QUÍMICA MINERAL DA MUSCOVITA DE ROCHAS GRANÍTICAS E *GREISENS* DA SUÍTE INTRUSIVA VELHO GUILHERME, PROVÍNCIA ESTANÍFERA DO SUL DO PARÁ

CARLOS MARCELLO DIAS FERNANDES[1], NILSON PINTO TEIXEIRA (IN MEMORIAM), RÉGIS MUNHOZ KRÁS BORGES[2] & JORGE SILVA BETTENCOURT[3]

Resumo Foram realizadas 42 análises por microssonda eletrônica em muscovita de rochas graníticas dos maciços Antônio Vicente, Velho Guilherme, Mocambo, Benedita e Ubim/Sul e *greisens* associados, pertencentes à Suíte Intrusiva Velho Guilherme, Província Estanífera do Sul do Pará. Em todos os maciços a muscovita analisada corresponde a uma fase secundária, produto de alteração hidrotermal pós-magmática, que afetou os granitos dos diversos maciços, em diferentes intensidades. Em relação aos corpos de greisen, corresponde a uma fase primária. Nos granitos dos maciços Mocambo e Ubim/Sul apresenta variação composicional desde muito próxima ao membro final muscovita até o membro final celadonita, caracterizando uma substituição fengítica típica [IVAl , VIAl ↔ IVSi , VIR (Fe, Mn, Mg, Ti)], já que a proporção de Si e Fe é variável. Nos maciços Antônio Vicente, Velho Guilherme e Benedita, essa substituição foi mais homogênea, implicando em fórmulas estruturais predominantemente fengíticas. Em relação aos corpos de greisen associados aos maciços Antônio Vicente e Mocambo, a muscovita exibe o mesmo mecanismo de substituição fengítica, embora se mostre enriquecida em alumínio total relativamente à mica dos granitos. Estudos petrográficos mostraram uma grande coincidência entre a presença expressiva da muscovita estudada e o aparecimento da cassiterita. Isto permite considerar, em relação aos granitos e *greisens* estudados, que quantidades importantes dessa mica podem indicar a presença de mineralizações de cassiterita e assim representar um indicador metalogenético para mineralizações de estanho, tanto para outros corpos graníticos da região, quanto de outras províncias.

Palavras-chave: fengita, granitos paleoproterozóicos, *greisens*, alteração hidrotermal, estanho

Abstract *MINERAL CHEMISTRY OF MUSCOVITE OF THE GRANITIC ROCKS AND GREISENS OF THE VELHO GUILHERME INTRUSIVE SUITE, SOUTH PARÁ TIN PROVINCE.* 42 analyses were carried out by electronic microprobe on muscovite of the Antônio Vicente, Velho Guilherme, Mocambo, Benedita and Ubim/Sul granitic massifs and associated *greisens* of the Velho Guilherme Intrusive Suite, South Pará Tin Province. In all massifs the analyzed muscovite corresponds to a secondary phase, product of post-magmatic hydrothermal alteration which affected the granitic rocks in different degrees. Relatively to the greisen bodies, it corresponds to a primary phase. In the Mocambo and Ubim/Sul granitic massifs it presents compositional variation from very close to the muscovite end member until the phengite end member, characterizing a typical phengitic substitution [IVAl , VIAl ↔ IVSi , VIR (Fe, Mn, Mg, Ti)], since the proportion of Si and Fe is variable. In the Antônio Vicente, Velho Guilherme and Benedita granitic massifs, this substitution was more homogenous, implying in structural formulas predominantly phengitic. In relation to the greisen bodies associated with the Antônio Vicente and Mocambo massifs, the muscovite exhibits the same phengitic substitution, although it is relatively enriched in total Aluminum in comparison with the granitic mica. Petrographic studies show a great coincidence between the significant presence of the studied muscovite and the development of cassiterite. This allows considering, in respect to the granites and *greisens* studied, that important amounts of that mica can indicate the presence of cassiterite mineralizations and, therefore represent an metalogenetic indicative for tin mineralization, so much for another granitics bodies in the region, as for another provinces.

Keywords: phengite, paleoproterozoic granites, *greisens*, hydrothermal alteration, tin

INTRODUÇÃO Os granitos estaníferos da Suíte Intrusiva Velho Guilherme (Macambira & Vale 1996), Província Estanífera do Sul do Pará (Abreu & Ramos 1974) situam-se no contexto do Cráton Amazônico (Almeida *et al.* 1981), nos domínios da Província Geocronológica Amazônia Central (Tassinari & Macambira 1999). Geograficamente, afloram na região sul-sudeste do Estado do Pará, entre os municípios de Tucumã e São Félix do Xingu (Figura 1). A área de ocorrência abrange porções arqueanas, representadas por unidades do Terreno Granito-*Greenstone* do Sul do Pará e do Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas (Araújo *et al.* 1988), bem como abriga conjuntos intrusivos máfico-ultramáficos e félsicos e rochas vulcânicas intermediárias e félsicas paleoproterozóicas (Macambira & Vale 1996, Teixeira *et al.* 2002).

Estudos, com diferentes enfoques acerca dos maciços da suíte têm sido realizados, destacando-se os de Dall'Agnol et al. (1993), Teixeira & Dall'Agnol (1991), Teixeira & Andrade (1992). Neste trabalho, apresenta-se o resultado do estudo da química mineral da muscovita relacionada a processos hidrotermais pós-magmáticos que afetaram os granitos dos maciços Antônio Vicente, Velho Guilherme, Mocambo, Benedita e Ubim/Sul, em diferentes intensidades e propiciaram a formação de *greisens*. Os *greisens* estudados são associados aos maciços Antônio Vicente e Mocambo (Teixeira 1999). Para o estudo foram realizadas análises quantitativas (WDS), por de microssonda eletrônica, com vistas a investigar detalhadamente a sua tipologia e composição química, bem como ocorrência de substituições isomórficas que possam ter afetado a mesma. Também foi investigado o seu relacionamento com as mineralizações de cassiterita.

ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOQUÍMICOS DOS MACIÇOS ESTUDADOS Os maciços graníticos da Suíte Intrusiva Velho Guilherme são mineralizados em estanho, embora os depósitos existentes sejam, no momento, economica-

1 - Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo, CEP 05508-080, São Paulo-SP, cmdf@usp.br
2 - Centro de Geociências – Universidade Federal do Pará, Caixa Postal 1611, CEP 66075-110, Belém-PA, munhoz@ufpa.br
3 - Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo, CEP 05508-080, São Paulo-SP, jsbetten@usp.br

