

ALTERAÇÃO HIDROTERMAL A SW DO COMPLEXO GRANÍTICO SÃO SEPÉ – SÃO SEPÉ /RS

Mattos, I.C.¹, Mexias, A. S.², Formoso, M. L. L.**

1 - Curso de Pós-Graduação em Geociências, UFRGS. Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, RS

2 - Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica (CPGq), IG-UFRGS, Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, RS (andre.mexias@ufrgs.br)

ABSTRACT

The Sw portion of the São Sepé Granitic Complex (SSGC) encloses a sequence of chistic from volcanic sedimentary association of Bossoroca Sequence. The texture, framework and paragenesis were changed by thermal metamorphism during the emplacement of the granite. After this event, the peripheral portion of the SSGC and its host rocks were submitted to hydrothermal alteration. A study is presented of the minerals that characterizes this hydrothermal alteration e the thermal metamorphism. The alteration in the granite is phyllic type, located in veinining zone where veins occur as stockworks and are composed by quartz+white mica (phengitic) + locally auriferous pyrite, which are distributed for approximately 1 km. This is the only veinining system whith auriferous mineralization in the granite. The remobilization, concentration and precipitation of gold are directly related to the hydrothermal convective system in the peripheral São Sepé granite with the host rocks as potential auriferous.

RESUMO

O Complexo Granítico São Sepé (CGSS) localiza-se na borda norte do escudo sul-riograndense e a porção SW deste apresenta-se encaixada numa seqüência de xistos de origem vulcanossedimentar pertencentes à Seqüência Bossoroca, cujas texturas e paragéneses foram transformadas pelo metamorfismo térmico durante o posicionamento do granito. Após este evento, a porção periférica a SW do CGSS e as suas encaixantes, foram submetidas à alteração hidrotermal. Foram estudados os principais minerais que caracterizam o metamorfismo térmico e a alteração hidrotermal. Esta alteração é do tipo fílica e concentra-se em zonas filonianas, composta por veios com quartzo+mica branca (fengítica) e ± pirita, localizadamente aurífera, que se distribuem por aproximadamente 1Km, sendo o único sistema filoniano com mineralização aurífera no granito. A remobilização, a concentração e a precipitação do ouro estão diretamente relacionadas a um sistema hidrotermal convectivo no granito São Sepé com as encaixantes, estas potencialmente auríferas.

INTRODUÇÃO

A intrusão do Complexo Granítico São Sepé (CGSS) a sw do município homônimo (Sartori, 1978) gerou uma auréola de metamorfismo de contato nas rochas encaixantes da porção sul, gerando rochas cornubianíticas. A porção norte do granito encontra-se encoberta por rochas sedimentares. As elevadas condições de temperatura desta intrusão originaram um sistema hidrotermal envolvendo o granito e suas encaixantes. Este sistema hidrotermal foi estudado e detalhado na porção SW do granito pelas condições favoráveis de exposição nesta

região. Procurou-se, estabelecer as diferentes fases minerais resultantes da alteração hidrotermal, assim como os mecanismos e condições de geração de fluidos, suas relações com as transformações químicas dos minerais, com intuito do estabelecimento dos eventos hidrotermais formadores da mineralização principalmente aurífera.

ARCABOUÇO GEOLÓGICO

O Complexo Granítico São Sepé (Sartori, 1978), situa-se no extremo norte da porção ocidental do Escudo Sul-Riograndense,

apresenta forma alongada e estende-se para sudoeste da cidade de São Sepé. Ocupa uma área de aproximadamente 50 Km² da porção noroeste da Folha Passo do Salsinho, contornando o Monzogranito Rincão dos Coqueiros, estendendo-se para norte, além dos limites da folha. Fácies de granulação fina, tendendo a microgranitos, ocorrem geralmente junto à borda externa, no contato com as rochas do Cinturão Metavulcano-Sedimentar e das Coberturas Vulcano-Sedimentares, ou ainda, constituindo corpos menores (Figura 1).

