ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS MINÉRIOS DA MINA BATEIAS E DE OUTRAS MINAS DA REGIÃO DE CAMPO ALEGRE (SANTA CATARINA)

JOÃO CARLOS BIONDI, ELEONORA MARIA GOUVEA VASCONCELLOS & GUILHERME ALVES VANZELA

ABSTRACT *COMPARATIVE STUDY BETWEEN THE ORES OF THE BATEIA MINE AND OTHER MINES OF THE CAMPO ALEGRE REGION, SANTA CATARINA, BRAZIL* Bateias (Santa Catarina - Brazil) is the largest mine of ceramic smectitic raw material in operation in southern Brazil. It is located among volcano-sedimentary rocks from Campo Alegre Basin, dated 570 ± 30 Ma. The region contains dacitic and basaltic tuffs and lavas that, after a complex evolving process, were outcropped, zeolitized and then argillized, generating yellow (dacitic) and red (basaltic) ores. Both are high silica and have illite-smectite interstratified clay-minerals. These ore differs from kaolinitic and illitic ores from the majority of Campo Alegre region mines. Factors that generated ores from tuffs and lavas started with zeolitization, occurred inside phreatic zone, followed by weathering related argillization, after surface lowering due to erosion. This process evolved with increasing of rock volumes, decreasing of calcium and increasing of sodium grades (zeolitization phase). Then, argillization has increased rock volumes and lixiviated all chemical elements, excepted iron and manganese, that were residually concentrated on surface.

Keywords: Ceramic smectitic ore, geochemistry, mineralogy, Bateias Mine, Campo Alegre, Santa Catarina, Brazil

RESUMO Bateias (Santa Catarina) é a maior mina de matéria prima cerâmica de composição esmectítica em operação no sul do país. Encontra-se em meio a rochas da bacia vulcanossedimentar de Campo Alegre, datada em 570 ± 30 Ma. A região da mina comporta tufos e lavas dacíticos e basálticos que, após evolução complexa, foram expostos ao intemperismo, zeolitizados e, em seguida, argilizados, transformando-se em minérios amarelos (dacíticos) e vermelhos (basálticos). Estes minérios têm alto teor de sílica e consistem em argilominerais interestratificados illita-esmectita, sendo, portanto, diferentes dos minérios essencialmente cauliniticos e/ou illíticos da maior parte das minas da região de Campo Alegre. A transformação dos tufos em minérios fez-se, inicialmente, após a zeolitização da rocha, dentro do lençol freático e, em seguida, pela argilização intempérica, após o rebaixamento da superfície freática. Nesse processo houve, inicialmente, diminuição de volume, diminuição do teor de cálcio e aumento do teor de sódio nas rochas (fase de zeolitização). Em seguida, resultou em novo aumento de volume das rochas e a lixiviação de todos os elementos, com exceção do ferro e do manganês, concentrados residualmente em superfície.

Palavras-chave: cerâmica, minério esmectítico, geoquímica, mineralogia, Mina Bateias, Campo Alegre, Santa Catarina

INTRODUÇÃO As esmectitas participam da composição de massas cerâmicas usadas para o fabrico de pisos e revestimentos. Misturadas a caulinitas e areia, as esmectitas aumentam a densidade das massas, diminuem a deformação do grés cerâmico e agem como fundentes, diminuindo a temperatura de cozimento das peças cerâmicas. Bateias é a maior mina de argila esmectítica do sul do Brasil, e a única mina de matéria prima cerâmica situada na parte norte da Bacia de Campo Alegre (Biondi *et al.*, 2001 a e b), enquanto na metade sul há 22 minas em operação. Entre elas destacam-se Cambuí, Oxford (Floresta), Turvo, Aruanã, Kowalski, Planalto Alegre e AY, que já foram estudadas por Biondi & Furtado (1999), Vasconcellos *et al.* (1999), Biondi *et al.* (2001 a e b). O minério extraído de Bateias difere de todos os outros lavrados na região de Campo Alegre.

GEOLOGIA REGIONAL A bacia de Campo Alegre (Fig. 1) é uma bacia vulcanossedimentar composta essencialmente de vulcanitos félsicos (traquitos e riolitos), e menores proporções de basaltos e andesitos, tufos e sedimentos vulcanogênicos. Foi mapeada por Daitx, em 1979, e teve sua geologia revista por Silva (1987), durante a elaboração do Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina na escala 1:500.000, e por Citroni (1998). Tem todas as características de uma bacia tardi-orogênica, sua gênese tendo sido relacionada à subducção da microplaca Curitiba sob a Luís Alves (Machiavelli 1991, 1993, Siga Jr. 1995, Harara 1996).

A Formação Campo Alegre foi definida por Ebert, em 1971, como parte do Grupo Guaratubinha. Daitx (1979) e Silva (1987) dividiram-na em cinco unidades e a situaram no Grupo Itajaí. Citroni (1998) e Citroni & Basei (1999) propuseram uma divisão da bacia de Campo Alegre em nove Formações contidas em dois Grupos, Bateias e Campo Alegre. Nenhum desses trabalhos aborda o estudo dos depósitos de argila, identificados e localizados na figura 1.