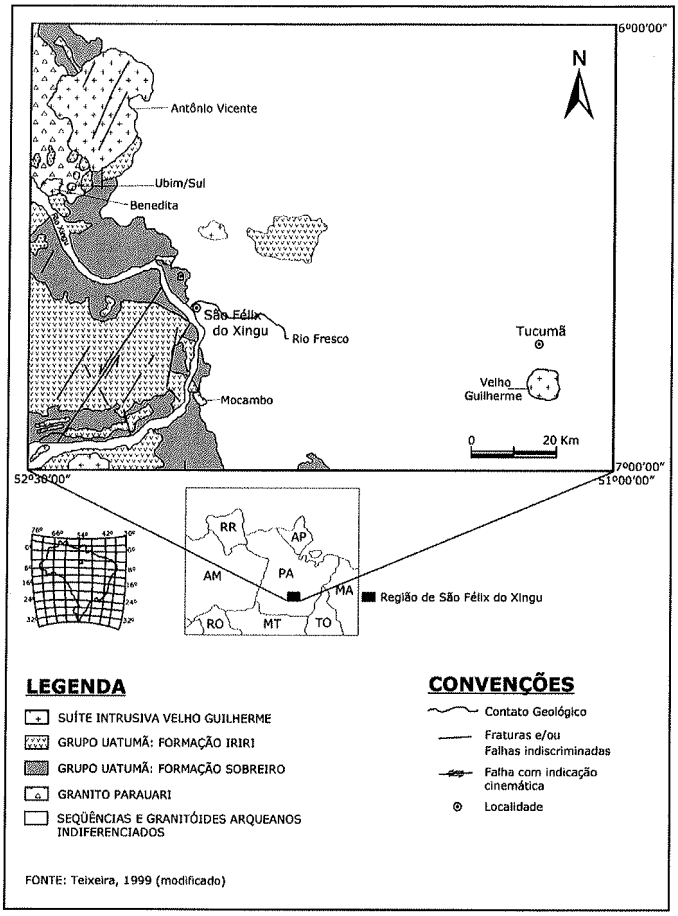

Figura 1 – Mapa de localização dos maciços estudados, confeccionado a partir da folha SB-22-Y-B-São Félix do Xingu (Macambira & Vale 1996).

mente inviáveis para explotação de cassiterita, em função das suas dimensões, vigor mineral e, particularmente, devido ao atual baixo preço no mercado internacional. Por toda a década de 80, depósitos associados aos maciços Antônio Vicente e Mocambo foram explotados. Tais depósitos apresentam natureza aluvionar e encontram-se esgotados. As fácies graníticas intensamente afetadas por alterações hidrotermais pós-magmáticas pervasivas (no sentido de Taylor & Pollard 1988), bem como zonas greisenizadas e corpos tabulares de *greisens* associados aos maciços, hospedam pequenas concentrações primárias de cassiterita (Teixeira 1999).

Apesar da grande maioria dos corpos graníticos formar complexos compostos, na quase totalidade deles não são observadas as relações temporais de colocação (ordem de injeção). Os afloramentos são geralmente sob a forma de lajedos e blocos. Em razão disso, a passagem de uma fácies para outra, no interior de cada maciço, não é perceptível diretamente no campo. Estudos petrográficos mostraram que os granitos dos diferentes maciços são hololeucocráticos a leucocráticos, reduzidos, sieno a monzograníticos em composição, com subordinados tipos álcali-feldspato graníticos (Teixeira 1999). Essas características indicam que os granitos dos diversos maciços evoluíram a partir de líquidos extremamente diferenciados e silicosos.

A ausência de estruturas marcantes no interior dos corpos, o caráter francamente discordante em relação às encaixantes, o desenvolvimento de auréolas de contato transicionais entre as facies metamórfica albita-epidoto hornfels e hornblenda hornfels (Dall'Agnol 1980, Teixeira 1999) e a presença de intercrescimentos micrográficos e mirmequíticos, em algumas fácies dos maciços, sugerem que a colocação dos corpos ocorreu em profundidades rasas (Teixeira & Dall'Agnol 1991, Teixeira 1999). Tais aspectos têm sido verificados em outros granitos anorogênicos ou pós-tectônicos da Amazônia (Dall'Agnol 1980, Dall'Agnol *et al.* 1987, Gastal 1987, Gonçalez *et al.* 1988, Daoud 1988, entre outros).

Dados químicos de rocha total obtidos por Teixeira (1999) confirmam a natureza subalcalina e o caráter metaluminoso a peraluminoso dos granitos estudados, bem como a sua afinidade tectonomagmática intraplaca e uma grande semelhança geoquímica como os granitos tipo-A, da série rapakivi.

MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS As fases de petrografia, preparação das amostras e análises químicas foram executadas no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (Teixeira 1999). O material para análise foi tratado na forma de seções delgadas polidas, circulares, as quais passaram por um processo de metalização com carbono. As análi-ses químicas foram efetuadas por microssonda eletrônica, em um equipamento marca JEOL, modelo JXA 8600, com cinco espectrômetros, com EDS (*Energy Dispersive System*; para análises qualitativas) e WDS (*Wavelenght Dispersive System*; para análises quantitativas), tendo sido utilizado o sistema de análises automatizado Tracor-Northern (Norran Instruments).

Os cálculos das fórmulas estruturais tiveram por base 22 átomos de oxigênio e $(OH)_2$, seguindo o método de Deer *et al.* (1966). Os conteúdos de Li não são dosados em microssonda eletrônica. O conteúdo de Li pode ser estimado através de equações que relacionam o F (Tischendorf *et al.* 1997), no entanto, os cálculos revelaram teores insignificativos deste cátion, já que o conteúdo de F é bastante reduzido na muscovita objeto da investigação. Com isso, optou-se pela exclusão do cálculo da dosagem do Li na fórmula estrutural, uma vez que não influenciaria na interpretação dos resultados.

O estudo envolveu 42 análises, nas quais foram dosados os óxidos SiO_2, TiO_2, Al_2O_3, FeO*, MnO, MgO, CaO, Na_2O, K_2O, BaO, F e Cl.

QUÍMICA MINERAL DA MUSCOVITA A muscovita (mica branca) pertence ao grupo das micas dioctaédricas (Foster 1960a, Hawthorne & Cerny 1982). Este grupo apresenta quatro importantes membros finais (Harrison 1990, Rieder *et al.* 1998):

1) **Muscovita** ("stricto sensu") $K_2Al_{4-2}Si_6Al_2O_{20}(OH)_4$
2) **Celadonita** $K_2Fe^{3+}{}_2(Mg, Mn, Fe^{2+})_{2-2}Si_8O_{20}(OH)_4$
3) **Aluminoceladonita** $K_2Al_2(Mg, Mn, Fe^{2+})_{2-2}Si_8O_{20}(OH)_4$
4) **Paragonita** $Na_2Al_{4-2}Si_6Al_2O_{20}(OH)_4$

As micas brancas naturais sem lítio são consideradas uma solução sólida entre a muscovita e celadonita, ou entre a muscovita e a aluminoceladonita, ambas representantes da série *fengítica* (Monier & Robert 1986, Rieder *et al.* 1998). Segundo Deer *et al.* (1966) há pouquíssima solução sólida formada entre paragonita e muscovita. Em razão disso, a solubilidade entre essas duas fases alcança no máximo 20 por cento.

Apresentação e Discussão dos resultados Os resultados analíticos e respectivas fórmulas estruturais encontram-se na Tabela 1.

CLASSIFICAÇÃO E REPRESENTAÇÃO GRÁFICA A Figura 2, baseada em Tischendorf *et al.* (1997), permite classificar as micas em termos da composição e ocupação do sítio octaedral, além de mostrar a relação composicional entre as micas litiníferas e micas desprovidas de lítio.

