + ser- pentina	54,5	26,0	33,0	44,5	90,0
Σ maficos	94,5	97,0	95,5	94,0	97,0

de transformação secundária endógena, como serpentina, anfibólitos, clorita (clinocloro), talco, carbonato e diminutos grãos de magnetita (Tab. 3). A essa mineralogia associam-se esporádicas concentrações de piroxênios, espinélios opacos (cromita e magnetita) de dimensões superiores a 1mm e raros núcleos de olivina. Os piroxênios encontrados são ortopiroxênios (enstatita-bronzita) e clinopiroxênio (diopsídio). Os anfibólitos têm diferentes aspectos texturais: antofilita em longos prismas bem cristalizados e tremolita com caráter pseudomórfico de clinopiroxênio.

**Clima** A região onde ocorrem os três maciços ultrabásicos apresenta clima subtropical, com estações térmicas bem definidas e contrastantes (Tab. 4).

*Tabela 3 – Composição modal das rochas ultrabásicas de Cerro Mantiqueiras (%): 1. serpentinito "metadunito" (média de 10 amostras); 2. meta-harzburgito (média de 4 amostras); 3. metalherzolito (2 amostras).*

	1	2	3
Olivina	0,5	5,5	5,0
Serpentina (de olivina)	91,0	52,0	54,0
Bastita (de ortopiroxênio e antofilita)	–	4,5	–
Ortopiroxênio	–	18,5	13,0
Clinopiroxênio	–	1,5	7,5
Antofilita	1,0	5,5	2,0
Tremolita	–	1,5	8,5
Clorita	1,0	1,0	1,5
Talco	2,0	5,0	3,0
Opacos	4,0	5,0	5,5
Carbonato	0,5	–	–
Olivina + serpentina (de olivina)	91,5	57,5	59,0
Ortopiroxênio + bastita + antofilita + talco	3,0	33,5	18,0
Clinopiroxênio + tremolitita + clorita	1,0	4,0	17,5
Σ maficos	95,5	95,0	94,5

**Tabela 4 — Dados climáticos médios anuais e sazonais das áreas Pedras Pretas (São Sepé), Passo do Ivo (São Gabriel) e Cerro Mantiqueiras (Bagé): verão (dezembro, janeiro e fevereiro); outono (março, abril e maio); inverno (junho, julho e agosto); primavera (setembro, outubro e novembro).**

		São Sepé	São Gabriel	Bagé
Precipitação média anual (mm)		1.327,1	1.375,6	1.371,0
Evaporação média anual (mm)		593,3	1.013,5	1.472,6
Umidade relativa média anual (%)		83,3	74,5	73,7
Temperatura (°C)	média	do verão (°C)	24,4	23,6
		do outono (°C)	19,3	18,4
		do inverno (°C)	13,5	12,9
		da primavera (°C)	19,2	18,0
absoluta	do período		39,6	39,5
	do período		-4,5	-4,7
Amplitude térmica anual (°C)		44,1	44,2	45,8

O regime pluvial caracteriza-se pela distribuição das chuvas ao longo de todo o ano, alcançando médias anuais entre 1.300 mm e 1.400 mm. Pequenos períodos mais secos são identificados entre fevereiro e maio e no mês de novembro (Menegotto, 1982). O inverno é o período chuvoso mais longo e o que precipita o maior volume de água, mas as grandes enxurradas ocorrem no verão.

A variação de temperatura é grande, com valores negativos em muitos dias no inverno e máximas absolutas superiores a 39 °C no verão. Dessa forma, a amplitude térmica absoluta pode atingir 45 °C. A taxa de evaporação acompanha o comportamento da temperatura. Todavia, existem flagrantes diferenças entre as três áreas (Tab. 4), ocasionando déficit hídrico apenas no verão em Pedras Pretas, na maior parte do ano (exceto o inverno) em Passo do Ivo e durante todo o ano em Cerro Mantiqueiras.

**Relevo e drenagem** O relevo desenvolvido nas áreas ultrabásicas estudadas é composto por pequenas elevações, em geral pedregosas. Os desniveis são inferiores a 100 m, tendo geralmente pequenas declividades que terminam em locais planos situados em cotas intermediárias (superfícies planas intermediárias), os quais se ligam a baixadas por meio de voçorocas. Encostas íngremes estão restritas ao lado oeste do maciço de Pedras Pretas e à área de Cerro Mantiqueiras. Os topos das elevações são arredondados, exceto em Pedras Pretas, onde se formam pequenos platôs.

A drenagem, no interior dos maciços ultrabásicos, é formada por pequenos córregos, em sua maior parte intermitentes, que desaguam em arroios maiores situados na periferia.

**Solos e vegetação** O solo originado pela alteração, das litologias ultrabásicas, sob as condições climáticas locais, é representado principalmente por litossolo de pequena espessura. Nas encostas mais íngremes são encontradas áreas de ausência de solo (afloramento de rocha ou saprólitico). Em sopés de encostas íngremes desenvolve-se um profundo solo coluvial, com horizonte B inci-

plente (cambissolo). Nas superfícies planas intermediárias e encostas de baixa declividade pode ser encontrado um solo de pequena espessura, com horizonte B textural (brunizem avermelhado raso). Pequenas ocorrências de solos hidromórficos (vertissolo e gley húmico) são encontradas nas baixadas, junto aos cursos d'água.

A vegetação é escassa, formada predominantemente por gramíneas. Árvores e arbustos desenvolvem-se ao longo dos cursos d'água (matas-galeria). Quando crescem sobre encostas ou elevações dos maciços ultrabásicos, as árvores tendem a ser anãs e retorcidas, com pequeno desenvolvimento de folhas.

**EVOLUÇÃO MINERALÓGICA** A evolução mineralógica da rocha ultrabásica original, até a formação do solo, ocorreu em diversos episódios, ocasionada por dois conjuntos de fatores (Fig. 2): evolução endógena (metamorfismo e serpentinização) e evolução supérgea (alteração e pedogênese).

**Evolução endógena** Nas rochas ultrabásicas dos três maciços estudados, o metamorfismo é caracterizado pela anfibolitização total ou parcial dos piroxênios, acompanhada ou seguida de cloritização (Fig. 2). Diferentes aspectos texturais entre a antofilita e os demais anfibólitos permitem deduzir que, em Cerro Mantiqueiras, ocorreram duas fases de metamorfismo (Menegotto, 1982).

A serpentização, intensa em Cerro Mantiqueiras e moderada nas outras duas áreas, ocorreu em três etapas (Fig. 2): a primeira, contemporânea à anfibolitização dos piroxênios, afetou parcialmente a olivina, dando origem aos quadriculados fibrosos (serpentina I) que formam os bordos das malhas; a segunda desenvolveu a serpentina microfolheácea dos centros das malhas a partir da olivina (serpentina II) e a bastitização parcial de ortopiroxênio, antofilita e cummingtonita (serpentina III); a terceira formou os veios fibrosos que acompanham o sistema de fissuramento das rochas (serpentina IV).

Em Pedras Pretas e em um ponto isolado de Passo do Ivo, a associação peculiar entre espinélio verde (pleonastito) e filossilicatos (clorita, flogopita e vermiculita) sugere a possibilidade de metassomatismo de contato provocado por intrusões de granito (Menegotto, 1982).

**Evolução supérgea** Como resultado da atuação dos fatores climáticos sobre as rochas ultrabásicas, formou-se um manto de alteração contendo as fácies *rocha dura*, *saprólito* e *solo*.