A Bacia de Campo Alegre (Fig. 1) contém, na base, conglomerados e arcósios intercalados com lavas traquíticas (predominantes), andesíticas e básicas (menos frequentes). Sobre essas unidades depositaram-se várias seqüências vulcânicas com derrames, brechas, tufos e cinzas de composições essencialmente riolítica e traquítica. Essas rochas vulcânicas foram datadas pelo método Rb-Sr em 536 ± 65 Ma (Basei e Teixeira 1987) e pelo método U-Pb em 570 ± 30 Ma (Citroni 1998).

Durante o vulcanismo, as rochas foram alteradas por fluidos quentes de origem profunda e por água superficial (Biondi *et al.* 1999, Vasconcellos *et al.* 1999, Biondi & Furtado 1999; Biondi *et al.* 2001a e b). Ao final da fase vulcânica, a parte norte da bacia foi preenchida por sedimentos clásticos, finos a médios, depositados em um lago formado dentro de caldeira vulcânica (Citroni 1998, Citroni & Basei 1999).

Após a deposição dos sedimentos lacustres, a seqüência ficou exposta durante 260 a 300 Ma, até o início do Permiano, quando a região foi recoberta pelo mar e iniciou a deposição

Figura 1 - Mapa geológico da bacia vulcanossedimentar de Campo Alegre (SC). As cruces (x) indicam as localizações das maiores minas de argilas da região, identificadas na legenda. Os círculos (o) indicam as localizações de outros depósitos de argilominerais ainda não lavrados ou já esgotados. Notar que a mina Bateias (nº 22) é a única situada a norte da grande falha NE, que passa no centro da bacia, ao lado da cidade de Campo Alegre (Citroni, 1998, modificado por Biondi et al., 2001a)

dos sedimentos do Grupo Itararé, da Bacia do Paraná. É muito difícil avaliar os efeitos da erosão antes da deposição dos sedimentos permianos e quais as modificações intemperísticas e estruturais a que foram submetidas as rochas da bacia de Campo Alegre nesse período de cerca de 300 Ma. É igualmente difícil avaliar as consequências da imersão no mar Itararé e do soterramento das rochas sob as formações da Bacia do Paraná, mas certamente as rochas vulcânicas da bacia de Campo Alegre foram afetadas por esses eventos. Após a exumação, as rochas vulcânicas foram novamente submetidas a intemperismo e ero-

são, até adquirirem as características observadas hoje. Os depósitos de argila são produtos dessa história geológica.

A MINA BATEIAS Geologia do local da mina A área da mina Bateias foi mapeada na escala de 1:1000. As figuras 2A e 2B mostram as principais feições geológicas desta área. No geral, todas as rochas estão intemperizadas e argilizadas. As amostras de rochas não intemperizadas (Tabela 1, amostras PB-7A e 7B) ou pouco intemperizadas (Tabela 1, amostras PB-6 e 8) foram encontradas somente no fundo das cavas, em locais onde

Figura 2 - (A) Mapa geológico da mina de Bateias. (B) Seções geológicas na mina Bateias. Para localização dessas seções vide mapa geológico. Notar que a parte leste da mina contém minério vermelho, basáltico, e a parte oeste tem minério amarelo, dacítico, mais micáceo e silicoso que o basáltico.

todo o minério já foi lavrado. A área da mina é constituída essencialmente por dacitos e tufolavas dacíticas com características ignimbríticas, mas ocorrem, também, lavas e tufo basálticos. Os tufolavas e as lavas intemperizados são os minérios da mina Bateias (Fig. 2).

A existência de apenas um afloramento de rochas não intemperizadas limita as informações sobre as características dessas rochas. Os dacitos não intemperizados têm matriz fina, coloração cinza, são foliadas e contêm muitos fragmentos de basaltos marron e/ou negra. Os tufolavas dacíticos têm matriz vítrea com muitos fragmentos de basalto e de cristais de quartzo. A filitização (muscovita e sericita) e a cloritização da matriz indicam alteração hidrotermal, provavelmente ainda na época em que o vulcanismo era ativo na região (Biondi & Furtado 1999, Biondi et al. 2001a e b). Em quase toda a área mapeada eles estão intemperizados, com coloração amarelada e parda, e matriz com fragmentos brancos e cinza. Na parte leste da mina afloram basaltos intemperizados, que constituem o minério basáltico. Esse minério é escuro, marron-avermelhado com manchas irregulares.

Na parte sul da mina, os tufolavas dacíticos estão cobertos por arenitos, siltitos, grauvacas e cineritos bem acamadados, exibindo cores marron claro e amarelada e atitudes próximas de N56°E/14°SE (Figs. 2A e 2B). Citroni (1998) considerou essas rochas como constituintes de uma sequência sedimentar lacus-

tre, formada em um lago de caldeira vulcânica, na época do vulcanismo Itajaí. Essa sequência é diferente daquela que aflora na parte norte da mina, onde ocorrem argilitos bem laminados, de cor cinza ou negra, lustrosos, formando blocos limitados por falhas em meio aos tufo dacíticos. Devido a inexistência de contatos expostos entre essas duas seqüências, não foi possível determinar suas relações estratigráficas. Todas as rochas estão cortadas e deformadas por diques e apófises de rochas basálticas (Fig. 2A e 2B). Essas deformações são vistas mais claramente nos tufolavas e nas rochas sedimentares da parte sul da mina.