O Granito São Sepé, atualmente, apresenta-se exposto devido à erosão da

Formação Rio Bonito que ainda cobre a porção periférica do granito a NW, N e NE. Ao longo da borda E-SE do granito, rochas conglomeráticas da Formação Maricá, pequenas intrusões e derrames de lava da composição andesítico-basáltica pertencentes à Formação Hilário, também registram evidências de metamorfismo de contato provocado pelo posicionamento do magma granítico. Esta intrusão granítica gerou uma auréola de metamorfismo de contato nas rochas do Grupo Porongos a SW-W do batólito, gerando calor e conseqüentemente, provocando uma circulação de fluidos, que originou um sistema hidrotermal, transportador e concentrador de metais, principalmente ouro.

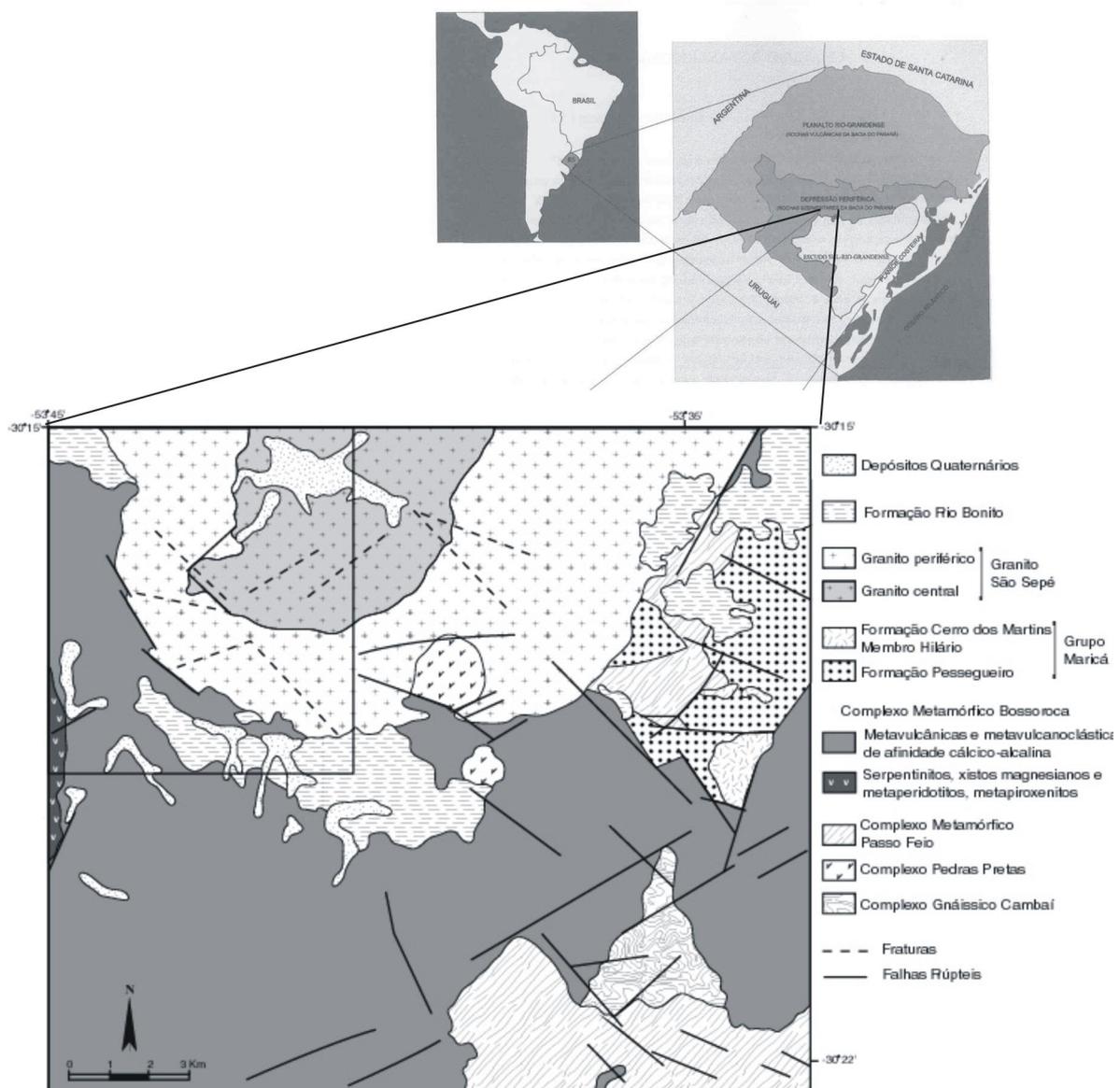


Figura 1 - Mapa de Localização e mapa geológico da porção sudoeste da Folha Passo do Salsinho, incluindo a porção sudoeste do Complexo Granítico São Sepé. A região marcada no canto superior esquerdo representa a área onde foram realizados os estudos de detalhe.

Segundo o relatório CPRM (Porcher *et al.*, 1991), o Granito São Sepé apresenta relações de contato intrusivas com o Monzogranito Rincão dos Coqueiros, com o cinturão Metavulcano-sedimentar, com o Complexo Estratiforme Básico-Ultrabásico Pedras Pretas, com as Coberturas Sedimentares Formação Maricá e Membro Hilário' e está recoberto discordantemente pela Formação Rio Bonito.

CARACTERÍSTICAS DAS ENCAIXANTES - PORÇÃO SW

O grupo Porongos é formado pela Seqüência Bossoroca a qual é representada por uma associação de espessas intercalações de metagrauvaques, metatufos associados, metassedimentos elásticos e químicos, metavulcânicas básicas (metabasaltos e metandesitos) e, subordinadamente, metapelitos e quartzitos. Esta seqüência