A rocha dura representa o estádio mais incipiente de alteração, afetando apenas parcialmente as fases mineralógicas mais instáveis e com diminuição da densidade aparente de 2,8 para cerca de 2,5. Em torno dos blocos de rocha dura, forma-se uma película mais clara e leve, onde a alteração está em estádio mais avançado, o *cortex*.

O saprolito é o produto do amolecimento geral da rocha, sem perda da estrutura, indicando alteração mais intensa dos minerais. Quando formado predominantemente por partículas  $>250\mu$ , é denominado de saprolito grosso, caso contrário é dito saprolito fino. A den-

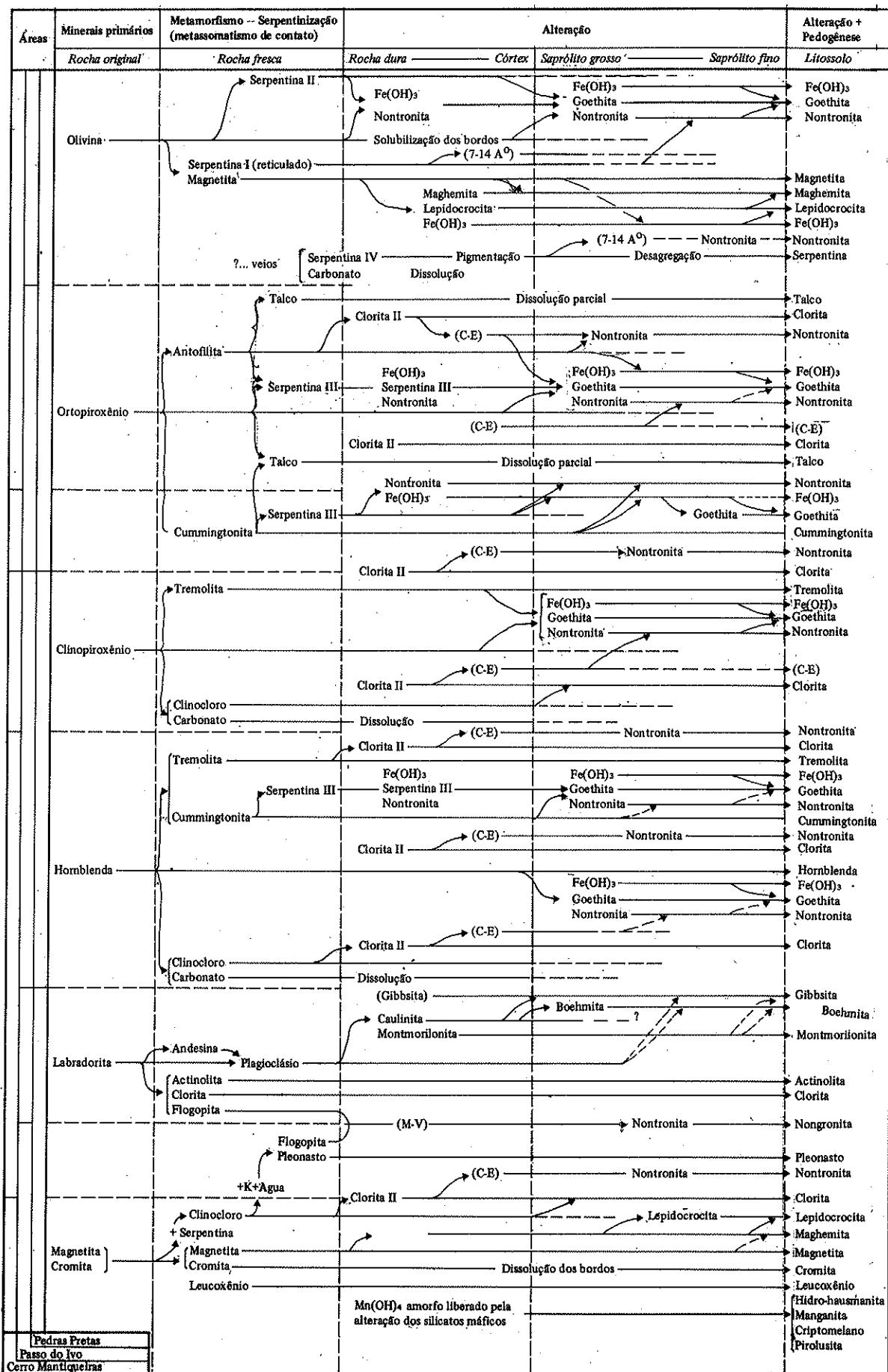


Figura 2 – As filiações mineralógicas

sidade aparente é da ordem de 1,6 a 1,2, indicando uma perda de cerca de 50% da massa original da rocha.

O solo é uma fácie onde há intensificação da atuação dos processos intempéricos, mas atuam também de maneira marcante os processos pedogenéticos. Assim, além das perdas provocadas pelo intemperismo, verificam-se incorporações (matéria orgânica) e translocações (géis amorfos de Al, Fe e Mn).

A alteração inicial caracteriza-se pela hidrólise dos silicatos máficos de menor estabilidade. Dessa forma, já na rocha dura e camada de córtex estão alterados olívina, piroxênios, serpentina dos centros das malhas (serpentina II) e bastitas (serpentina III). Esses minerais raramente alcançam a fácie saprolito. O produto de sua alteração, além de íons solúveis que são lixiviados, é composto por material amorfos (ferruginoso) e esmectitas (nontronita), que constituem a fase sólida (Fig. 2). Neste mesmo estádio, o carbonato é totalmente solubilizado sem deixar resíduos, não sendo mais encontrado no saprolito. A clorita magnesiana (clinocloro) é transformada em clorita II (férrica), em um processo que pode ter iniciado na serpentização, mas que se intensifica na alteração inicial e se completa na fácie saprolito (Menegotto, 1982).

Na fácie saprolito ocorre o clímax da alteração do plagioclásio, que havia iniciado na fácie rocha dura e se completa antes de formar o solo. Seus produtos sólidos são a caulinata e a montmorilonita. Neste estádio, completa-se também a alteração da serpentina fibrosa dos bordos das malhas (serpentina I), solubilizando-se parcialmente e originando pequenas porções de nontronita, ao que parece através de um interestratificado de 21 A° (Menegotto, 1982). A flogopita é alterada completamente, evoluindo para nontronita com a formação de interestratificados com vermiculita.

Dos anfibólios, apenas a antofilita é alterada completamente antes de alcançar a fácie solo. Os demais, ainda que na fácie saprolito mostrem uma alteração moderada, são concentrados (em termos relativos) no solo. Como produtos da alteração dos anfibólios, originam-se resíduos amorfos e nontronita.

A serpentina fibrosa dos veios (serpentina IV) é mais estável, sofrendo desagregação mecânica acompanhada de uma pequena taxa de solubilização, deixando resíduos amorfos e nontronita. É concentrada, em termos relativos, no solo, com anfibólios e com o talco, cuja única forma de alteração perceptível é uma pequena solubilização dos bordos.

Os espinélios opacos são oxidados e hidratados, originando em seus bordos maghemita, lepidocrocita e/ou goethita. Têm elevada concentração no solo, junto com espinélio verde (pleonasto) e leucoxênio, que são totalmente estáveis.

O principal produto supérigeno é a esmectita. A ela associam-se clorita II (férrica), interestratificados clorita-esmectita, óxidos e hidróxidos de Fe, Mn e Al. O plagioclásio dá origem também a caulinata, de caráter transitório, que se perde na composição geral das fácies. Da mes-

ma forma, são transitórios os interestratificados flogopita-vermiculita.