Os dados químicos da muscovita investigada, ocupam do-

Tabela 1 – Análises químicas e respectivas fórmulas estruturais de mica branca de granitos e greisens da Suíte Intrusiva Velho Guilherme. %Cel.=100(Si-6)/2(% de molécula celadonítica); %Par.=100Na/(Na+K)(% de molécula paragonítica); XFe=Fe/(Fe+Mg); Sum T=ocupação do sítio tetraedral; Sum M=ocupação do sítio octaedral; Sum I=ocupação do sítio intercamada; nd=não-detectado; FeO=ferro total no estado 2+.*

Maciços	Antônio Vicente						Velho Guilherme				Mocambo									
Amostra	NN-AV-1N-10						NN-VG-77N				NN-GM-23A				NN-GM-24			NN-GM-56A				
Análise	C1P2	C1P3	C1P5	C1P12	C1P13	C2P1	1C2	2C2	3C2	6C2	1C6	3C6	4C6	6C6	4C2	4C5	5C5	10C3	11C3	12C3	7C2	8C2
SiO_2	45,61	47,29	43,75	44,42	44,92	45,98	47,38	47,04	46,50	47,62	44,99	48,39	46,11	45,96	49,12	46,70	46,83	46,84	46,57	48,08	44,26	45,49
TiO_2	nd	0,01	0,07	0,03	0,05	0,04	0,03	0,06	0,12	0,04	0,06	0,10	0,02	0,12	0,77	0,09	0,12	0,18	0,15	0,06	nd	0,05
Al_2O_3	31,10	31,93	31,68	30,36	31,73	31,03	32,09	31,59	32,34	32,89	32,73	29,35	30,78	32,43	26,40	30,42	29,92	29,54	29,28	30,86	30,61	28,52
Cr_2O_3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,03	0,03	0,02	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,03	nd	nd	nd	nd	nd
MgO	0,07	0,08	0,26	0,10	0,12	0,10	1,09	1,02	1,31	1,41	0,03	0,11	0,04	0,16	0,41	0,08	0,07	0,46	0,51	0,08	nd	0,05
CaO	nd	0,03	nd	nd	0,02	0,04	0,07	0,06	0,01	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
MnO	0,05	0,07	0,13	0,12	0,10	0,06	0,04	0,01	nd	0,01	0,23	0,11	0,18	0,14	0,37	0,18	0,20	0,10	0,09	0,08	0,16	0,13
FeO*	8,76	6,97	9,73	10,64	8,88	7,68	6,51	6,25	4,79	4,48	6,87	7,81	8,81	7,25	7,80	8,31	9,41	6,92	6,83	4,87	8,03	8,07
Na_2O	0,14	0,13	0,11	0,12	0,13	0,12	0,07	0,06	0,09	0,09	0,14	0,09	0,11	0,16	0,09	0,12	0,07	0,09	0,06	0,19	0,14	0,09
K_2O	10,64	10,71	9,85	10,50	10,65	10,82	10,32	10,20	10,34	10,60	10,82	10,57	11,02	10,82	9,88	10,69	10,93	10,67	10,69	10,09	10,53	10,36
F	0,41	0,32	0,14	0,28	0,15	0,18	0,06	nd	0,07	0,15	0,85	1,17	0,65	0,69	1,64	0,89	1,19	1,29	1,22	1,25	0,67	1,17
Total	96,78	97,54	95,72	96,57	96,75	96,05	97,66	96,32	95,60	97,31	96,72	97,70	97,72	97,73	96,48	97,48	98,76	96,09	95,40	95,56	94,40	93,93
O=F	0,17	0,13	0,06	0,12	0,06	0,08	0,03	nd	0,03	0,06	0,36	0,49	0,27	0,29	0,69	0,38	0,50	0,54	0,51	0,53	0,28	0,49
TOTAL	96,61	97,41	95,66	96,45	96,69	95,97	97,63	96,32	95,57	97,25	96,36	97,21	97,45	97,44	95,79	97,10	98,26	95,55	94,89	95,03	94,12	93,44
Fórmula estrutural com base em 22 átomos de oxigênio.																						
Si	6,25	6,34	6,07	6,16	6,15	6,30	6,30	6,33	6,27	6,30	6,15	6,55	6,29	6,21	6,76	6,36	6,36	6,46	6,46	6,54	6,23	6,45
^{IV}Al	1,75	1,66	1,93	1,84	1,85	1,70	1,70	1,67	1,73	1,70	1,85	1,45	1,71	1,79	1,24	1,64	1,64	1,54	1,54	1,46	1,77	1,55
Sum T	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
^{VI}Al	3,27	3,39	3,25	3,13	3,27	3,31	3,34	3,34	3,42	3,44	3,42	3,24	3,23	3,37	3,04	3,25	3,15	3,25	3,25	3,49	3,30	3,22
Ti	0,00	0,001	0,0073	0,00313	0,00515	0,00412	0,003	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,002	0,01	0,08	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,00	0,01
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,003	0,003	0,002	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,003	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	0,01	0,02	0,05	0,02	0,02	0,02	0,22	0,20	0,26	0,28	0,01	0,02	0,01	0,03	0,08	0,02	0,01	0,09	0,11	0,02	0,00	0,01
Mn	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,01	0,02	0,02	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Fe^{2+}	1,00	0,78	1,13	1,23	1,02	0,88	0,72	0,70	0,54	0,50	0,79	0,88	1,00	0,82	0,90	0,95	1,07	0,80	0,79	0,55	0,95	0,96
Sum M	4,29	4,20	4,45	4,40	4,33	4,22	4,28	4,262	4,237	4,218	4,25	4,17	4,27	4,25	4,14	4,24	4,27	4,18	4,17	4,08	4,27	4,21
Ca	0,00	0,00158	0,00	0,00	0,00107	0,00215	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04	0,02	0,03	0,04	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,05	0,04	0,02
K	1,86	1,83	1,74	1,86	1,86	1,89	1,75	1,75	1,78	1,79	1,89	1,83	1,92	1,86	1,73	1,86	1,89	1,88	1,89	1,75	1,89	1,87
Sum I	1,90	1,87	1,77	1,89	1,90	1,93	1,78	1,78	1,80	1,81	1,92	1,85	1,95	1,91	1,75	1,89	1,91	1,90	1,91	1,80	1,93	1,90
F	0,18	0,14	0,06	0,12	0,06	0,08	0,03	0,00	0,03	0,06	0,37	0,50	0,28	0,29	0,71	0,38	0,51	0,56	0,54	0,54	0,30	0,52
% Cel.	12,50	17,00	3,50	8,00	7,50	15,00	15,0	16,5	13,5	15,0	7,5	27,5	14,5	10,5	38	18	18	23	23	27	11,5	22,5
% Para.	2,10	1,61	1,69	1,58	1,58	1,56	1,12	1,12	1,11	1,10	2,08	1,08	1,53	2,09	1,14	1,58	1,04	1,05	1,04	2,77	2,07	1,05
XFe	0,99	0,97	0,95	0,98	0,98	0,97	0,76	0,77	0,67	0,64	0,98	0,97	0,99	0,96	0,91	0,97	0,99	0,89	0,87	0,96	1,00	0,98