é limitada a oeste pela Seqüência Campestre através de uma zona de fraturamento de direção N10-20° E. A noroeste e nordeste, estas rochas apresentam uma suave graduação até atingirem a faixa de metamorfismo de contato, que apresenta largura variável de dezenas a centenas de metros. Esta faixa de rochas metamorfizadas, foi gerada pela intrusão do Complexo Granítico São Sepé. São rochas de composição predominantemente básica, com porções pelíticas e quartzo-feldspáticas intercaladas, que apresentam suas estruturas originais preservadas. A Seqüência Bossoroca é definida por uma associação de rochas metassedimentares, piroclásticas metamorfizadas e metabasitos, seqüencialmente intercaladas, e submetidas a metamorfismo de baixo grau, equivalente termicamente, à fácies xisto verde inferior (Hartmann *et al.*, 1982).

COMPLEXO GRANÍTICO SÃO SEPÉ

O Complexo Granítico São Sepé (CGSS) é formado por diferentes fácies: na porção centro-sul por um monzogranito fino; na parte centro-norte, por um granito porfirítico de composição monzonítica e, envolvendo estes, ocorre um granito equigranular com diminuição da granulação em direção às bordas do complexo determinado como sub-alcalino, segundo Sartori (1978). As rochas do CGSS apresentam coloração castanho-avermelhada, granulação

média a grossa, variando desde termos predominantemente equigranulares até termos porfiríticos. Fácies de granulação fina, com tendência a microgranitos, ocorrem junto à borda externa no contato. Ainda na borda externa do CGSS, foram registrados microgranitos e aplitos, em forma de diques e associados a veios de quartzo leitoso, que representam manifestações tardias desse magmatismo. Os veios de quartzo são de espessura centimétrica a milimétrica e aparecem isolados ou em enxames.