Os minérios da mina Bateias **COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DOS MINÉRIOS E PROTOMINÉRIOS** Os tufolavas dacítico e basáltico não intemperizados são os principais protominérios do depósito de Bateias. Essas rochas, após intemperizadas, tornam-se os minérios. A análise petrográfica dos protominérios mostrou uma matriz fina, composta por muscovita e plagioclásio (albita-oligoclásio) e muito vidro vulcânico parcialmente devitrificado. Parte desse vidro está zeolitizado, cloritizado e carbonatizado (Fig. 3). A difratometria de Raios-X revelou a presença de zeólitas do tipo phillipsita e gismondita, em proporções muito variadas. A rocha contém muitos fragmentos de basalto, de cristais de quartzo e *fiammes* de vidro dacítico devitrificado. Os *fiammes* estão sericitizados e foliados, sendo

os planos de foliação ressaltados pela presença de óxido de ferro (Fig. 3). Na rocha intemperizada, mesoscopicamente os *fiammes* ocorrem como manchas esbranquiçadas, com aspecto esfiapado, característico do minério da Mina Bateias. Prismas de plagioclásio podem ser reconhecidos em meio a matriz sericítica, nos tufos dacíticos, e clorítica nos basaltos. As rochas intemperizadas mais escuras são pontilhadas por minerais negros, sub-milimétricos, de óxidos de ferro e manganês.

Para cada amostra coletada na área da mina foi preparado um esfregaço da fração menor que 325 mesh, uma lâmina sedimentada aquecida a 550°C durante 2 horas e uma terceira, tratada com glicol-etileno. Todas foram analisadas no LAMIR – Laboratório de Análises de Minerais e Rochas, da UFPR. Foram feitos difratogramas de raios X das matrizes de todas as amostras de minério coletadas (Tabela 1, amostras com siglas PB são da mina Bateias).

As matrizes dos minérios são compostas essencialmente de quartzo microcristalino e argilominerais interstratificados de tipo esmectita-illita. Em proporções muito menores ocorrem caulinita e illita (Fig. 4, amostra PB-04). Alguns difratogramas mostraram indícios de sepiolita-paligorskita.

Nas amostras menos intemperizadas (Fig. 4, amostra PB-06), zeólitas e a muscovita ocorrem junto com quartzo, plagioclásio e argilominerais interstratificados, de tipo esmectita-illita. Comparando difratogramas dos minérios de Bateias com os das minas Turvo, Aruanã e Planalto Alegre (Fig. 1), também usados para o fabrico de pisos e revestimentos (Fig. 4), nota-se que somente a mina Turvo (amostra T-8A) também produz minério esmectítico (Vasconcellos *et al.*, 1999, Biondi *et al.* 2001a). Os minérios das demais minas contêm illita e um argilomineral verde que, segundo os critérios de Velde (1992, p.71), seria glauconita. Os minérios das demais minas da região de Campo Alegre são originalmente hidrotermais (Biondi & Furtado 1999, Biondi *et al.* 2001a e b) e essencialmente cauliniticos (p.ex. amostra Turvo-2A da fig. 4, Biondi & Furtado 1999), Bateias e Turvo (parte sedimentar) sendo exceções à regra geral.

PETROQUÍMICA DOS MINÉRIOS E PROTOMINÉRIOS A Tabela 1 mostra os resultados das análises químicas de 15 amostras de minérios e de rochas não ou pouco intemperizados da mina Bateias (vide localização das amostras na Fig. 2), bem como de outros minérios da região de Campo Alegre (SC) usa-

Figura 3 - (A) Fotomicrografia da amostra PB-7A, nicóis cruzados. Tufo dacítico não intemperizado, contendo fragmentos de basalto, de quartzo e "fiammes" dacíticos devitrificados. A matriz é composta de vidro, plagioclásio e quartzo. O vidro está parcialmente devitrificado para zeólitas (phillipsita e gismondita), clorita e carbonato. (B) Amostra PB-7A, nicóis paralelos. (C) Fotomicrografia da amostra PB-8A, nicóis cruzados. Esta rocha é semelhante à amostra PB-7A, diferenciando-se por ter matriz composta quase unicamente de phillipsita. (D) Fotomicrografia da amostra PB-8A, nicóis paralelos, filtro amarelo.

Figura 4 - Difratomogramas de minérios usados para o fabrico de revestimentos cerâmicos das minas Bateias, Turvo, Aruanã e Planalto Alegre, da Bacia de Campo Alegre. Notar que somente Bateias e Turvo produzem minérios esmectíticos (IL-MT = interstratificados illita-esmectita). Os minérios das minas Aruanã e Planalto Alegre têm illita e glauconita. A maioria das outras minas da região produz minérios caulíníticos (p.ex. Turvo-2A).

dos em revestimentos cerâmicos, provenientes das minas AY, Turvo, Aruanã, Floresta, Kowalski, Planalto Alegre e Cambui (Fig.1). As análises foram realizadas no LAMIR-Laboratório de Análises de Minerais e Rochas – UFPR, por fluorescência de raios X, usando pastilhas de amostras fundidas com tetraborato de lítio. As médias dos teores dos elementos nas amostras de minérios constam da primeira linha da Tabela 1.