Maciços	Mocambo				Benedita				Ubim/Sul											
Amostra	NN-GM-56A				NE-B-09				NE-B-32											
Análise	9C2	1C1	2C1	3C1	3C6	6C6	7C6	8C6	C1P1	C2P5	C2P6	C2P7	C2P8	C2P9	C3P10	C3P11	C3P12	C5P14	C6P15	C6P17
SiO_2	46,00	44,13	43,09	44,01	46,31	46,35	46,03	46,13	47,16	46,72	45,99	49,64	47,44	45,24	48,12	49,04	49,46	47,58	47,45	48,06
TiO_2	0,12	nd	nd	0,09	0,22	0,12	0,16	0,23	0,16	0,21	0,21	0,09	0,13	0,03	0,12	0,14	0,23	0,09	0,13	0,07
Al_2O_3	31,00	30,95	29,56	29,67	31,84	30,73	30,76	31,16	22,57	25,92	26,15	26,46	26,75	30,38	27,17	29,03	26,99	32,13	28,63	27,14
Cr_2O_3	nd	nd	nd	nd	nd	0,01	nd	0,01	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
MgO	0,08	nd	0,05	0,05	0,04	0,08	0,08	0,08	0,57	0,30	0,16	0,36	0,28	0,05	0,38	0,27	0,50	0,07	0,23	0,26
CaO	nd	nd	nd	nd	0,04	0,03	0,02	0,02	nd	0,01	nd	0,01	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,03	0,01
MnO	0,09	0,11	0,13	0,16	0,08	0,07	0,10	0,11	0,20	0,18	0,18	0,15	0,18	0,05	0,13	0,12	0,11	0,10	0,12	0,15
FeO*	5,67	7,84	8,51	7,92	7,92	7,61	7,83	6,71	11,42	10,74	11,15	8,00	9,97	8,13	7,75	5,75	6,74	4,23	7,77	8,70
Na_2O	0,13	0,11	0,12	0,11	0,08	0,06	0,07	0,05	0,03	0,09	0,05	0,06	0,04	0,16	0,04	0,12	0,03	0,08	0,03	0,02
K_2O	10,50	10,11	10,50	10,49	10,23	10,14	10,01	9,87	9,87	10,38	10,59	10,34	10,28	10,47	10,46	10,13	9,66	10,88	9,56	10,30
F	1,26	0,86	1,16	1,10	0,05	0,13	0,11	0,17	0,76	0,82	1,35	1,16	0,45	0,99	0,76	0,67	0,67	0,80	0,30	0,69
Total	94,85	94,11	93,12	93,60	96,81	95,31	95,16	94,54	92,74	95,37	95,83	96,27	95,52	95,50	94,93	95,27	94,39	95,96	94,25	95,40
O=F	0,53	0,36	0,49	0,46	0,02	0,05	0,05	0,07	0,32	0,35	0,57	0,49	0,19	0,42	0,32	0,28	0,28	0,34	0,13	0,29
TOTAL	94,32	93,75	92,63	93,14	96,79	95,26	95,11	94,46	92,42	95,02	95,26	95,78	95,33	95,08	94,61	94,99	94,11	95,62	94,12	95,11
Fórmula estrutural com base em 22 átomos de oxigênio.																				
Si	6,37	6,22	6,21	6,28	6,264	6,361	6,333	6,348	6,85	6,59	6,53	6,82	6,61	6,30	6,69	6,68	6,82	6,43	6,57	6,67
^{IV}Al	1,63	1,78	1,79	1,72	1,736	1,639	1,667	1,652	1,15	1,41	1,47	1,18	1,39	1,70	1,31	1,32	1,18	1,57	1,43	1,33
Sum T	8,00	8,00	8,00	8,00	8,000	8,000	8,000	8,000	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
^{VI}Al	3,44	3,35	3,24	3,27	3,340	3,332	3,321	3,400	2,72	2,91	2,90	3,10	3,00	3,29	3,14	3,34	3,20	3,54	3,25	3,10
Ti	0,01	0,00	0,00	0,01	0,022	0,012	0,017	0,024	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,003	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,001	0,00	0,001	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	0,02	0,00	0,01	0,01	0,009	0,016	0,015	0,017	0,12	0,06	0,03	0,07	0,06	0,01	0,08	0,05	0,10	0,01	0,05	0,05
Mn	0,01	0,01	0,02	0,02	0,010	0,008	0,012	0,012	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
Fe^{2+}	0,66	0,92	1,03	0,94	0,896	0,873	0,900	0,772	1,39	1,27	1,32	0,92	1,16	0,95	0,90	0,66	0,78	0,48	0,90	1,01
Sum M	4,14	4,29	4,29	4,25	4,277	4,242	4,265	4,226	4,28	4,28	4,30	4,12	4,26	4,25	4,14	4,08	4,12	4,06	4,22	4,19
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,006	0,004	0,003	0,003	0,00	0,002	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,004	0,00
Na	0,03	0,03	0,03	0,03	0,021	0,015	0,018	0,013	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,04	0,01	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01
K	1,86	1,82	1,93	1,91	1,765	1,775	1,756	1,732	1,83	1,87	1,92	1,81	1,83	1,86	1,85	1,76	1,70	1,88	1,69	1,82
Sum I	1,89	1,85	1,97	1,94	1,792	1,794	1,778	1,748	1,84	1,90	1,93	1,83	1,84	1,90	1,86	1,79	1,71	1,90	1,70	1,83
F	0,55	0,38	0,53	0,50	0,019	0,055	0,047	0,075	0,35	0,37	0,61	0,50	0,20	0,44	0,33	0,29	0,29	0,34	0,13	0,30
% Cel.	18,5	11,0	10,5	14,00	13,20	18,05	16,65	17,4	42,5	29,5	26,5	41,0	30,5	15,0	34,5	34,0	41,0	21,5	28,5	33,5
% Para.	1,58	1,62	1,52	1,54	1,17	0,83	1,01	0,74	0,54	1,05	0,53	1,09	0,54	2,0	0,53	1,67	0,58	1,05	0,58	0,54
XFe	0,97	1,00	0,99	0,98	0,99	0,98	0,98	0,97	0,92	0,96	0,97	0,93	0,98	0,98	0,91	0,92	0,88	0,97	0,94	0,95

minantemente o campo composicional da fengita, embora algumas composições incidam no campo da muscovita (*sensu stricto*). Isto demonstra que a substituição fengítica (Al por Fe, Ti e Mn, na camada octaedral, e Si, na camada tetraedral) ocorreu em diferentes graus, fato que é evidenciado nas fórmulas estruturais, que exibem proporções variáveis das moléculas celadonítica e paragonítica.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA A análise da Figura 3 e das composições químicas (Tabela 1) revela que a muscovita do maciço Velho Guilherme é mais rica em Mg e apresenta valores mais baixos de XFe, comparativamente à dos outros maciços. A muscovita do maciço Ubim/Sul, comparativamente a dos outros quatro maciços, apresenta valores mais elevados de Si, XFe e

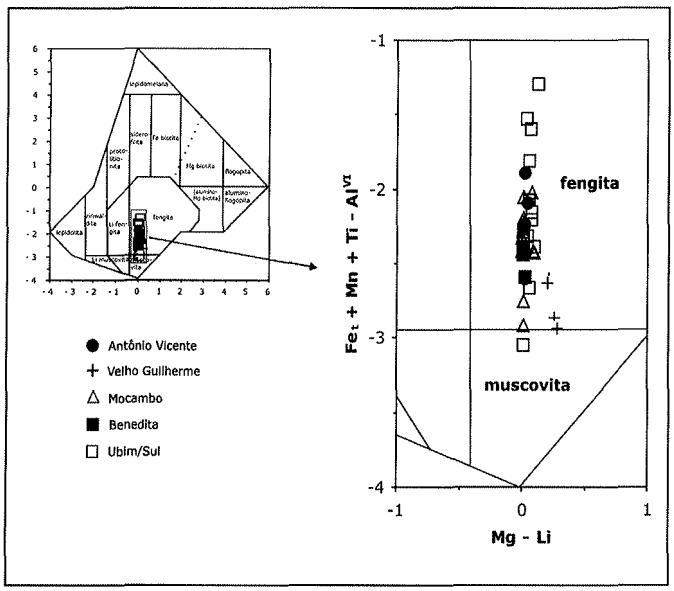

Figura 2 – Diagrama (Mg-Li) vs. [(Fe$_t$+Mn+Ti)- ^{VI}Al] de Tischendorf et al. *(1997) mostrando a distribuição composicional das micas brancas dos maciços da Suíte Intrusiva Velho Guilherme.*

K, sendo, porém, empobrecida em Al total, o que mostra uma substituição fengítica mais expressiva na mica deste maciço.