As rochas do CGSS variam de monzo a sienogranitos, com feldspato granito subordinados, possuindo teores elevados de SiO₂. São rochas metaluminosas de afinidade alcalina e apresentam uma diversidade textural muito maior que as variações químicas. Evidências sugerem que as fácies do núcleo sejam levemente posteriores ou contemporâneas ao granito: monzogranitos do núcleo apresentam foliação magmática paralela ao contato núcleo/borda; grande diversidade textural próximo a este contato; sienogranitos da borda mostram-se mais homogêneos nas proximidades do contato núcleo/borda e suas variações texturais e composicionais são marcadas pela diminuição gradativa da granulação e pelo desenvolvimento de capas félsicas, relacionadas à borda externa do complexo (Gastal & Nardi, 1995).

Os resultados de análises modais, efetuadas ao longo do granito periférico, classificam a rocha como um ortoclásio granito. A composição deste granito difere dos corpos graníticos centrais do CGSS, basicamente por apresentar maior abundância de feldspatos alcalinos em relação aos plagioclásios (Gastal *et al.*, 1995). As idades de 646 ± 6 Ma, obtidas pelo método Rb-Sr, para as rochas granito-monzoníticas da porção central do complexo granítico, correspondem à fase sin-tectônica do Ciclo Brasileiro. O granito sub-alcalino periférico apresentou 507±7 Ma correlacionável à fase pós-tectônica (Sartori, 1978).

METAMORFISMO DE CONTATO NAS ENCAIXANTES

O posicionamento do Granito São Sepé gerou nas rochas metamórficas de baixo grau, fácies xisto-verde inferior da Seqüência

Bossoroca, uma faixa de cornubianitos, com largura variada de dezenas a centenas de metros. Estas rochas cornubianíticas, apresentam coloração, variando de cinza escura a cinza esverdeada, geralmente com aspecto maciço e textura granoblástica média a grossa. Na faixa de contato com a intrusão, os cornubianitos estão intensamente recortados por veios de quartzo de direções bastante variadas, veios de actinolita subparalelos e secundariamente, veios de epidoto submilimétricos. Em alguns locais, a estrutura sedimentar primária, caracterizada por um bandamento composicional plano-paralelo, constitui uma feição remanescente indicativa da origem parametamórfica do protólito (Figura 2).

PETROGRAFIA

Petrografia das Rochas Afetadas pelo Metamorfismo de Contato

Microscopicamente, as amostras evidenciam entre si diferenças texturais e mineralógicas que refletem variações na composição original e no grau de metamorfismo alcançado nos vários pontos da auréola (Mattos et al., 2004). Com análises petrográficas, foi definida uma zonação metamórfica nas rochas cornubianíticas, dificultada em alguns locais por litologias que não evidenciam os aspectos

petrogenéticos. Assim, em função das rochas encaixantes estarem constituídas por uma alternância de rochas de composições pelíticas e básicas, as condições de metamorfismo da fácies albíta-epidoto hornfels, produziram uma associação metamórfica distinta para cada seqüência. A paragênese das rochas cornubianíticas metapelíticas define uma zonação térmica: na porção externa da auréola apresentarn-se dentro da zona da biotita, passando para a zona da granada e mais localizadamente, zona da estauroлита, correspondente à fácies hornblenda hornfels. Na porção mais interna do contato, para rochas com composições intermediárias, a natureza da assembléia mineral – hornblenda + actinolita + plagioclásio + quartzo (\pm biotita \pm epidoto) – permite situar o grau de metamorfismo dentro do fácies hornblenda hornfels.

Rochas Metapelíticas - São derivadas de rochas xistosas pertencentes ao Grupo Porongos, originadas inicialmente por metamorfismo regional de baixo grau (fácies xisto-verde). A presença de planos com textura granoblástica e biotitas sub-orientadas evidencia bandamento remanescente de natureza sedimentar, sugerindo uma foliação da rocha original. Ocorrem também texturas maculosa e nodulosa, em que porfiroblastos de granada associados a agregados



Figura 2 - Foto de cornubianito apresentando estrutura remanescente da xistosidade dos metassedimentos do Complexo Bossoroca.

micáceos estão imersos numa matriz fina com diminutas lamelas de mica orientadas. Esta textura é, provavelmente, produto de recristalização mimética (Figura 3). Andaluzita ocorre em cristais poiquiloblásticos associados à granada e à biotita. A estaurolita ocorre em cristais diminutos e em formas xenoblásticas, sendo muito rara.