Visando caracterizar a composição química dos minérios de Bateias, foram feitos diagramas binários com todas as substâncias e elementos químicos analisados (Tabela 1). As figuras 5, 6 e 7 mostram somente os diagramas que melhor diferenciam os minérios de Bateias dos das outras minas. A exemplo dos outros minérios da região de Campo Alegre (Biondi *et al.* 1999, Vasconcellos *et al.*, 1999, Biondi *et al.* 2001 a), os de Bateias têm alto teor de sílica (Tabela 1, Fig. 5C). No entanto, diferem dos

demais pelos teores elevados de MgO (Fig. 5B), sendo superados neste aspecto apenas por alguns minérios da Mina Turvo, e pelos baixos teores de Al_2O_3 . Os teores de Fe e K (Figs. 5A e 5D, respectivamente) são mais elevados que os da maior parte dos outros minérios e superados somente por alguns das minas Turvo e Floresta (Biondi *et al.*, 1999, Vasconcellos *et al.*, 1999, Biondi *et al.*, 2001). Os teores elevados de MgO, Al_2O_3 e de Fe_2O_3 são devidos aos protominérios de Bateias terem sido basaltos, tufos basálticos e tufos dacíticos com fragmentos basálticos, o que não acontece nas outras minas da região, cujos minérios são derivados de lavas e tufos traquíticos e riolíticos (Biondi & Furtado 1999, Biondi *et al.* 2001 a e b). Os teores de K_2O variam entre 3 e 4%, comuns em dacitos, porém incomuns em rochas que aparentam ter sido lixiviadas. Esses teores são consequência da filitização das amostras, que as mineraliza com sericita e muscovita, e da presença de phillipsita. O potássio, normalmente muito móvel em ambientes superficiais, não foi lixiviado porque essas rochas foram intemperizadas dentro do lençol freático, conforme discutido adiante.

Considerando os elementos traços, os minérios de Bateias destacam-se por teores elevados de Y e Ba e baixos de Zr (Tabela 1 e Fig. 6). Os teores de Ba se justificam pelos teores igualmente elevados de K, devido à sua afinidade geoquímica. Esses teores justificam-se, também, com a composição basáltica dos minérios, cujos feldspatos retêm o Ba nas sua malha cristalina. Ítrio e zircônio são os elementos que melhor diferenciam os minérios de Bateias dos outros da região. O baixo teor de Zr e o teor elevado de Y (Fig. 6) são consequências, respectivamente, da menor quantidade de zircão e da maior quantidade de hornblenda em lavas e tufos basálticos que nos traquitos e riolitos das outras minas (Vasconcellos *et al.* 1999, Biondi *et al.* 2001a). Os demais elementos maiores (Si, Al, Mn, Ca, Na e P) e traços (Sr, Rb e Nb) ocorrem em Bateias nos mesmos teores que nos outros depósitos da região.

As figuras 7 A, B, C e D mostram que os minérios vermelho e amarelo têm composições químicas muito semelhantes. A cor vermelha, mais escura, do minério derivado de basaltos e tufos basálticos, poderia ser explicada das seguintes formas: (a) o minério vermelho seria basáltico, portanto com mais ferro oxidado que o minério dacítico, amarelo; (b) o minério vermelho seria resultado da oxidação superficial mais avançada em alguns locais do depósito; (c) as cores vermelha e amarela seriam consequência de diferentes graus de hidratação/hidrólise das rochas.

GÊNESE DOS MINÉRIOS Transferências químicas A descrição petrográfica das amostras da mina Bateias mostrou que as amostras PB-07 A e B, coletadas no fundo da cava (Fig. 2A), são tufos dacíticos hidrotermalizados e zeolitizados, mas sem evidências de intemperismo. No local de coleta das amostras PB-07 há um núcleo, exposto pela lava, de rochas que não foram intemperizadas. Afastando-se desse núcleo, observou-se que as rochas estão progressivamente mais intemperizadas quanto mais distantes estiverem, tanto na horizontal quanto em direção a superfície. A petrografia dessas amostras mostrou que, conforme aumenta o grau de intemperismo, diminui a quantidade de zeólitas e feldspatos e aumenta a de argilomineiras. A mesma variação gradacional pode ser notada observando os teores de Ca das amostras (Tabela 1). A amostra PB-07, coletada no núcleo preservado do intemperismo, tem 1,18% de CaO, a O6 tem 0,44%, a O5 tem 0,12% e a O4, a mais distante, tem 0,07%. Os teores de Na tem o mesmo comportamento. Esta diminuição

do teor de CaO é consequência da diminuição da quantidade de zeólitas e de feldspatos nas rochas. Essas rochas intemperizadas constituem os minérios lavrados em Bateias, e têm mais esmectitas quanto maior o grau de intemperismo. Com base nessa observação, foram coletadas as amostras PB-08, PB-06, PB-05 e PB-04 em posições afastadas de PB-07, mas situadas no mesmo horizonte estratigráfico, nas quais a alteração intemperística é progressivamente maior (Fig. 2A). Essas amostras foram usadas para avaliar as trocas químicas, causadas pelo intemperismo, que geraram os minérios de Bateias.