A variabilidade composicional que a muscovita do maciço Ubim/Sul apresenta evidencia a existência de uma evolução composicional na mesma, caracterizada pela diminuição de Si, Mg e Ti, paralelamente ao aumento de Al total. Em relação à muscovita do maciço Mocambo e do greisen a ele associado, nota-se que o conteúdo de Al total é maior na mica do segundo do que na do primeiro. O mesmo é válido para K e Na.

SUBSTITUIÇÕES Segundo (Foster 1960a,b, Harrison 1990), as principais substituições isomórficas que afetam a muscovita como membro final são:

Substituição fengítica:

Descrita pelo mecanismo ^{IV}Al , ^{VI}Al _ ^{IV}Si , ^{VI}R^{2+} (1). A substituição de ^{IV}Al por ^{IV}Si na posição tetraedral provoca uma diferença de carga, que é compensada pela entrada de íons divalentes (R^{2+} = Fe, Mg, Mn,...) na posição octaédrica, substituindo o ^{VI}Al.

Substituição paragonítica:

Descrita pelo mecanismo Na _ K. O Na substitui o K nas posições intercamadas, com a proporção de paragonita dada pela relação Na/(Na+K).

Substituição de ^{VI}Al por Ti e íons divalentes:

Descrita pelo mecanismo 2^{VI}Al _ ^{VI}R^{2+} , ^{VI}Ti. O Ti e íons divalentes (Fe, Mg, Mn, ...) substituem o Al na posição octaédrica.

Foster (1960a) demonstrou que a substituição fengítica em micas dioctaédricas provoca alterações na carga das camadas tetraédricas e octaédricas, o que implica em fórmulas estruturais caracterizadas por: (1) uma carga octaédrica negativa; (2) uma carga tetraédrica menor que –2,0; (3) uma ocupação de Si maior que 6,0 e (4) uma ocupação de ^{IV}Al menor que 2,0.

Guidotti (1984) considerou várias substituições catiônicas que causam desvio na composição ideal da muscovita. Além da substituição fengítica, outra importante é aquela que causa o desvio na sua estrutura de dioctaédrica para trioctaédrica. Este desvio é facilmente observado em fórmulas estruturais, calculadas na base de 22 átomos de oxigênio, em que a ocupação octaédrica da muscovita normalmente excede os 4 sítios ideais, situando-se entre 4,02 e 4,10. Em situações em que os valores são mais elevados, as substituições são consideradas mais expressivas. O mesmo autor propõe alguns mecanismos responsáveis pela deficiência na ocupação do sítio intercamada (I). A muscovita apresenta normalmente ocupação entre 1,80 a 1,95 neste sítio. A conclusão de vários autores (Foster 1960a, Harrison 1990, Borges 1997) é que esta deficiência é real, e não devido a erros analíticos, como poderia ser esperado em análises por microssonda eletrônica, pela volatilização dos álcalis sob o feixe eletrônico. Uma das principais substituições que causam esta deficiência, expressa por: 2K^{I} _ R^{2+}, 2*^{I}, pode contribuir para o desvio da camada octaédrica de dioctaédrica para trioctaédrica (Guidotti 1984).

Speer (1984), comparando muscovita primária e secundária dos granitóides do sul dos Apalaches, constatou que a secundária é mais rica em Fe e pode apresentar uma ocupação do sítio intercamada muito baixa, sugerindo uma ampla substituição ilítica. Neste processo há uma maior substituição de ^{IV}Al por Si, e uma deficiência de K^{I}.

O grau de substituição celadonítica e paragonítica pode ser avaliado na Figura 4, mostrando que a substituição paragonítica é reduzida em todas as micas, chegando no máximo a 2,77%. A substituição celadonítica mostra uma maior expressão, variando entre 3,5% e 42,5%. A muscovita dos maciços Mocambo, Benedita e Ubim/Sul apresenta uma correlação negativa entre os dois tipos de substituição. Nota-se que a dos maciços Mocambo e Ubim/Sul apresenta os maiores teores da molécula celadonítica, implicando em fórmulas estruturais muito próximas do termo intermediário da série fengítica (fengita).

Os diagramas correspondentes às Figuras 5 e 6 prestam-se para avaliar a substituição fengítica e permitem estimar a proporção de Fe^{3+} e Fe^{2+} presentes em micas. O diagrama ^{IV}Al x (^{VI}Al – 2) + 2Ti de Cathelineau (1982), traduz a correlação entre o Al^{IV} e o Al^{VI} e indica a proporção de Fe^{3+} presente em virtude da substituição Al^{3+} _ Fe^{3+} como conseqüência à própria substituição fengítica. O diagrama Mg x (Si – 6) + Ti é utilizado para se estimar a proporção de Fe^{2+} associado ao Mg, que entram em posição octaédrica para compensar o excesso de carga provocado pela substituição fengítica (se toda a diferença de carga é compensada pelo Mg, então o Fe^{2+} = 0 e todo o ferro está no estado trivalente).

Quando as composições da muscovita estudada são lançadas nestes diagramas, observa-se um grau variável de substituição fengítica na mica dos diferentes maciços. A Figura 5 expressa um grau de substituição Al^{3+} _ Fe^{3+} ligeiramente mais elevado na mica do maciço Antônio Vicente em relação aos maciços Mocambo, Velho Guilherme, Benedita e Ubim/Sul. No caso da mica dos outros quatro maciços, exceto o maciço Velho Guilherme, esse fato justifica a entrada em maior quantidade de Fe^{2+} associado ao Mg, fato que pode ser constatado na Figura 6, apesar de não serem teores suficientemente altos para compensarem a substituição fengítica na sua totalidade.

ORIGEM Nas últimas décadas, os estudos sobre a origem primária ou secundária das micas brancas de rochas granítica têm se intensificado (Miller *et al.* 1981, Speer 1984, Monier *et al.* 1984, Monier 1987, Simões 1992, Seer 1995).

No caso em estudo, critérios petrográficos e químicos apontam para uma origem secundária das micas oriunda dos maciços (Teixeira, 1999). Os critérios químicos estabelecidos para micas secundárias (Monier *et al.* 1984) são: serem ricas em Fe, Si e