A esmectita formada pela alteração dos silicatos máficos é nontronita, enquanto a desenvolvida pelo plagioclásio é montmorilonita. Ainda que abundante em todas as fácies, a esmectita atinge os maiores teores no saprolito fino e no horizonte B do solo, onde tem sua melhor cristalinidade.

A clorita secundária, formada por transformações de clinocloro e outros silicatos máficos, ocorre associada a grande quantidade de interestratificados 14C-14M. É abundante em todas as fácies, mas principalmente no saprolito grosso. Diminui de teor no saprolito fino, o que se deve, em parte, à alteração da nontronita evidenciada pelos interestratificados.

Os principais óxidos e hidróxidos supérigenos são goethita e materiais amorfos. A eles associam-se lepidocrocita, manganita, hidro-hausmanita, criptomelano, pirolusita, gibbsita e boehmita, sempre em proporções ínfimas. Nos estádios finais (solo), as fases cristalinas dos óxidos e hidróxidos atingem seu clímax, organizando-se sob forma de oólitos, enquanto o teor de amorfos torna-se pequeno, o que indica uma desidratação parcial.

**COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA FASE SÓLIDA** A fase sólida compõe-se dos minerais residuais (resistatos) e minerais produzidos pelo intemperismo (hidrolisatos). A composição das diferentes fácies do manto de intemperismo é consequência da composição e das proporções desses minerais.

**Composição das fácies** As Tabs. 5, 6 e 7 ilustram as composições químicas médias (tomadas como amostra total) das rochas e das principais fácies do manto de intemperismo nas três áreas estudadas.

Pela análise das tabelas, verifica-se que, durante a intemperização, somente o Mg diminui fortemente de teor, passando de cerca de 30% de MgO nas rochas a pouco mais de 5% no solo. Ca, Na e K também diminuem de teor na transição entre rocha e saprolito, mas de maneira mais moderada que o Mg. No solo, esses elementos podem ser novamente concentrados em virtude de sua adsorção aos argilominerais ou fixação em compostos orgânicos.

O Si permanece quase constante ao longo do perfil, o que implica o aumento da razão SiO<sub>2</sub>/MgO no sentido das fácies superficiais. Este fato, que identifica uma lixiviação de Si bem inferior à do Mg, pode sugerir baixa agressividade do clima ou meio pouco drenado (Pedro & Bittar, 1966).

A hidratação aumenta no sentido das fácies com maior teor de esmectita (saprolito fino, horizonte B do solo). No horizonte A do solo, ocorre pequena desidratação, não suficiente para provocar a transformação da goethita em hematita verificada em clima tropical (Oliveira, 1980).

Fe e Al aumentam fortemente de teor durante a alteração. A maior proporção desses elementos é alcançada no horizonte B do solo, quando presente, para onde migram, sob forma de géis amorfos, por translocação iluvial (Duchaufour, 1965). Os demais elementos determinados (Mn, Ti, Cr, Co, V, Cu) aumentam de teor no sentido do

Tabela 5 - Composição química média das fácies dos perfis na área de Pedras Pretas, desenvolvidos sobre plagioclásio harzburgitos (solos de diversas classes).

Nº de amostras	Rocha	Saprólito	Saprólito	Horizonte	Horizonte
	G.	F.	B	A	
	30	30	11	07	26
C org.	—	—	—	0,34	2,69
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	10,0	13,9	14,4	15,9	14,8
SiO <sub>2</sub>	37,8	36,9	37,0	24,6	35,4
MgO	29,0	17,0	10,8	6,17	5,37
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,56	17,0	21,0	25,2	26,0
FeO	6,45	3,64	2,30	0,96	—
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,85	8,55	11,6	14,0	12,1
CaO	2,03	1,58	1,53	1,08	1,44
MnO	0,18	0,25	0,27	0,29	0,35
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,16	0,22	0,25	0,31	0,32
TiO <sub>2</sub>	0,23	0,39	0,32	0,65	0,72
Na <sub>2</sub> O	0,22	0,19	0,21	0,19	0,23
K <sub>2</sub> O	0,051	0,043	0,061	0,10	0,11
NiO	0,084	0,11	0,12	0,13	0,12
Total	99,62	99,77	99,86	99,92	99,65
Co ppm	140	180	210	250	204
V ppm	49	66	68	87	86
Cu ppm	80	95	110	144	103
* Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> t	15,7	21,0	23,5	26,2	26,0
% oxid. Fe	54,5	80,9	89,4	96,2	100,0
SiO <sub>2</sub> /MgO	1,30	2,17	3,43	5,61	6,59
SiO <sub>2</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> t	2,40	1,76	1,57	1,32	1,36
i*	0,71	1,74	3,25	6,51	7,09
i**	0,29	0,53	0,71	0,96	0,90
Densidade	2,71	1,55	1,16	—	—

\* Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> t = ferro total calculado como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

\*\* i = índice de alteração definido por WACKER-MANN (1975). (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> t + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/MgO.

\*\*\* i' = índice de alteração adequado às condições locais. (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/(SiO<sub>2</sub> + MgO + CaO).

Tabela 6 - Composição química média das fácies dos perfis na área de Passo do Ivo, desenvolvidos sobre hornblenda peridotitos e clinopiroxênio-hornblenda peridotitos (litossolos).

Nº de amostras	Rocha	Saprólito	Horizonte A
	11	12	13
C org.	—	—	2,91
CO <sub>2</sub>	0,19	—	—
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	10,7	13,5	14,6
SiO <sub>2</sub>	39,2	41,3	42,9
MgO	30,8	18,2	7,22
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,4	16,3	19,5
FeO	2,68	1,75	0,33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,40	5,30	8,31
CaO	2,26	1,50	1,69
MnO	0,17	0,24	0,26
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,60	0,74	0,82
TiO <sub>2</sub>	0,20	0,48	0,81
Na <sub>2</sub> O	0,17	0,15	0,18
K <sub>2</sub> O	0,046	0,042	0,075
NiO	0,092	0,12	0,12
Total	99,91	99,62	99,73
Co ppm	140	180	147
V ppm	73	108	103
Cu ppm	58	103	96
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> t	13,4	18,2	19,8
% oxid. Fe	77,6	89,6	98,5
SiO <sub>2</sub> /MgO	1,27	2,27	5,94
SiO <sub>2</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> t	2,92	2,27	2,17
i	0,51	1,29	3,89
i'	0,22	0,39	0,54
Densidade	2,69	1,35	—

Tabela 7 - Composição química média das fácies dos perfis na área de Cerro Mantiqueiras, desenvolvidos sobre dunitos e peridotitos altamente serpentinizados (litossolos).