Rochas Metabásicas - As rochas encaixantes básicas são dominantes na auréola de contato e são constituídas por rochas metabásicas de metamorfismo regional de grau baixo (fácies xistos verdes inferior). A trama é isotropa, a textura dominante é porfiroblástica, mas texturas granoblástica e poiquiloblástica também ocorrem, sendo a actinolita o principal porfiroblasto. A paragênese principal inclui clorita + actinolita + albita + quartzo ± epidoto ± biotita. São comuns veios de quartzo, de epidoto e de actinolita milimétricos a centimétricos, sem orientação preferencial, com exceção dos veios de actinolita que se distribuem sub-paralelamente entre si.

Granito Periférico do CGSS

Texturas - O granito de borda apresenta-se texturalmente bastante heterogêneo, destacando-se: (i) cavidades miarolíticas centimétricas até decimétricas preenchidas por feldspato alcalino euédrico, prismas hexagonais de quartzo e, mais raramente, palhetas de muscovita; (ii) segregações micropegmatóides de distribuição aleatória e compostas por quartzo e K-feldspato de até 4 cm de comprimento; (iii) veios de quartzo leitoso com espessuras que variam de milimétricas até 1 metro, em fraturas de direções variadas; e (iv) texturas granofíricas, além de tuffisitos e grande variedade de tipos micrograníticos e de aplitos.

Composição Mineralógica - Ortoclásio subédrico a anédrico, que contém inclusões de outros minerais compõe cerca de 40% do volume da rocha. Alguns cristais de ortoclásio desenvolvem intercrescimento gráfico com o quartzo, o que sugere uma cristalização simultânea. O quartzo, em torno de 36%, mostra feições anédricas e intersticiais, com tamanho entre 2 e 5 mm. Extinção ondulante e fissuras