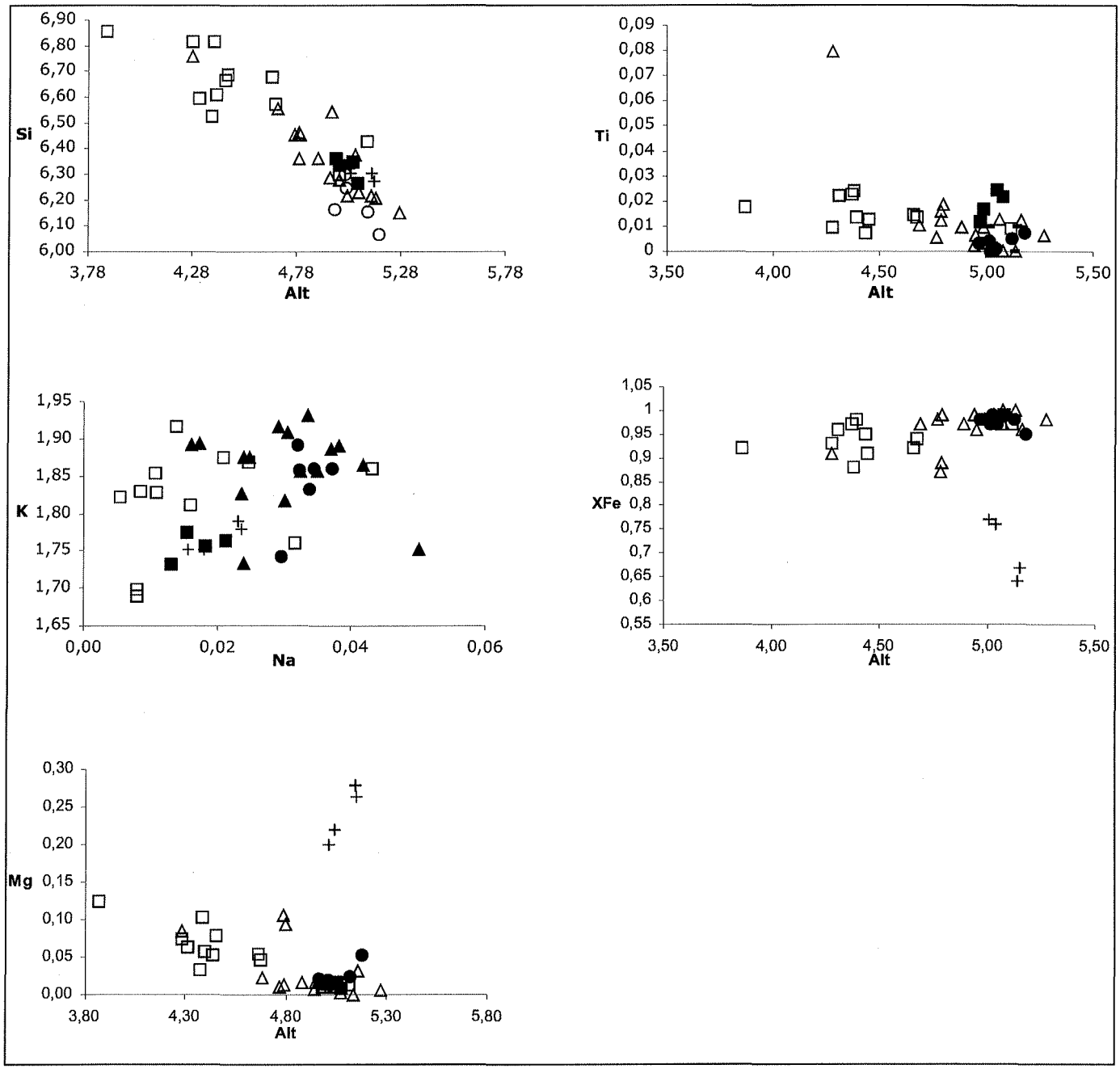

Figura 3 – Representação da composição das micas brancas dos maciços da Suíte Intrusiva Velho Guilherme. Simbologia conforme a Figura 2.

Mg e empobrecidas em Ti, K e Na; fórmula estrutural com ocupação octaedral > 4,15 e sítio intercamada < 1,8. Analisando a Tabela 1, constata-se que a maioria desses critérios se verificam nas análises das micas estudadas.

Em virtude da complexidade deste tipo de mica, vários estudos experimentais foram realizados com intuito de definir um campo de estabilidade mais próximo da realidade. Monier & Robert (1986) realizaram um estudo experimental de soluções sólidas de micas no sistema $K_2O - MgO - FeO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$ a 2 kbar, e constataram que micas associadas a granitos, hidrotermalmente alterados, possuem uma ocupação octaedral elevada real, típica de soluções sólidas de micas de baixa temperatura. Na Figura 7, a composição da fase micácea analisada, situa-se no domínio das micas secundárias.

RELAÇÃO COM A MINERALIZAÇÃO DE CASSITERITA A mineralização de cassiterita está intimamente associada às fácies graníticas mais evoluídas e mais intensamente alteradas, onde a associação mineral secundária típica epidoto + albita + microclina + sericita + muscovita 2 + clorita + minerais opacos + esfalerita + quartzo + fluorita + topázio + cassiterita assume conteúdos importantes (6% e 13% modal, Teixeira 1999) (Figura 8). Nos corpos de greisen a muscovita torna-se uma das fases mais abundantes (13% a 48%) e a cassiterita é uma fase mais freqüente do que nos granitos alterados. Assim, em relação aos granitos e *greisens*, pode-se estabelecer a clara relação entre a muscovita, alvo deste estudo, e as mineralizações de cassiterita, uma vez que a cristalização desta fase e da muscovita ocorre em momentos muito próximos e envolvem a interação rocha/fluidos tardios, pós-magmáticos, ricos em voláteis, especialmente F (Teixeira 1999), contidos na fase final de evolução dos corpos graníticos. Neste estágio, o Sn^{+2}

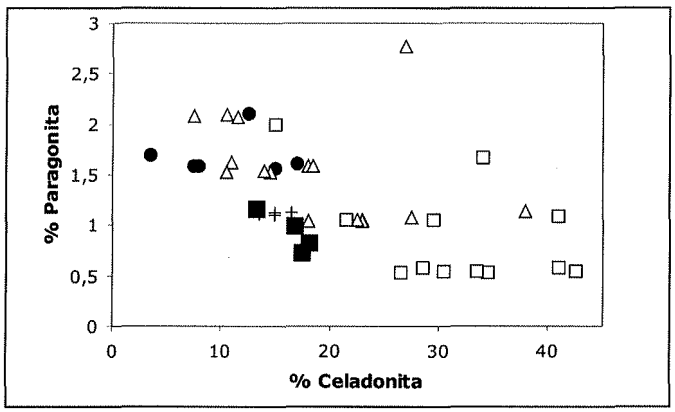

Figura 4 – Percentagem de molécula paragonítica e celadonítica presente na composição química das micas em estudo. % Paragonita = 100Na/(Na+K), % Celadonita = 100(Si – 6)/2. Símbolos conforme a Figura 2.

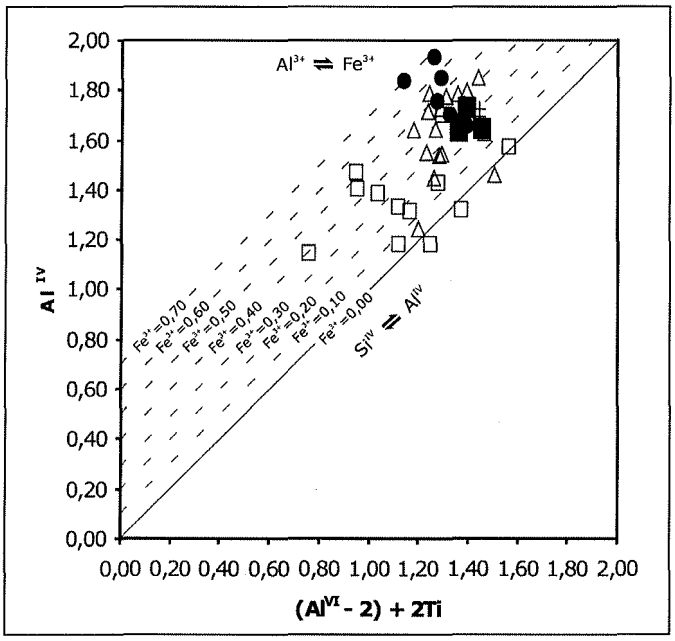

Figura 5 – Representação das micas no diagrama ^{IV}Al x (^{VI}Al–2) + 2Ti de Cathelineau (1982), modificado de Simões (1992). Símbolos conforme Figura 2.