Nº de amostras	Rocha	Saprólito	Horizonte A
	09	10	05
C org.	—	—	2,16
CO <sub>2</sub>	0,43	—	—
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	11,1	14,2	15,9
SiO <sub>2</sub>	39,9	40,5	43,5
MgO	36,3	25,6	10,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,28	14,8	21,6
FeO	1,92	1,23	0,07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,72	1,31	2,82
CaO	0,85	0,23	0,37
MnO	0,09	0,17	0,23
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,94	1,32	1,63
TiO <sub>2</sub>	0,02	0,02	0,15
Na <sub>2</sub> O	0,031	0,021	0,048
K <sub>2</sub> O*	Tr*	Tr*	Tr*
NiO	0,19	0,23	0,25
Total	99,77	99,63	99,30
Co ppm	159	311	280
V ppm	45	90	104
Cu ppm	5	9	8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> t	9,4	16,2	21,7
% oxid. Fe	77,4	91,4	99,5
SiO <sub>2</sub> /MgO	1,10	1,58	4,03
SiO <sub>2</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> t	4,24	2,50	2,00
i	0,28	0,68	2,27
i'	0,13	0,26	0,45
Densidade	2,60	1,50	—

\* Tr = K<sub>2</sub>O < 0,001%

topo do perfil, acompanhando o comportamento de Fe e Al. A concentração desses elementos residuais no solo é mais acentuada nos sopés e baixadas, deslocados pela migração coluvial das partículas que os contêm (óolitos de óxidos e hidróxidos cristalinos ou minerais primários residuais).

#### Composição dos constituintes minerais

A intemperização provoca uma seleção mecânica, concentrando os argilominerais e substâncias amorfas predominantemente na fração mais fina (<2μ) de todas as fácies, enquanto os minerais herdados convergem para a fração de granulometria entre 250μ e 62μ e os óxidos e hidróxidos cristalinos secundários formam óolitos de tamanho superior a 250μ, localizados preferencialmente no solo. Como consequência dessa divergência, verifica-se uma dispersão dos elementos químicos em função da granulometria, não muito acentuada em virtude do grande número de espécies envolvidas.

As análises químicas das frações mineralógicas isoladas (Menegotto, 1982), representadas sob forma de fórmulas estruturais (Tab. 8), indicam que os silicatos máficos tendem aos extremos magnesianos. A proporção Fe/Mg é muito baixa, exceto na cummingtonita de Pedras Pretas (69% do extremo magnesiano e 31% do extremo ferroso). Entre os silicatos máficos, somente hornblenda e clorita têm considerável teor de Al. O Al, junto com o Ca, é também importante constituinte da labradorita de Pedras Pretas (37% da molécula de albita e 63% de anortita).

O posicionamento estrutural do Al é tetraédrico no

Tabela 8 - Fórmulas estruturais dos minerais das rochas ultrabásicas estudadas (Menegotto, 1982).

	<i>Ca</i>	<i>Na</i>	<i>K</i>	<i>Mg</i>	<i>Fe<sup>++</sup></i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>Co</i>	<i>V</i>	<i>Cr</i>	<i>Fe<sup>+++</sup></i>	<i>Al<sup>VI</sup></i>	<i>Ti</i>	<i>Al<sup>IV</sup></i>	<i>Si</i>	<i>O</i>	<i>OH</i>
1.	—	—	—	1,75	0,20	0,01	0,01	—	—	0,01	0,06	—	—	—	0,97	4,00	—
2.	—	—	—	2,91	0,02	—	0,02	—	—	—	—	0,01	—	—	1,95	4,71	4,29
3.	—	—	—	2,97	0,02	—	0,01	—	—	—	—	0,03	—	—	1,95	4,83	4,17
4.	—	—	—	3,08	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,87	4,66	4,34
5.	—	—	—	2,95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,93	4,69	4,31
6.	—	—	—	2,91	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,95	4,62	4,38
7.	0,10	0,08	0,02	4,81	1,71	0,04	0,01	0,01	—	0,02	0,44	—	0,05	0,97	6,96	21,81	2,19
8.	0,16	0,22	0,03	4,24	0,81	0,06	0,02	—	—	0,05	0,35	—	0,04	1,48	6,45	21,14	2,86
9.	—	—	—	6,30	0,48	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,21	7,76	21,23
10.	0,05	—	—	9,08	0,61	—	0,03	—	—	0,02	0,42	1,90	—	2,07	5,93	20,11	15,89
11.	—	—	—	9,98	0,45	—	—	—	—	0,02	1,77	—	—	1,91	6,09	20,34	15,66
12.	0,06	—	—	5,99	0,15	—	—	—	—	—	0,04	—	—	0,06	7,83	20,00	4,00
13.	0,64	0,37	0,02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,64	2,35	8,00
14.	—	—	—	0,66	0,42	—	—	—	—	0,03	0,24	1,66	0,03	—	—	4,00	—
15.	—	—	—	—	0,90	0,02	—	—	0,04	0,16	1,66	0,15	0,08	—	—	4,00	—
16.	—	—	—	0,04	0,39	0,01	—	—	0,01	0,28	1,98	0,06	0,03	—	0,02	4,00	—
17.	—	—	—	0,09	0,92	—	—	—	—	0,74	1,37	—	—	—	—	4,00	—

1. Olivina de Pedras Pretas e Passo do Ivo
3. Serpentina dos veios de Pedras Pretas
5. Serpentina das bastitas de Cerro Mantiqueiras
7. Cummingtonita de Pedras Pretas
9. Antofilita de Cerro Mantiqueiras
11. Clorita de Cerro Mantiqueiras
13. Plagioclásio de Pedras Pretas
15. Espinélio opaco de Pedras Pretas
17. Espinélio opaco de Cerro Mantiqueiras

2. Serpentina microfolheácea de Pedras Pretas
4. Serpentina de Cerro Mantiqueiras (metadunitos)
6. Serpentina de veios de Cerro Mantiqueiras
8. Hornblenda de Passo do Ivo
10. Clorita de Passo do Ivo
12. Talco de Passo do Ivo
14. Espinélio verde de Pedras Pretas
16. Espinélio opaco de Passo do Ivo

plagioclásio e nos anfíbólios. Na clorita, o Al distribui-se de maneira semelhante nas posições tetraédrica e octaédrica.

O Ca, além de participar da composição do plagioclásio, é também um constituinte importante do carbonato, do clinopiroxênio e de alguns anfíbólios (tremolita-actinolita). O K relaciona-se à flogopita, mas a expressão deste mineral é pequena. Junto com Na, o K é também encontrado na hornblenda e no plagioclásio.

O Cr é abundante no espinélio opaco de Cerro Mantiqueiras. Em Passo do Ivo, o espinélio opaco está oxidado e é pouco cromífero, enquanto em Pedras Pretas tem a composição da magnetita. Nesta última área há também o espinélio verde, cuja composição inclui proporções de Al, Fe e Mg equivalente ao pleonasto, concordando com as determinações baseadas em densidade e índice de refração.

O Ti relaciona-se quase exclusivamente ao leucoxênio. Junto com o Mn faz parte, também, dos espinélios opacos e dos anfíbólios. Pequenas proporções de Mn são encontradas na olivina. O Ni participa de quase todos os silicatos máficos, sempre em pequena proporção, enquanto o Co só foi verificado na hornblenda e o V nos espinélios opacos.

Na Tab. 9 constam as análises químicas de esmectitas e de hidróxidos cristalinos. A Tab. 10 mostra o cálculo das fórmulas estruturais das esmectitas, com eliminação da proporção de amorfos e sem esse desconto.

Tabela 9 - Composição química de frações mineralógicas. Concentrados de produtos supérigos: esmectita e ólitos de óxidos e hidróxidos (Menegotto, 1982).