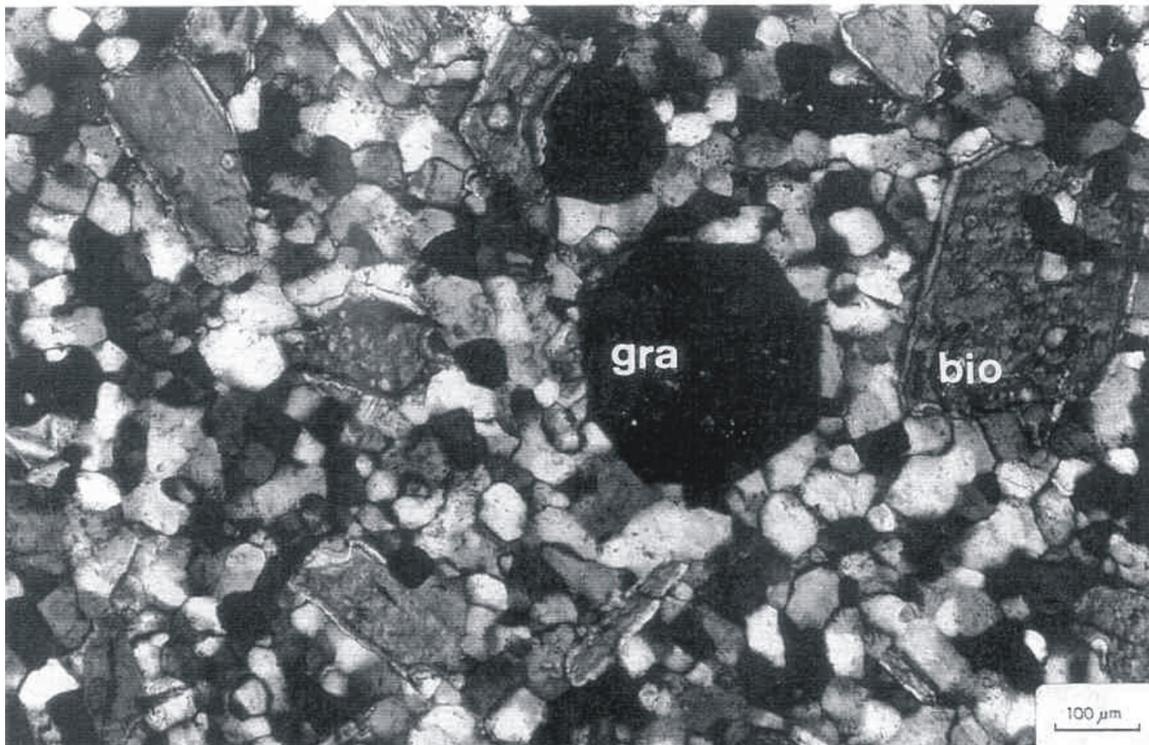


Figura 3 - Fotomicrografia de biotitas orientadas marcando a xistosidade do metamorfismo regional e veio de quartzo cortando o cornubianito, gerando cloritização das biotitas. bio=Biotitas gra=Granadas. Luz Natural.

são freqüentes, assim como inclusões de outros minerais próximos às bordas. Os plagioclásios, constituindo cerca de 20% do volume na rocha, são mais restritos e subédricos, de tamanho entre 1 e 3,5 mm. Quando em contato com o quartzo, apresentam os bordos irregulares. A biotita ocorre em pequena quantidade, entre 2 e 3% e raramente suas palhetas ultrapassam 1mm de comprimento. A alteração de algumas lamelas de biotita para clorita está evidenciada por pleocroísmo com tons de verde até azul anômalo. Ocorrem como minerais acessórios titanita, fluorita, zircão, apatita e muscovita, esta última geralmente associada à clorita.

Cornubianitos

Devido à alta taxa de aquecimento e ausência de deformação, os cornubianitos apresentam textura granoblástica.

Metapelíticos - Essas rochas mostram uma foliação remanescente que é evidenciada, ao microscópio, por palheta de biotita orientada. Apresentam textura porfiroblástica, com fenoblastos de granada imersos numa matriz granoblástica poligonal fina de composição quartzo-feldspática. O **quartzo** geralmente é microcristalino mostrando grãos com contornos poligonais e tamanhos entre 0,1 e 0,3 mm. Representa 18 a 40% do volume da rocha. Ocorre freqüentemente formando veios com espessuras e direções variadas. A **biotita** é comum, aparecendo em cristais xenoblásticos a subidioblásticos, podendo ocorrer como porfiroblastos suborientados de contato irregular. O tamanho varia de 0,2 a 3,0 mm. As características da biotita definem duas gerações: (1) biotita precoce, do metamorfismo regional, com formas esqueléticas, bem como palhetas de biotita e muscovita subparalelas, desenham a xistosidade remanescente da rocha e (2) biotita tardia, gerada pelo metamorfismo de contato, sem orientação preferencial, com bordos corroídos, estando alterada ou intercrescida com mica branca de hábito fibrorradial. A **granada** é comumente fraturada, sendo as fraturas preenchidas por biotita, ou mostra-se envolta por lamelas de mica branca e clorita. O **plagioclásio**, em alguns locais, possui inclusões poiquilíticas de minerais opacos e finas lamelas de mica. A **andaluzita** é poiquiloblástica, com inclusões de