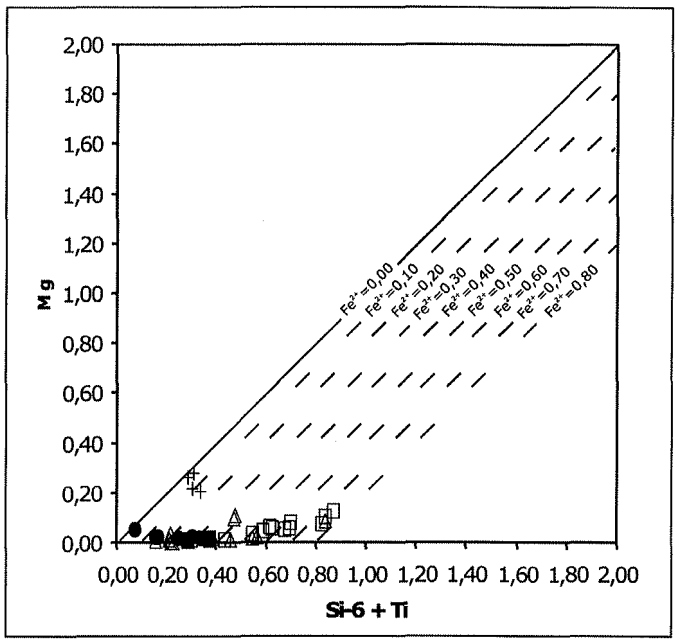

Figura 6 – Representação das micas no diagrama Mg x (Si – 6) + Ti de Cathelineau (1982), modificado de Simões (1992). Símbolos conforme Figura 2.

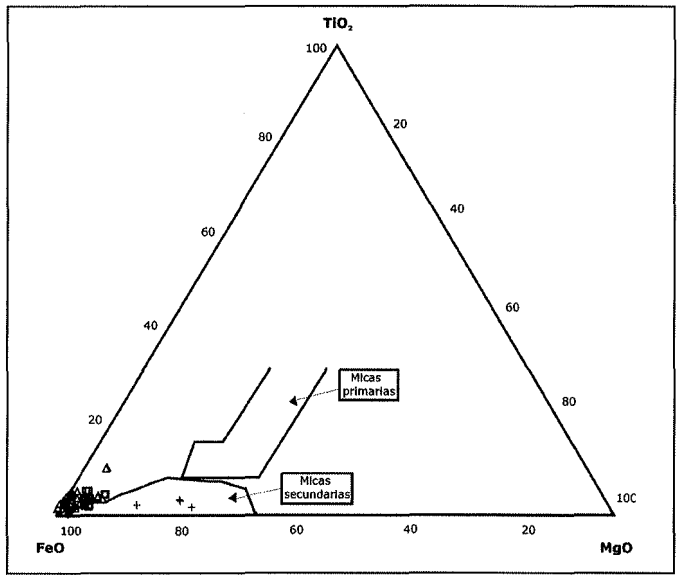

Figura 7 – Diagrama TiO2 x MgO x FeO modificado de Monier et al.(1984), mostrado a origem da muscovita presente nos granitos e greisens dos maciços da Suíte Intrusiva Velho Guilherme. Simbologia conforme a Figura 2.

contido principalmente na biotita é extraído, incorporando-se à fase fluida, onde oxida-se e precipita-se como Sn^{+4} formando a cassiterita (Teixeira *et al.* 2002). Isto representa um guia adicional à prospecção geológica, com a muscovita sendo um indicador da presença desse tipo de mineralização. Desse modo, a presença de muscovita em rochas graníticas semelhantes da região, aliada às outras fases secundárias pós-magmáticas já mencionadas, pode ser usada como um indicador petrográfico de mineralizações de cassiterita. Paralelamente, elevadas quantidades de F nas rochas envolvidas, podem servir como um indicador geoquímico.

CONCLUSÕES As muscovitas presentes nos granitos dos maciços Antônio Vicente, Velho Guilherme, Mocambo, Benedita e Ubim/Sul revelaram composição e evolução distintas. As micas dos maciços Mocambo e Ubim/Sul mostram um *trend* de variação composicional amplo, desde muito próxima ao membro final muscovita até o membro final fengita. Este fato é comprovado pelo estudo dos diagramas de correlação de cátions, bem como pela relação %Paragonita x %Celadonita, que apresentam: (1) um acréscimo de Si, XFe e K acompanhado pela diminuição de Al total, (2) maior quantidade da molécula de celadonita nestes maciços. Nos maciços Antônio Vicente, Velho Guilherme e Benedita essa substituição foi mais homogênea, haja vista que as micas apresentam fórmulas estruturais incidindo exclusivamente no campo da fengita. Os alto valores de Fe, Si e Mg e os baixos de Ti, K e Na, bem como fórmulas estruturais possuindo ocupação octaedral > 4,15, permitem

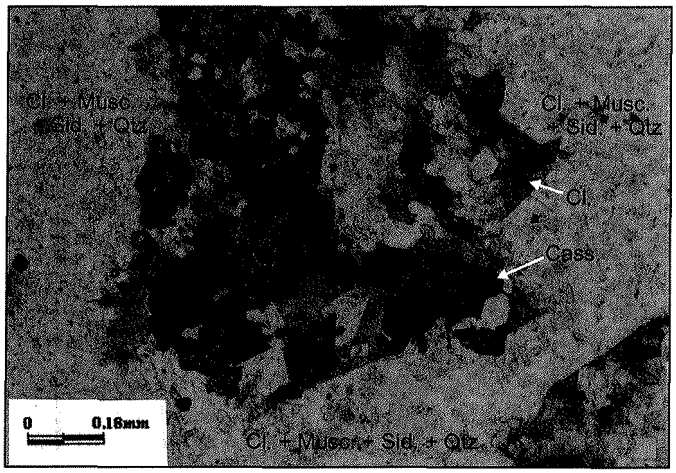

Figura 8 – Fotomicrografia mostrando a paragênese típica do estágio pós-magmático. No centro, observa-se um agregado de cristais de cassiterita envolto pela associação clorita+muscovita+siderofilita+quartzo presentes no clorita-muscovita-siderofilita-quartzo greisen (Luz polarizada). Cass=cassiterita, Musc=muscovita, Cl=clorita, Sid=siderofilita, Qtz=quartzo.

concluir que se trata de muscovitas de origem secundária em relação aos granitos, embora corresponda a uma fase primária nos *greisens*. Estudos petrográficos mostraram uma grande coincidência entre a presença expressiva da muscovita estudada e o aparecimento da cassiterita. A presença de grande quantidade de F e Sn é marcante nas fases mais evoluídas do maciços mineralizados. Isto permite considerar que quantidades importantes dessa mica podem indicar a presença de mineralizações de cassiterita e assim representar um indicador metalogenético para mineralizações de estanho, tanto para outros corpos graníticos e *greisens* da região, quanto de outras províncias.

Agradecimentos Os autores deste trabalho agradecem aos Profs. Drs. Silvio Vlach e Excelso Ruberti e ao técnico Marcos Mansueto pelo apoio e orientação durante a realização das análises químicas em fases minerais, realizadas no Laboratório de Microssonda Eletrônica do Departamento de Mineralogia e Petrologia do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.

À FAPESP (Processo nº 96/3942-0), pelo apoio ao desenvolvimento do projeto. Este trabalho é uma contribuição ao PRONEX (103-98/MCT/CNPq - Proc. 66.2103/98-0), cuja coordenação está por conta do Prof. Dr. Roberto Dall'Agnol do Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará.

Referências

Abreu F.A.M. & Ramos C.R. 1974. Estanho do Sul do Pará. *In*: SBG, Congr. Bras. Geologia, 28, *Anais*, p. 11.

Almeida F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B., Fuck R.A. 1981. Brazilian structural provinces: An introduction. *Earth-Science Reviews*, **17**:1-29.