	18	19	20	21	22	23
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	17,89	18,92	20,50	17,87	7,30	11,37
SiO <sub>2</sub>	40,21	38,20	37,90	49,46	6,70	8,14
MgO	3,30	2,20	5,10	4,74	3,95	10,69
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,37	27,60	20,07	12,06	64,70	56,12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,45	10,50	13,60	12,27	9,15	6,41
CaO	1,83	0,45	1,30	1,34	0,45	0,35
MnO	0,36	0,26	0,10	0,24	3,94	2,53
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,26	0,14	0,09	—	1,45	2,90
TiO <sub>2</sub>	0,30	0,54	0,12	0,61	0,98	0,27
Na <sub>2</sub> O	0,20	0,12	0,30	0,24	0,01	0,01
K <sub>2</sub> O	0,09	0,06	0,08	0,34	—	0,01
NiO	0,08	0,06	0,03	—	0,44	0,33
CoO	0,023	0,014	0,007	—	0,29	0,20
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,012	0,016	0,008	—	0,15	0,11
CuO	0,024	0,025	0,019	—	0,007	0,001
ZrO <sub>2</sub>	—	—	—	—	0,006	0,005
Total	99,40	99,11	99,22	99,17	99,52	99,72

18. Esmectita extraída da fração fina do saprolito fino formado sobre plagioclásio harzburgito.
19. Esmectita extraída da fração fina do horizonte B textural formado sobre plagioclásio harzburgito.
20. Esmectita extraída da fração fina do horizonte B textural formado sobre plagioclásio harzburgito.
21. Esmectita extraída da fração fina do horizonte A de solo de baixada, formado sobre olivina norito, com muito plagioclásio.
22. Ólitos avermelhados extraídos do horizonte A dos solos de Pedras Pretas.
23. Ólitos avermelhados extraídos de litossolos de Passo do Ivo.

Tabela 10 – Fórmulas estruturais das esmectitas: número de cátions calculados para 11 oxigênios, a partir das análises abaixo referidas constantes da Tabela 9.

Análise	*	Ca	Na	K	Mg	Mg	Mn	Ni	Fe <sup>+++</sup>	Cr	Al <sup>VI</sup>	Al <sup>IV</sup>	Si
18	a	0,16	0,03	0,01	0,22	0,69	0,02	0,01	1,63	0,02	0,14	0,68	3,32
	b	0,32	0,06	0,02	0,10	0,74	—	—	1,04	0,04	0,18	0,27	3,73
19	a	0,04	0,02	0,01	0,26	0,01	0,01	—	1,73	0,01	0,24	0,79	3,21
	b	0,05	0,02	0,01	0,16	0,22	—	—	1,37	0,01	0,40	0,39	3,61
20	a	0,11	0,05	0,01	0,43	0,21	0,04	—	1,25	0,01	0,49	0,84	3,16
	b	0,15	0,06	0,01	0,31	0,56	—	—	0,94	0,01	0,49	0,53	3,47
21	a	0,11	0,04	0,03	0,14	0,40	—	—	0,70	—	0,90	0,20	3,80
	b	0,12	0,04	0,03	0,14	0,51	—	—	0,58	—	0,91	0,10	3,90

\* a = uso da análise total, sem eliminação dos amorfos. Eliminado só o Ti pela presença de leucoxênio.

b = cálculo após a subtração de Fe, Al, Si, Mn e Ni amorfos ou pouco cristalinos (Segalen, 1968).

A esmectita formada depende da natureza mineralógica das rochas. Em litologias sem plagioclásio, tem origem nontronita *sensu stricto*. Havendo plagioclásio, forma-se um termo de uma série entre nontronita aluminosa e montmorilonita férrica, ou uma mistura dos dois termos extremos (Menegotto, 1982). A distribuição do Al nas esmectitas depende da relação entre Al e Fe: na nontronita, quase todo o Al é tetraédrico, diminuindo o teor de Si; na montmorilonita, os tetraedros são ocupados por Si, indo o Al para posições octaédricas. O complexo de troca determinado pelas técnicas preconizadas por Vettori (1969) é representado por elevada proporção de Mg (20 a 30 miliequivalentes por 100 g), acompanhado de Ca (<10 me/100 g) e diminutas proporções de Na e K. Além de ocupar posição de troca, o Mg pode ser também encontrado nas camadas octaédricas, principalmente nas esmectitas mais aluminosas (montmorilonita).

O complexo amorfó (dosados pelas técnicas de Segalen,

1968) é férrico em Passo do Ivo e Cerro Mantiqueiras. Na área de Pedras Pretas, pela presença de plagioclásio nas rochas, o complexo amorfó é composto por Fe, Si e Al. As proporções de Fe e Al amorfos são aproximadamente equivalentes às existentes nas rochas. A proporção de amorfos, em relação ao teor total nas rochas, alcança 70% do Fe e do Al e 50% do Si no saprolito. No solo, essa proporção baixa, em função da cristalização dos hidróxidos e óxidos e do aumento da cristalinidade das esmectitas.

Os oólitos formados pelos hidróxidos e óxidos cristalinos são constituídos principalmente pelo Fe contido na goethita (Tab. 9). Al e Mn, em menores proporções, também originam fases cristalinas próprias. Os demais elementos residuais relacionam-se a esses minerais. O próprio Al, em parte, é um dos componentes importantes da goethita, o que é evidenciado pelo seu elevado teor

Tabela 11 – Composição média das águas subterrâneas (mg/l).

Área*	Fontes	Estação**	pH	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Si	Mg	Ca	Na	K	Fe	Al	Mn	Cu
P.P.	4	v	6,9	94	16,1	33,1	8,4	4,2	0,84	0,65	0,15	0,09	0,10
		o	7,0	80	12,7	25,6	5,7	3,3	0,63	0,41	0,11	0,08	0,08
		i	7,1	75	11,8	25,5	5,5	2,7	0,60	0,35	0,13	0,06	0,09
		p	7,1	79	12,0	31,2	6,3	2,9	0,65	0,35	0,15	0,08	0,09
P.I.	3	v	6,9	36	10,2	19,4	6,6	2,8	2,59	1,26	0,09	0,07	0,17
		o	7,0	34	9,1	16,3	4,7	2,7	1,39	0,43	0,08	0,03	0,15
		i	7,0	29	7,6	13,2	3,4	1,9	1,41	0,34	0,08	0,03	0,13
		p	7,0	31	12,3	18,2	3,6	2,4	1,69	0,68	0,07	0,04	0,13
C.M.	4	v	7,0	113	13,3	23,5	6,9	2,6	1,05	1,10	0,07	0,13	0,10
		o	7,3	78	9,9	18,2	4,0	2,0	0,45	0,83	0,06	0,06	0,09
		i	7,6	40	9,0	16,2	2,1	1,1	0,44	0,43	0,05	0,04	0,09
		p	7,5	50	9,6	16,6	2,6	1,4	1,10	0,44	0,06	0,04	0,10

\* P.P. = Pedras Pretas; P.I. = Passo do Ivo; C.M. = Cerro Mantiqueiras

\*\* v = verão o = outono i = inverno p = primavera

nos oólitos em relação à pequena incidência de gibbsita e/ou boehmita.

**COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA FASE SOLÚVEL** A composição da fase solúvel, liberada pelas reações de hidrólise que ocorrem durante a intemperização, pode ser estimada por meio do estudo das águas que circulam no manto de alteração.

O pequeno débito em todas as fontes cuja água foi analisada (coletas mensais, durante dois anos) ocasiona elevada concentração de elementos químicos (Tab. 11). Essa concentração torna-se mais acentuada no verão, quando existe forte evaporação e pouca precipitação. Algumas fontes chegam a secar no verão porque a área e a espessura do aquífero, representado pelo manto de intemperismo, são pequenas.