granada, biotita cloritizada, biotita com mica branca e finas lamelas de mica branca com bordos corroídos. A alteração hidrotermal é marcada por uma intensa formação de finíssimas lamelas de mica branca sobre os cristais de andaluzita (Figura 4). A **clorita** ocorre mais freqüente como resultado da alteração hidrotermal na biotita, principalmente próximo às vênulas de quartzo. A **mica branca** é bastante comum na matriz dessas rochas, ocorrendo como finíssimas lamelas subidioblásticas que apresentam disposição ligeiramente orientada, proveniente da substituição de fenocristais de biotita. É comum, também, como produto da alteração hidrotermal de diversos minerais. O **epidoto** é raro, ocorre em contato com a clorita ou incluso na biotita. O epidoto ocorre também preenchendo microfaturas, na forma de finos prismas bem cristalizados.

Os principais óxidos e sulfetos identificados foram: (i) magnetita, cristalizada a partir da desestabilização da biotita, apresentando muitas inclusões e algumas exsoluções de hematita; (ii) ilmenita associada à actinolita, ocorrendo em proporções menores que as de magnetita e (iii) pirita com bordos e superfície corroídas, aparecendo em menor proporção que a ilmenita. Leucoxênio, com uma película amarela é produto de alteração da ilmenita. Os cornubianitos metapelíticos apresentam alguns grãos de pirita com inclusões de mica branca. Também foi identificada a presença de pirrotita. Como acessórios comuns, ocorrem minerais opacos e apatita. Aparece de modo bastante raro, turmalina idioblástica em cristais muito pequenos.

Metabásicos - A trama é isótropa e a textura principal é porfiroblástica, mas texturas granoblástica e poiquiloblástica podem ser observadas. O **plagioclásio** ocorre em cristais subidioblásticos a idioblásticos com contatos irregulares e mostra modesta alteração para mica branca. Actinolita ocorre como porfiroblasto dominante. Outra forma de ocorrência de actinolita é com hábito acicular, formando agregados fibrorradiados ou dispersos na matriz em tamanhos e direções variados. Está também intercrescida com minerais opacos, constituindo uma textura granoblástica (Figura 5). Aparece ainda, preenchendo fraturas de forma concentrada e como cristais bem desenvolvidos