Considerando PB-07A como representativa do protominério, foi possível, utilizando o método de Gresens (1967), calcular as transferências químicas ocorridas durante a formação do minério. Gresens considera que uma substância, geralmente o Al_2O_3 ou o TiO_2 , permanece imóvel durante as transferências químicas

e, por comparação de teores, calcula as variações de teores ocorridas com as outras substâncias.

Procurou-se, de início, determinar qual dos compostos reconhecidamente pouco móveis (Al_2O_3 e TiO_2) seria o mais adequado para uma avaliação correta das mudanças químicas ocorridas durante o processo mineralizador. Usando-se uma balança de Arquimedes, foram medidas as densidades dos minérios e do protominério da mina Bateias (Tabela 2). Dispondo do peso de um centímetro cúbico (= densidade) e com base na composição química dos protominério e dos minérios, foram calculados os teores de Al_2O_3 e de TiO_2 que os minérios deveriam ter caso essas substâncias tenham permanecido imóveis durante as transformações químicas ocorridas para a formação dos minérios de Bateias. As razões entre os teores calculados e analisados (Tabela 3), indicam que os teores de TiO_2 mudaram muito me-

Tabela 1 - Composições químicas de minérios usados no fabrico de revestimentos cerâmicos provenientes de diferentes minas da região de Campo Alegre (SC).

Amostra	Soma	SiO_2 %	Al_2O_3 %	TiO_2 %	Fe_2O_3 %	MgO %	CaO %	Na_2O %	K_2O %	P_2O_5 %	Zr ppm	Y ppm	Rb ppm	Nb ppm	Ba ppm	Origem e material analisado
Média de Bateias		72,28	14,93	0,27	2,99	1,44	0,27	0,29	3,60	0,06	217	96	259	50	566	Média de Bateias
PB 15	96,23	72,26	15,42	0,26	2,57	1,36	0,09	0,06	3,95	0,08	217	97	295	47	754	Bateias Min. verm.
PB 14	94,63	72,88	14,24	0,25	2,60	1,20	0,05	0,05	3,18	0,063	214	102	253	49	374	Bateias Min. verm.
PB 13	96,39	73,65	14,47	0,27	2,74	1,31	0,06	0,01	3,67	0,054	217	78	281	49	343	Bateias Min. verm.
PB 12	95,59	71,65	15,55	0,26	3,56	1,15	0,05	0,01	3,17	0,036	242	86	191	52	606	Bateias Min. verm.
PB 11	95,80	71,42	15,52	0,29	2,97	1,44	0,28	0,001	3,66	0,058	217	84	261	50	709	Bateias Min. verm.
PB 10	97,19	72,80	14,70	0,27	3,16	1,55	0,24	0,34	3,94	0,040	221	79	286	52	456	Bateias Min. verm.
PB 09	97,16	73,11	14,30	0,22	2,64	1,72	0,39	0,52	4,02	0,058	172	83	308	47	322	Bateias Min. verm.
PB 08	97,39	73,01	14,30	0,28	2,72	1,51	0,61	1,56	3,11	0,087	216	89	223	47	500	Bateias Rocha pouco intemp.
PB07B	96,64	73,36	13,62	0,22	2,72	1,69	0,43	1,06	3,25	0,076	192	94	224	54	672	Bateias Rocha não intemp.
PB07A	96,92	72,30	14,20	0,23	2,44	1,70	1,18	1,02	3,54	0,073	198	216	254	52	774	Bateias Rocha não intemp.
PB 06	97,55	73,67	14,40	0,24	2,46	1,57	0,44	1,01	3,45	0,074	206	109	249	48	697	Bateias Min. amar.
PB 05	96,04	74,09	14,08	0,25	2,40	1,48	0,12	0,10	3,31	0,030	230	76	225	53	492	Bateias Min. amar.
PB 04	97,08	74,65	14,26	0,24	3,20	1,15	0,07	0,00	3,33	0,036	226	76	206	51	589	Bateias Min. amar.
PB 03	96,26	71,66	14,36	0,24	5,03	1,20	0,09	0,03	3,40	0,112	217	85	243	49	270	Bateias Min. amar.
PB 02	95,67	71,22	15,70	0,28	2,90	1,39	0,07	0,04	3,62	0,050	228	93	287	51	701	Bateias Min. amar.
PB 01	95,14	64,70	19,68	0,46	3,62	1,45	0,05	0,03	4,89	0,067	255	84	356	54	789	Bateias Min. amar.
CA-21	91,64	71,21	12,46	0,69	4,49	0,24	0,08	0,12	2,159	0,022	1805	160	158		206	Aruanã Min. verde
CA-22A	97,95	72,83	15,78	0,35	3,16	1,25	0,18	0,16	4,14	0,021	860	86	268	18		Aruanã Min. verde
PA-5(2)	90,93	71,53	13,36	0,24	1,86	0,42	0,007	0,062	3,52	0,020	300	38	115		193	Planalto Alegre Min. com pirita
PA-5(1)	89,72	70,29	13,21	0,25	2,04	0,39	0,008	0,066	3,54	0,019	314	40	120		218	Planalto Alegre Min. com pirita
PA-02 B	95,46	86,89	5,31	0,12	1,33	0,35	0,19	0,20	1,05	0,023	415	39	60	17		Planalto Alegre
PA-01 B	97,64	81,29	11,49	0,13	1,16	0,27	0,18	0,16	2,93	0,014	110	33	126	12		Planalto Alegre
CA-41	96,41	69,38	20,66	0,21	2,03	0,81	0,187	0,170	2,83	0,031	160	73	200	33	15	AY Min. verde
CA-40	97,81	71,94	18,80	0,53	2,49	0,79	0,154	0,098	2,88	0,039	173	81	215	39	79	AY Min. verde
OX-12A	84,55	45,69	26,44	0,25	4,37	0,94	0,09	0,03	6,68	0,009	302	91	386	22		Floresta Brecha
OX-10	91,52	71,87	16,11	0,22	1,08	0,28	0,11	0,07	1,75	0,014	225	35	105	19		Floresta Brecha verde
OX-7	87,99	47,81	25,12	0,40	5,41	1,28	0,09	0,05	7,72	0,039	569	123	513	22		Floresta Min. verde.
OX-6B	85,31	54,31	26,70	0,30	1,72	0,23	0,09	0,06	1,85	0,022	408	54	148	23		Floresta Tufo verde
CAM-14	91,87	77,84	11,32	0,13	1,22	0,20	0,10	0,07	0,96	0,016	154	26	66	14		Cambuí Tufo verdes
CAM-12B	83,72	59,17	20,31	0,31	1,51	0,48	0,13	0,18	1,58	0,046	403	54	107	25		Cambuí Tufo verde
CAM-12A	79,98	61,45	17,40	0,35	0,41	0,05	0,12	0,08	0,09	0,033	469	35	7	18		Cambuí Tufo verde
CAM-11C	85,59	50,96	27,37	0,39	2,51	0,64	0,09	0,04	3,54	0,029	516	68	207	29		Cambuí Riólito esverdeado
CAM-5	89,14	65,94	20,04	0,42	1,36	0,19	0,10	0,07	0,99	0,02	511	50	92	29		Cambuí Cinza verde
TU-8A	88,11	50,31	22,51	0,51	4,97	2,24	0,15	0,17	7,18	0,052	2339	148	314	44		Turvo Tufo verdes
TU-7	94,88	72,64	14,41	0,27	2,20	1,42	0,17	0,16	3,55	0,051	1156	97	146	33		Turvo Lapilli-tufo verde
TU-2	91,90	65,35	23,86	0,47	1,43	0,10	0,17	0,15	0,34	0,031	747	31	23	25		Turvo Riólito verde
TU-1A	94,47	62,25	20,51	0,41	3,15	2,06	0,18	0,20	5,65	0,046	1939	165	240	50		Turvo Riólito verde
KOV-41	95,20	71,63	20,17	0,23	0,90	0,41	0,17	0,15	1,50	0,033	210	59	85	17		Kowalski Min. verde
KOV-39	96,16	69,00	20,10	0,21	1,85	1,07	0,17	0,14	3,56	0,018	197	63	164	20		Kowalski Min. verde