As águas subterrâneas de Pedras Pretas e Passo do Ivo são neutras, enquanto as de Cerro Mantiqueiras tendem a alcalinas. O pH torna-se um pouco menor no verão pela concentração de ácidos (orgânicos ou o próprio  $\text{HCO}_3^-$ ). O ânion  $\text{HCO}_3^-$ , representativo do carbonato total, concentra-se de maneira marcante nas fontes das baixadas, nas quais a atividade orgânica produtora de  $\text{CO}_2$  é mais efetiva porque a água aflora através do solo. Por outro lado, o teor deste ânion depende também da quantidade de carbonato nas rochas.

Todos os elementos tendem a se concentrar nas fontes situadas nos pontos mais baixos do relevo. A causa dessa concentração é a maior distância percorrida pela água em sua migração no interior do manto de intemperismo (Tardy, 1967), o que permite que receba maior proporção de elementos liberados pela hidrólise. O K pode fazer exceção porque é facilmente adsorvido aos argilominerais ou retidos em compostos orgânicos.

A razão  $\text{SiO}_2/\text{MgO}$ , nas águas analisadas, é sempre inferior à mesma razão nas rochas. Por esse motivo, pode-se afirmar que a velocidade de evacuação do Mg é maior que a do Si, concordando com o verificado no estudo geoquímico da fase sólida e explicando a significativa formação e preservação das esmectitas. O teor de sílica, sempre inferior a 130 ppm, explica a inexistência de silicificações provocadas pela presente alteração das rochas ultrabásicas.

A razão  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$ , nas águas, decresce à medida que a concentração aumenta. Opostamente, a razão  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  é mais alta nas soluções mais concentradas. Essas duas razões são, portanto, indicadoras da influência do clima na composição das águas subterrâneas. Tal comportamento, concordante com o citado por Tardy (1969), foi observado nas águas subterrâneas de Pedras Pretas e Cerro Mantiqueiras, mas não foi confirmado em Passo do Ivo, onde as variações dessas razões são aleatórias.

Os teores de Fe, Al e Mn (talvez também de cobre), em solução nas águas subterrâneas, ficam superestimados, em vista da presença de partículas sólidas de diminutas dimensões (talvez coloidais), que não são separadas pelas filtrações (Tardy, 1969).

A concentração de todos os elementos dissolvidos nas

águas subterrâneas analisadas tende a elevar-se no verão, diminuindo no inverno. A causa dessa variação está fundamentada nas diferenças de pluviosidade e evaporação. Apesar disso, o tipo de alteração, indicado pelos parâmetros L, R e  $R_k$  (Pedro, 1967 e 1966), não se altera porque todos os elementos variam concomitantemente de concentração. Este tipo de alteração, indicado pela composição das águas das fontes, está de acordo com o sugerido pela mineralogia (formação de esmectita férrica associada a hidróxidos cristalinos), podendo ser designado de sialferrização (Melfi & Pedro, 1977).

Reações de equilíbrio entre as composições dos minerais e das águas subterrâneas demonstram que os minerais das rochas, quer primários ou secundários endógenos, têm tendência à hidrólise, exceto a clorita, que pode ser neoformada. Indicam, também, que a composição das águas está em equilíbrio com a esmectita (nontronita) na alteração de silicatos máficos (olivina e serpentina) e com a caulinita na alteração da labradorita (Menegotto, 1982).

**BALANÇO GEOQUÍMICO** O balanço geoquímico de perdas e ganhos durante o desenvolvimento do intemperismo foi feito com base na composição das fácies do manto de alteração, aplicando-se o método isovolumétrico (Millot & Bonigas, 1955) para saprolito e métodos isofero e isoalumínio (Krauskopf, 1972) para o solo. Para efeito de comparação, foi também aplicado o cálculo das mobilidades relativas com base na composição das águas subterrâneas (Tardy, 1966, 1967 e 1969).

As perdas de massa mais significativas verificam-se na transição rocha-saprolito e no interior do próprio saprolito. Nesses estádios, são evacuados os elementos solúveis ( $\text{Mg}, \text{Ca}, \text{Na}, \text{K}, \text{Si}$ ) em diferentes proporções. Ao mesmo tempo, ocorrem perdas menores de alguns elementos residuais ( $\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Ni}, \text{Cr}, \text{V}, \text{Cu}$ ). Al e Ti não mostram nenhuma perda na fácie saprolito (Fig. 3).

No solo, quando o saprolito é bem evoluído, como é o caso de Pedras Pretas, somente ocorrem perdas adicionais de elementos solúveis: acentuada para o Mg, moderada para o Ca, baixa para o Si e o Na e nula para o K. Os outros elementos não mostram novas perdas, exceto quando o solo esteja sendo formado diretamente sobre um saprolito de baixo grau de intemperização, como se verifica em Cerro Mantiqueiras e Passo do Ivo (Tab. 12).

Os elementos de maior mobilidade são Mg e Ca, tendo perdas acentuadas tanto no saprolito quanto no solo. A evacuação do Mg é maior que a do Ca em quase todas as situações, exceto no saprolito formado sobre os serpentinitos (Cerro Mantiqueiras). Neste caso, a perda de Ca é superior à do Mg porque aquele elemento está contido quase exclusivamente no carbonato, que é solubilizado já no início da alteração, antes de muitos silicatos magnesianos. Em Pedras Pretas, o Ca está contido no plagioclásio e em Passo do Ivo na hornblenda, minerais mais estáveis que a olivina, fato que determina a evacuação do Mg em primeiro lugar.

O Si é eliminado apenas parcialmente, com perdas da ordem de 40% no saprolito e 60% no solo. O Si retido é