Araújo O.J.B., Maia R.G.N., Jorge João X.S., Costa J.B.S. 1988. A megaestruturação arqueana da folha Serra dos Carajás. *In*: SBG, Congresso Latinoamericanao de Geologia, 7, Belém, *1, Anais*, p. 324-333.

Borges R.M.K. 1997. *Petrografia e química mineral dos greisens associadosao Granito Água Boa - Mina Pitinga(AM): um estudo dos processos de formação de greisens*. Dissertação de Mestrado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 190 p.

Cathelineau M. 1982. *Les Gisements d'uranium liés spatialement aux leucogranites sudarmoricains et à leur encaissant métamorphique. Relations et interactions entre les minéralisations et divers contexts géologiques et structuraux*. Mém. Sci. Terre, 42, 375 p.

Dall'Agnol R. 1980. *Etudes sur des granites du type "Rondonian" en Amazonie Orientale et leurs transformations tardi-magmatiques*. Tese de Doutorado, Laboratoire de Geologie, Université Paul Sabatier, 348 p.

Dall'Agnol R., Bettencourt J.S., Jorge João X., Medeiros H., Costi T.H., Macambira M.J.B. 1987. Granitogeneses in the northern Brazilian region: a review. *Rev. Bras. Geoc.*, **17**:382-403.

Dall'Agnol R., Teixeira N.P., Magalhães M.S. 1993. Diagnostic features of the Tin-specialized anorogenic granites of the Eastern Amazonian Region. *Anais Acad. Bras. Cienc.*, **65**:33-50.

Daoud, W.K. 1988. *Granitos estaníferos de Pitinga. Contexto Geológico e depósitos minerais associados*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 194 p.

Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. 1966. *Minerais constituintes das rochas*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 556 pp.

Foster M.D. 1960a. Layer charge relations in the dioctahedral and trioctahedral micas. *Amer. Mineralogist*, **45**:383-398.

Foster M.D. 1960b. *Interpretation of the composition of trioctahedral micas*. U.S. Govt. Print. Off, Washington, 354 pp.

Gastal M.C.P. 1987. *Maciço Granítico Musa: Mapeamento, Petrologia e Petroquímica, Rio Maria, SE do Pará*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 327 p.

Gonçalez M.G.B., Vieira E.A.T., Dall'Agnol R., Macambira M.J.B., Angelim E.P.V., Senta N.D. 1988. Geologia do Maciço Anorogênico Cigano. Vale do Rio Parauapebas-PA. *In*: SBG, Congr. Bras. Geologia, 35, *Anais*, p. 1132-1146.

Guidotti C.V. 1984. Micas in metamorphic rocks. *In*: S.W. Bailey (ed.) *Micas*. Reviews in Mineralogy, v.13, p. 357-467.

Harrison T.N. 1990. Chemical variation in micas from the Cairngorm pluton., Scotland. *Mineral. Magaz.*, **54**:355-366.

Hawthorne F.C., Cerny P. 1982. The mica group. Mac short course handbook. *In*: P. Cerny (ed.) MAC. *Short course in Granitic Pegmatiticin Science and Industry*, 8, pp.: 63-98.

Macambira E.M.B. & Vale A.G. 1996. *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. São Félix do Xingu. Folha SB-22-Y-B. Estado do Pará*, CPRM, Brasília, 384 pp.

Miller C.F., Stoddard E.F., Bradfish L.J., Dollase W.A. 1981. Composition of plutonic muscovite. *Can. Min.*, **19**:25-34.

Monier G. & Labernardière H. 1984. Générations sucessives de muscovites et feldspaths potassiques dans les leucogranites du massif de Millevaches(Massif Central Français). *Bull. Minèral.*, **107**:55-68.

Monier G. & Robert J.L. 1986. Evolution of the miscibility gap between muscovite and biotite solid solutions with increasing lithium content: an experimental study in the system K2O-Li2O-MgO-FeOAl 2O3-SiO2-H2O-HF at 6000C, 2Kbar PH2O: comparison with natural lithium micas. *Mineral. Magaz.*, **50**:641-651.

Monier G., Charoy B., Cuney M., Ohnenstetter D., Robert J.L. 1987. Évolution spatiale et temporelle de la composition des micas du granite albitique à topaze-lépidolite de Beauvoir. *Géologie de la France*, **2-3**: 179-188.

Pitcher W.S. 1979. The nature, ascent and emplacement of granitic magmas. *Jour. Geol. Soc London*, **136**:627-662.

Rieder M., Cavazzini G., D'yakonov Y.S., Frank-Kamenetskii V.A., Gottardi G., Guggenheim S., Koval P.V.; Müller G., Neiva A.M.R., Radoslovich E.W., Robert J.L., Sassi F.P., Takeda H., Weiss Z., Wones D.R. 1998. Nomenclature of the micas. *Can. Mineral.*, **36**:905-912.

Seer H.J. 1995. *Evolução tectônica dos Grupos Araxá e Ibiá na sinforma de Araxá, MG*. Tese de Doutoramento, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.

Simões P.M.M.P. 1992. *Caracterização petrográfica, mineralógica e geoquímica de granitos de duas micas da região de Viana do Castelo-Vila Praia de Âncora (NW de Portugal)*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Ciências da Terra, Universidade do Minho – Portugal.

Speer J.A. 1984. Micas in igneous rocks. *In*: S.W. Bailey (ed.) *Micas*. Reviews in Mineralogy, 13, pp.: 299-356.

Tassinari C.C.G. & Macambira M.J.B. 1999. Geochronological Provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, **22**:174-182.

Taylor R.G., Pollard P.J. 1988. Pervasive hydrothermal alteration in tinbearing granites and implications for the evolution of ore-bearing magmatic fluids. Recent Advances in the Geology of Granite-Related Mineral Deposits. *Can. Inst. Min. Metal.*, Special Volume, **39**:86-95.

Teixeira N.P. 1999. *Contribuição ao estudo das rochas granitóides e mineralizações associadas da Suíte Intrusiva Velho Guilherme, Província Estanífera do Sul do Pará*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 508 p.

Teixeira N.P. & Andrade W.L.G. 1992. Caracterização Petrográfica dos "stocks" graníticos Benedita e Ubim/Sul. Região de São Félix do Xingu/PA. *Bol. Mus. Par. Emílio Goeldi, Ciências da Terra*, **4**:3-33.

Teixeira N.P. & Dall'Agnol R. 1991. Geologia e petrografia do Maciço Granítico Antônio Vicente. Região de São Félix do Xingu/PA. *Bol. Mus. Par. Emílio Goeldi. Ciências da Terra*, **3**:45-73.

Teixeira N.P., Fernandes C.M.D., Moura C.A.V., Pinho S.C.C., Bettencourt J.S. 2002. Geologia, Geoquímica, Geocronologia e isótopos de Sm-Nd de rochas vulcânicas paleoproterozóicas do Grupo Uatumã ocorrentes na região de São Félix do Xingu, Província Mineral de Carajás, Cráton Amazônico, Brasil. *In*: SBG, Simp. Vulc. Amb. Assoc., 2, *Boletim de Resumos e Roteiro da Excursão,* p. 28.

Tischendorf G., Gottesmann B., Förster H.J., Trumbull R. B. 1997. On Li-bearing micas: estimating Li from electron microprobe analyses and an improved diagram for graphical representation. *Mineral. Magaz.*, **6**:809-834.

Wones D.R. 1998. Nomenclature of the micas. *Can. Mineral.*, **36**:905-912.

Manuscrito A-1450
Revisão aceita em 09 de novembro de 2006