Figura 5 - Diagramas Fe₂O₃ vs. Al₂O₃ (A), MgO vs. Al₂O₃ (B), Al₂O₃ vs. SiO₂ (C) e K₂O vs. Al₂O₃ (D) para comparação entre as composições dos minérios da Mina Bateias e os das minas Cambui, Floresta, Aruanã, AY, Kowalski, Turvo e Planalto Alegre, da região de Campo Alegre (SC).

Figura 6 - Diagramas Y vs. Zr para minérios da região de Campo Alegre (SC).

Tabela 2 - Densidades, em g/cm³, dos minérios da mina Bateias (SC). As amostras PB-04 a 08 são de minérios amarelos e as PB-10 a 13 são de minérios vermelhos. As composições e as descrições dessas amostras constam na Tabela 1.

Amostra	Nº de Medidas	Densidade média	Desvio Padrão
PB 04	4	2.051	0.079
PB 05	2	2.145	0.021
PB 06	5	2.280	0.075
PB 07A	9	2.538	0.019
PB 07B	13	2.475	0.032
PB 08	12	2.501	0.151
PB 10	7	2.361	0.033
PB 12	4	1.900	0.187
PB 13	4	2.200	0.660

Tabela 3 - Comparação entre os teores calculados e analisados de TiO₂ e Al₂O₃ dos minérios de Bateias, considerando a amostra PB-07 como protominério. As menores razões entre teores analisados e calculados do TiO₂ mostram que essa substância foi menos móvel que o Al₂O₃ durante as trocas químicas ocorridas durante a formação do minério de Bateias. As composições e as descrições dessas amostras constam na Tabela 1.

Amostra	Densidade	Al ₂ O ₃ anal.	Al ₂ O ₃ calc.	Razão calc./anal.	TiO ₂ anal.	TiO ₂ calc.	Razão calc./anal.
PB04	2.05	14.26	17.55	1.231	0.24	0.28	1.167
PB05	2.15	14.08	16.82	1.195	0.25	0.27	1.080
PB06	2.28	14.40	15.82	1.099	0.24	0.25	1.042
PB07A	2.54	14.20			0.23		
PB07B	2.48	13.62	14.57	1.070	0.22	0.23	1.045
PB08	2.50	14.30	14.43	1.009	0.28	0.23	0.821
PB10	2.36	14.70	15.28	1.039	0.27	0.25	0.926
PB12	1.90	15.55	18.98	1.221	0.26	0.30	1.154
PB13	2.20	14.47	16.39	1.133	0.27	0.26	0.963

nos que os de Al₂O₃. O TiO₂ foi, portanto, considerado quimicamente imóvel e seus teores usados como referência na equação de Gresens (1967). Assim foram calculadas as perdas e ganhos químicos ocorridos durante a transformação do protominério PB-07 A em minério amarelo. Os resultados (Tabela 4 e Fig. 8), mostram as transferências químicas e as variações de volume (Kv) ocorridos nessa transformação.