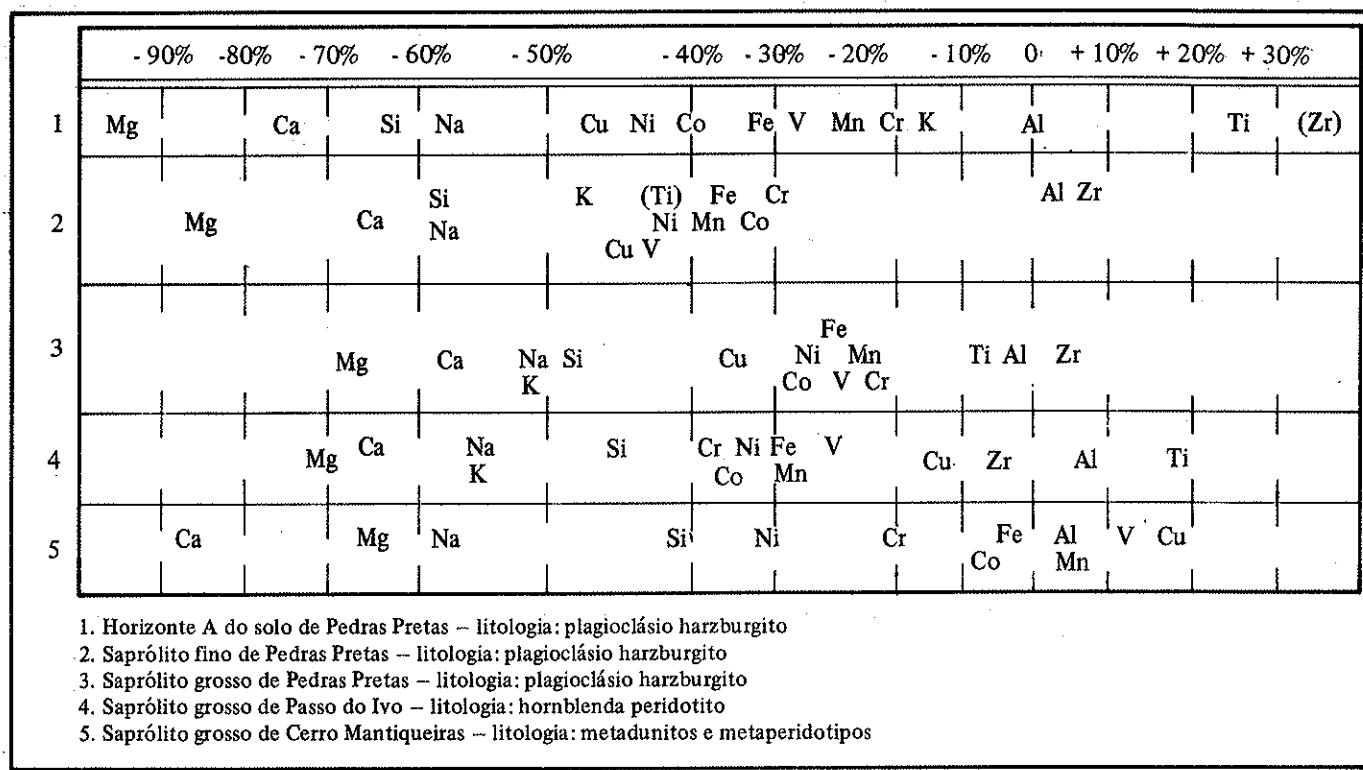


Figura 3 – Escalas de mobilidades relativas dos elementos químicos, comparando diferentes fácies e diferentes áreas.  
Métodos de cálculo: saprólico – isovolumétrico; solo – isoalumínio

Tabela 12 – Porcentagens de perda dos elementos químicos nas diferentes fácies. Métodos: saprólico – isovolumétrico; solo – isoferro e isoalumínio.

	PEDRAS PRETAS				PASSO DO IVO		CERRO MANTIQUEIRAS	
	S.G.*	S.F.	Horizonte B	Horizonte A	S.G.	Horizonte A	S.G.	Horizonte A
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	-20	-38	-45	-39	-36	-60	-26	-38
Si	-44	-58	-68	-62	-47	-68	-41	-53
Mg	-67	-84	-92	-92	-70	-93	-63	-87
Fe	-22	-35	-41	-32	-31	-57	-1	0
Al	0	+2	0	0	+11	0	+5	+69
Ca	-56	-68	-80	-72	-66	-78	-84	-81
Mn	-21	-38	-45	-22	-29	-56	+6	+5
Cr	-21	-33	-31	-19	-39	-61	-19	-25
Ti	-3	-42	0	+24	+20	+17	**	**
Na	-51	-59	-71	-58	-56	-68	-59	-30
K	-51	-45	-32	-14	-55	-54	**	**
Ni	-24	-39	-48	-45	-34	-64	-30	-43
Co	-28	-36	-38	-42	-35	-70	+12	-24
V	-22	-40	-39	-30	-25	-60	+15	-1
Cu	-35	-42	-40	-46	-11	-53	+20	-33

\* S.G. = saprólico grosso; S.F. = saprólico fino; Horizonte B = solo, horizonte B; Horizonte A = solo, horizonte A

\*\* Cálculo prejudicado pelo pequeno teor inicial

suficiente para determinar a natureza esmectítica dos produtos da alteração, mas não para ocasionar silicificações.

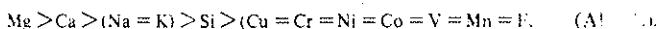
O Al é inteiramente residual, enquanto existe uma subtração moderada de Fe no saprólico, exceto o formado sobre serpentinitos. Na alteração desta última litologia, o Fe mostra um caráter inteiramente residual

porque já se encontra sob forma de magnetita microgranular, originada na serpentinização. Nas outras litologias, pouco serpentinizadas, grande parte do Fe se encontra ainda nos silicatos máficos, tendo maior facilidade de ser liberado e mobilizado antes de ser inteiramente oxidado.

Os outros elementos (menores ou traços) acompanham,

em linhas gerais, o comportamento dos elementos já referidos. Assim, o Na tem comportamento semelhante ao do Ca, o Ti é inteiramente fixo como o Al, enquanto Mn, Cr, Ni, Co, V e Cu acompanham as perdas do Fe, tanto no saprolito quanto no solo. O K faz exceção, pois é fortemente evacuado no saprolito, mas novamente concentrado no solo, provavelmente pela fixação em compostos orgânicos.

Como consequência das porcentagens de perda calculadas em função da composição da fase sólida, a escala de mobilidades relativas dos elementos, mais representativos para a alteração nas três áreas, pode ser simplificada da seguinte forma:



Em relação a essa escala, ocorre a inversão nas posições de Ca e Mg na área do Cerro Mantiqueiras, pelos motivos já referidos. Verificam-se, também, algumas inversões no solo, pela ação da pedogênese, envolvendo especialmente Na e K, cujas mobilidades diminuem.

Quando calculadas por intermédio da composição das águas subterrâneas (Tardy, 1966, 1967 e 1969), as mobilidades relativas dos elementos considerados maiores podem ser expressas da maneira que segue:



Esta escala de mobilidade é semelhante à obtida pelas porcentagens de perda na fase sólida (método isovolumétrico). Diferencia-se, entretanto, nas mobilidades relativas de Ca e Mg. Essa diferença é induzida pela própria natureza dos métodos: as porcentagens de perda, na fase sólida, referem-se à alteração já ocorrida, exagerando assim a mobilidade do Mg, que é contido em silicatos menos estáveis; a composição das águas subterrâneas é muito afetada pela hidrólise dos minerais contidos no saprolito, que teve uma prévia concentração relativa de silicatos cárnicos (exceto nos serpentinitos de Cerro Mantiqueiras).

No que diz respeito aos elementos menores, o cálculo de mobilidade pela composição das águas subterrâneas é muito impreciso, sendo exagerado em relação às porcentagens de perda na fase sólida. Este fato é explicável porque mínimas contaminações, até mesmo as introduzidas pelas chuvas, significam elevadas proporções em relação ao teor inicial.

## CONCLUSÕES

Ainda que extremamente antigos, os

maciços ultrabásicos estudados desenvolveram um manto de intemperismo muito delgado. Este fato sugere que o tempo de atuação dos agentes de intemperismo, e por consequência o tempo de exposição, é pequeno. Antes de sua exposição, esses maciços ultrabásicos sofreram metamorfismo e serpentinização. Na área de Pedras Pretas, houve também metassomatismo de contato (intrusões de granito).

Como consequência do levantamento e erosão da cobertura, os maciços foram intemperizados, ocorrendo destruição, transformação e neoformação de minerais, com lixiviação de alguns elementos e fixação de outros.

No plano mineralógico, a evolução mostra reações em que há destruição dos silicatos máficos mais instáveis (olivina, piroxénios e serpentina) e do plagioclásio, com neoformação direta de argilominerais e géis amorfos. Quando nas rochas há somente silicatos máficos (Passo do Ivo e Cerro Mantiqueiras), o argilomineral formado é esmectita (nontronita). Havendo plagioclásio (Pedras Pretas), formam-se caulinita e esmectita (montmorilonita) a partir desse mineral, associadas à nontronita proveniente dos silicatos máficos. Neste caso, a caulinita é uma fase mineralógica transitória; a fase mais definitiva é nontronita aluminosa.

A composição das águas subterrâneas mostra-se em equilíbrio com a mineralogia resultante do intemperismo e indica que os silicatos das rochas (primários ou secundários endógenos) tendem à hidrólise, exceto a clorita.

A evolução geoquímica mostra que a lixiviação não é tão efetiva quanto a verificada em climas tropicais, o que explica a preservação parcial do Si e, consequentemente, a presença das esmectitas como principais constituintes neoformados.

As escalas de mobilidades relativas dos elementos, calculadas por diferentes métodos, são semelhantes às citadas na literatura. Entretanto, fica realçada a imprecisão dos métodos: o uso da composição das fácies do manto de alteração (fase sólida) exagera a mobilidade dos elementos contidos nos minerais mais instáveis; quando o cálculo é feito pela composição das águas subterrâneas, ficam exageradas as mobilidades dos elementos que constituem os minerais que se alteram preferencialmente na fácie saprolito, pois já foram previamente concentrados durante a alteração inicial.

Tanto a evolução mineralógica quanto a geoquímica indicam que, nas áreas estudadas, perante o clima subtropical, a alteração das rochas ultrabásicas não progrediu até a lateritização, mas estaciona em um processo intermediário, que pode ser denominado de sialferização.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DUCHAUFOUR, P. — 1965 — *Précis de Pédologie*. Masson et Cie., Paris, 481 p.
- GOÑI, J. C. — 1962 — Origine des roches ultrabasiques et serpentineuses du Précambrien de Rio Grande do Sul (Brésil). Mode de gisement et minéralisation. *Bol. Esc. Geol. UFRGS*, Porto Alegre, 12:1-88.
- KRAUSKOPF, K. B. — 1972 — Introdução à geoquímica. Trad. M. Lando e P. S. Borges; Edit. Univ. São Paulo; 2 v., 605 p.
- LEVI, F., & MELFI, A. J. — 1972 — Geochemical and mineralogical studies on the first stages weathering of basic and related rocks. Part II: geochemical study. *Rev. Bras. Geoc.*, 2(1):1-17.
- MELFI, A. J. — 1967 — Intemperismo de granitos e diabásios de Campinas e arredores, SP. Tese de doutoramento, FFCHL, USP, São Paulo; 166 p.

- MELFI, A. J., & LEVI, F. — 1971 — Geochemical and mineralogical studies on the first stages of weathering of basic and related rocks. Part I: mineralogical study. *Rev. Bras. Geoc.*, 1(1):22-28.
- MELFI, A. J., & PEDRO, G. — 1977 — Estudo geoquímico dos solos e formações superficiais do Brasil. Parte 1 — caracterização e repartição dos principais tipos de evolução pedogegeoquímica. *Rev. Bras. Geoc.*, 7:271-286.
- MENEGOTTO, E. — 1982 — Alteração intempérica de rochas ultrabásicas em clima subtropical — Evolução mineralógica e geoquímica em alguns maciços ultrabásicos do Rio Grande do Sul, Brasil. Tese de doutoramento, Inst. Geoc. UFRGS, Porto Alegre; 356 p.
- MILLOT, G., & BONIFAS, M. — 1955 — Transformations isovolumétriques dans les phénomènes de latérisation et de bauxitization. *Bull. Serv. Carte Geol. Als. Lor.*, 8:3-10.
- OLIVEIRA, M. T. G. — 1981 — Petrologia do maciço máfico-ultramáfico de Passo do Ivo, São Gabriel, Rio Grande do Sul. Tese de mestrado, Inst. Geoc. UFRGS, Porto Alegre; 121 p.
- OLIVEIRA, S. M. B. — 1980 — Alteração intempérica das rochas ultrabásicas de Santa Fé (GO) e gênese do depósito niquelífero. Tese de doutoramento, Inst. Geoc. USP, São Paulo; 216 p.
- OLIVEIRA, S. M. B., & TRESCASES, J. J. — 1980 — Geoquímica da alteração supérgea das rochas ultramáficas de Santa Fé (Goiás, Brasil). *Rev. Bras. Geoc.*, 10(4):243-257.
- PEDRO, G. — 1964 — Contribution à l'étude expérimentale de l'altération chimique des roches cristallines. Thèse Fac. Sci. Paris, 344 p.
- PEDRO, G. — 1966 — Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'altération des roches superficielles (cycle alumino-silicique). *Compte Rendu Acad. Sci. Paris*, 262:1828-1831.
- PEDRO, G., & BITTAR, K. E. — 1966 — Contribution à l'étude de la genèse des sols hypermagnesiens: recherches expérimentales sur l'altération chimique des roches ultrabasiques (serpentinites). *Ann. Agron.*, 27(3):265-294.
- RÉGO, I. T. S. — 1980 — Complexo básico-ultrabásico de Pedras Pretas, Rio Grande do Sul — Aspectos petrológicos e geoquímicos. Dissert. mestrado, Inst. Geoc. UFRGS, Porto Alegre; 110 p.
- RÉGO, I. T. S. — 1981 — Aspectos petrológicos e geoquímicos do Complexo Básico-Ultrabásico de Pedras Pretas, Rio Grande do Sul. *Acta Geol. Leopold.*, São Leopoldo; V(10):197-278.
- SARTORI, P. L. — 1978 — Petrologia do Complexo Granítico de São Sepé, RS — Modelo evolucionário de granitos do Sul do Brasil. Tese de doutoramento, Inst. Geoc. USP, São Paulo, 196 p.
- SCHEVCIW, F. G. P. — 1980 — Alteração intempérica dos terros ultramáficos do Complexo de Pien (PR). Estudo mineralógico e Geoquímico. Dissert. mestrado, Inst. Geoc. USP, São Paulo; 172 p.
- TARDY, Y. — 1966 — Mobilité relative des éléments au cours des phénomènes d'altération de quelques roches cristallines. *Bull. Serv. Carte Geol. Als. Lor.*, 19(3-4):225-270.
- TARDY, Y. — 1967 — Étude géochimique des eaux d'une nappe d'arène en pays cristallin (Korhogo, Côte d'Ivoire). *Bull. Serv. Carte Geol. Als. Lor.*, 20(4):235-256.
- TARDY, Y. — 1969 — Géochimie des altérations — Étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. *Mém. Serv. Carte Geol. Als. Lor.*, 31, 199 p.
- TRESCASES, J. J. — 1969 — Géochimie des altérations et des eaux de surface dans le massif ultrabasique du Sud de la Nouvelle-Calédonie. *Bull. Serv. Carte Geol. Als. Lor.*, 22(4):329-354.
- TRESCASES, J. J. — 1975 — L'évolution géochimique supégène des roches ultrabasiques en zone tropicale — Formation des gisements nickélifères de Nouvelle-Calédonie. *Mém. ORSTOM*, 78; 260 p.
- TRESCASES, J. J., & SCHEVCIW, F. G. P. — 1980 — Mineralogia e geoquímica da alteração meteórica das rochas ultrabásicas de Pien, Paraná, Brasil. *Anais do XXXI Congr. Bras. Geol.*, Balneário Camboriú; 4:2353-2367.
- VETTORI, L. — 1969 — Métodos de análise de solo. *Bol. Téc. Minist. Agric.*, 7:1-24.
- WACKERMANN, J. M. — 1975 — L'altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale semi-humide; Étude minéralogique et géochimique des arènes du Sénégal Oriental; Conséquences pour la cartographie et la prospection. Thèse Univ. Louis-Pasteur, Strasbourg, 373 p.

## MANUSCRITO

Recebido em 07 de novembro de 1983  
Revisão aceita em 17 de novembro de 1983