A amostra PB-08, cuja matriz tem mais phillipsita que gismondita (vide teores de Ca e Na na Tabela 1 e Figs. 3C e D), diminuiu 16,6% de volume em relação a amostra PB-07A, cuja matriz compõe-se de gismondita, clorita e sericita (Tabela 4 e Fig. 8 A). As amostras PB-06, 05 e 04 estão mais intemperizadas que a PB-08. Suas matrizes são de esmectitas, com pouca zeólita e feldspato (PB-06) ou sem vestígios desses minerais (PB-05 e

Figura 7 - Diagramas MgO vs. Al₂O₃ (A), Al₂O₃ vs. SiO₂ (B), Fe₂O₃ vs. Al₂O₃ (C) e K₂O vs. Al₂O₃ (D) para comparação entre os minérios vermelho e amarelo da Mina Bateias. Notar que as composições são muito semelhantes.

04). A argilização da matriz resultou em aumento do volume desses minérios, em relação ao protominério (Tabela 1, Fig. 7 A). Isto é esperado, desde que a argilização tenha sido intempérica e que as esmectitas são expansivas. A gênese do minério amarelo de Bateias envolveu a lixiviação de todos os elementos maiores, com exceção do ferro e do manganês, cujos teores aumentaram em algumas amostras devido a concentração residual superficial (Tabela 4 e Figs. 7B, C e D).

Modelo genético A sequência mostrada na figura 9A-G seria uma explicação para a gênese do minério esmectítico da mina Bateias. De 9A a 9E está representada a história geológica da Bacia de Campo Alegre, conforme deve ter ocorrido no local da mina Bateias, descrita em Citroni (1998), Citroni & Basei (1999), Biondi *et al* (1999) e Biondi *et al*. (2001a) e narrada no título de Geologia Regional.

Desde o momento em que foram expostas em superfície (Fig. 9E), as rochas começaram a ser intemperizadas e erodidas. Nessa época (Fig. 9F) deve ter ocorrido a zeolitização supergênica das lavas e tufos que ficaram dentro do lençol freático, como é comum nesse tipo de situação (Maynard 1983, p. 173). Segundo a

“regra de Cornu”, inicialmente, na matriz das rochas, deve ter cristalizado a gismondita, zeólita cálcica e menos hidratada, e em seguida a phillipsita, sódico-cálcica e mais hidratada. Essa transição fez-se com diminuição de volume da rocha, como registrado na figura 8A, e dos teores de CaO e Na₂O (Figs. 8B e C). A denudação causou o rebaixamento da superfície freática, expondo as rochas zeolitizadas, antes situadas dentro do lençol freático, às condições oxidantes da zona sub-saturada, percolada por água meteórica (Fig. 9G). O vidro, as zeólitas e os feldspatos foram hidrolizados e transformados em esmectitas, conforme observado em lâmina delgada e descrito anteriormente. Esse processo fez-se com a lixiviação de todas as substâncias, sobretudo da sílica (Figs. 8B, C e D), e com o aumento de volume da rocha (Fig. 8A), causado pela cristalização das esmectitas (argilas expansivas). A magnetita e o ferro contido no vidro da matriz das rochas vulcânicas foram oxidados e deslocados para as partes porosas das rochas, ressaltando as estruturas de fluxo dos *fiammes* (Figs. 3A, B, C e D).

Agradecimentos Aos revisores da RBG pelas sugestões e críticas ao original.

Tabela 4 - Mudanças de volume (Kv) e transferências químicas (% em peso) ocorridas durante a gênese do minério amarelo de Bateias. A amostra PB-07 foi considerada protominério e foi utilizado o método de Gresens (1967) para o cálculo das transferências químicas. As composições e as descrições dessas amostras constam na Tabela 1.

Amostra	Kv TiO ₂ etc.	XSiO ₂	XAl ₂ O ₃	XFe ₂ O ₃	XMnO	XMgO	XCaO	XNa ₂ O	XK ₂ O	XP ₂ O ₅
PB 04	1.186	-0.760	-0.534	0.627	-0.028	-0.598	-1.113	-1.020	-0.349	-0.039
PB 05	1.089	-4.137	-1.246	-0.232	0.009	-0.338	-1.070	-0.928	-0.495	-0.045
PB 06	1.067	-1.700	-0.400	-0.082	0.018	-0.195	-0.758	-0.052	-0.234	-0.002
PB07A	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
PB 08	0.834	-12.328	-2.454	-0.206	-0.003	-0.460	-0.679	0.261	-0.985	-0.002

Figura 8 - Mudanças ocorridas durante a gênese do minério amarelo de Bateias. (A) Mudanças de volume ocorridos durante a formação dos minérios amarelos, em relação ao protominério PB-07 A (B) Transferência de SiO₂, Al₂O₃ e CaO. (C) Transferências de MgO, Na₂O, K₂O e Fe₂O₃. (D) Transferências de MnO e P₂O₅.

Referências

- Basei M.A.S. & Teixeira W. 1987. Geocronologia do Pré-Cambriano/Eopaleozóico de Santa Catarina. Texto explicativo do mapa geológico de Santa Catarina na escala 1:500.000. DNPM/SCTME(SC), 215p.
- Biondi J.C. & Furtado L.I. 1999. Geologia e gênese dos depósitos de caulim Floresta e Cambui (Form. Campo Alegre, SC) – 1. Faciologia e mineralogia das rochas e do minério. *Rev. Brasil. Geoc.*, **29**:141-150.
- Biondi J.C., Vanzela, G.A., Bartoszeck, M.K. 1999. Processos geoquímicos de gênese de depósitos de argilominerais a partir de rochas vulcânicas da Formação Campo Alegre, SC. *Geoch. Brasiliensis*, **13**:121-143.
- Biondi J.C., Bartoszeck M.K., Vanzela G.A. 2001a. Controles geológicos e geomorfológicos dos depósitos de caulim da Bacia de Campo Alegre (SC). *Rev. Brasil. Geoc.*, **31**:13-20.
- Biondi J.C., Bartoszeck M.K., Vanzela G.A. 2001b. Análise de favorabilidade para depósitos de caulim na Bacia de Campo Alegre (SC). *Rev. Brasil. Geoc.*, **31**:59-66.
- Citroni S.B. 1998. *Bacia de Campo Alegre (SC) – Aspectos petrológicos, estratigráficos e caracterização geotectônica*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 185 p. (anexos e mapa).
- Citroni S.B. & Basei M.A.S. 1999. Estratigrafia e paleogeografia da região de Campo Alegre – SC. In: SBG, Simp. Sobre Vulcanismo e Ambientes Associados, 1º, Gramado, *Boletim de Resumos*, 55.
- Daitx E.C. 1979. Projeto Guaratubinha-Pien. BRASIL.Convênio DNPM/CPRM. Relatório inédito, São Paulo, 184p.
- Ebert H. 1971. O Grupo Guaratubinha no norte do Estado de Santa Catarina. In: SBG, Cong. Brasil. Geol., 25º, São Paulo, *Anais*, 2:153-157.
- Harara, O.M. 1996. *Análise estrutural, petrológica e geocronológica dos litotipos da região de Piên (PR) e adjacências*. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, Tese de Mestrado, 196 p.
- Gresens R.L. 1967. Composition-volume relationships of metassomatism. *Chem. Geol.*, **2**:47-65.
- Machiavelli, A. 1991. *Os granitoides deformados da região de Piên (PR): Um provável arco magmático do Proterozóico Superior*. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, Tese de Mestrado, 89 p.
- Machiavelli A., Basei M.A.S., Siga Jr. O. 1993. Suite granítica Piên (PR): Um provável arco magmático do Proterozóico Superior da microlaça Curitiba. *Geoch. Brasiliensis*, **7**:113-129.
- Maynard J.B. 1983. *Geochemistry of sedimentary ore deposits*. Springer Verlag, New York, 305 p.
- Siga Jr., O. 1995. *Domínios tectônicos do sudeste do Paraná e nordeste de Santa Catarina: Geocronologia e evolução crustal*. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 212 p.
- Silva L.C. 1987. *Textos Básicos de Geologia e Recursos Minerais de Santa Catarina*. Texto do mapa geológico de Santa Catarina na escala 1:500.000. DNPM/SCTME(SC), 215p.
- Vaconcellos E.M.G., Biondi J.C., Vanzela G.A. 1999. Geoquímica das rochas vulcânicas associadas às minas de caulim da bacia de Campo Alegre. SC. *Geoch. Brasiliensis*, **13**:183-197.
- Velde B. 1992. *Introduction to Clay Mineralogy*. Chapman & Hall, London, 198 p.

Manuscrito A-1245
 Recebido em 01 de agosto de 2001
 Revisão dos autores em 10 de julho de 2002
 Revisão aceita em 25 de julho de 2002

Figura 9 - Seqüência de figuras que representam as diversas fases da história geológica ocorrida na região de Campo Alegre, que resultou na gênese do minério esmectítico da mina Bateias. (A) Episódio vulcânico acumula tufos e lavas dacíticos e basálticos na parte norte da Bacia de Campo Alegre. (B) A região transforma-se em um lago de caldeira no qual há deposição de sedimentos clásticos. (C) Novo episódio vulcânico, essencialmente básico, deforma a pilha sedimentar lacustre e aloja diques, "sills" e derrames em meio aos sedimentos. (D) Finda a "fase Campo Alegre", há cerca de 530 Ma, a região é erodida até o início da deposição das rochas do Grupo Itararé, há cerca de 435 Ma. (E) As rochas que preencheram a Bacia do Paraná são erodidas, expondo as rochas da Campo Alegre. Inicia-se, então, o intemperismo dessas rochas. (F) Tufos e lavas são zeolitizados dentro do lençol freático. (G) O rebaixamento da superfície freática expõe as rochas zeolitizadas ao intemperismo, o que causa a argilização. Para detalhes vide texto.