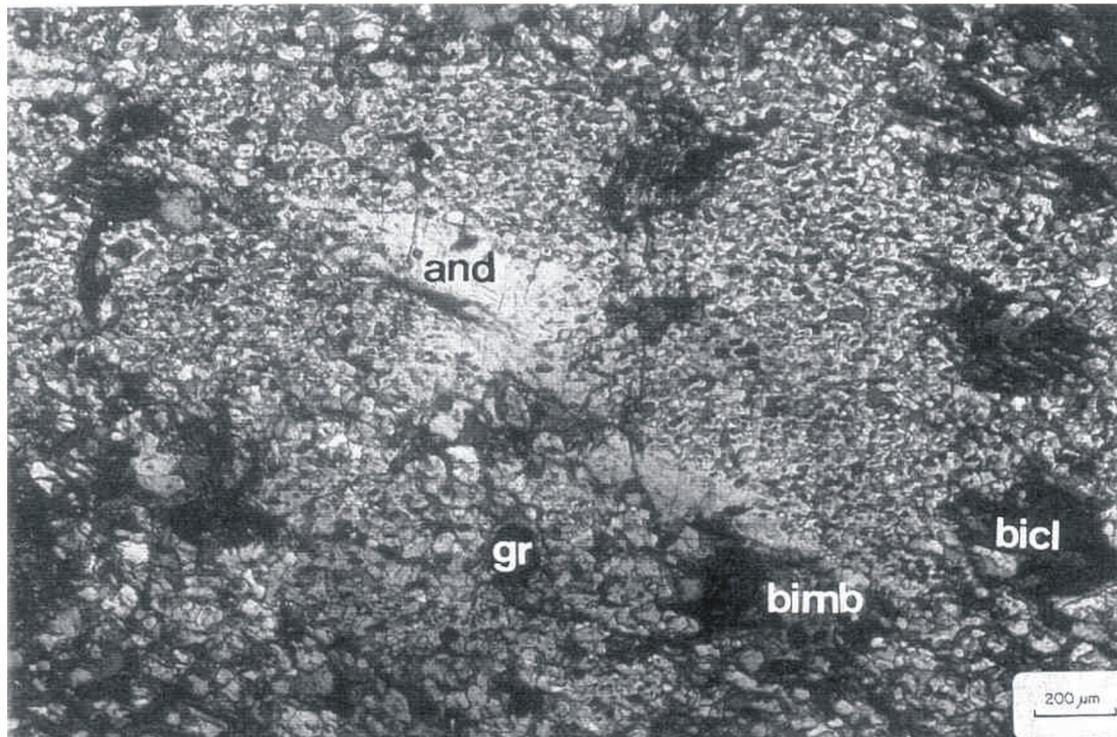


Figura 4 - Fotomicrografia de andaluzita com inclusões de granada, biotita cloritizada, biotita com mica branca e finas lamelas de mica branca com bordos “corroídos”. and = andaluzita, bicl = biotita cloritizada, bimb = biotita alterada para mica branca, gr = granada. Luz Polarizada.

(de 0,5 a 1,5 cm). A **biotita** é relativamente rara. Quando associada à actinolita, apresenta-se cloritizada e com inclusões de minerais opacos. A **clorita** surge como produto de alteração da biotita, substituindo-a pseudomorficamente. A clorita ocorre também alterada para mica branca, quartzo e minerais opacos. Ela ainda pode ocorrer em veios ou dispersa na matriz, associada à actinolita e ao quartzo. A **mica branca** é produto de alteração do plagioclásio, na forma de massas lamelares ou como finas lamelas disseminadas. Os **minerais opacos** desenvolvem cristais xenoblásticos ou, mais raramente, idioblásticos, associados à biotita, clorita e actinolita ou inclusos nestes minerais em formas e tamanhos variados. É comum a ocorrência de minerais opacos com bordos corroídos no contato veio-rocha, limitando os veios de actinolita com quartzo. Mais rara é a ocorrência da substituição de pirita pela ilmenita.

A ALTERAÇÃO HIDROTERMAL

A alteração hidrotermal associada ao Granito Periférico é do tipo fílica (mica branca-ililita/fengita + pirita), e gerou uma intensa silicificação, a qual se manifesta principalmente em veios compostos por quartzo, mica branca e

pirita. Esses veios apresentam espessuras e direções variadas; alguns são descontínuos e irregulares (Figura 6). Ocorrem também, veios milimétricos subparalelos entre si, compostos basicamente por mica branca. Logo após a silicificação do granito periférico, ocorrem dissolução dos cristais de quartzo e alteração do feldspato alcalino para mica branca. À medida que aumenta a distância em relação aos veios, passa a ocorrer substituição seletiva (grão a grão), podendo gerar textura granofílica que será detalhada abaixo.

O quartzo é o mineral dominante, apresenta feições de dissolução, em cristais anédricos, com contatos lobados irregulares, tamanho (25 a 0,5 mm) e forma extremamente variados. São distinguidas cinco gerações: (i) grãos que envolvem cristais de K-feldspato, plagioclásio e biotita, comuns em veios de espessuras bastante variadas, de 1 a 10 cm, até submilimétrica, que cortam a rocha e substituem o quartzo original; (ii) intercrescimentos gráficos com o feldspato alcalino, em que os contatos são retos e lobados; (iii) inclusões euédricas no plagioclásio ou no K-feldspato, ou mais raramente, na biotita; (iv) cristais interdigitados com mica branca submilimétrica marcando as



Figura 5 - Fotomicrografia de actinolita na matriz dos cornubianitos metabásicos interescrida com opacos. act =actinolita. Luz Polarizada.

bordas dos veios de quartzo e (v) quartzo criptocristalino em veios de mica branca (Figura 7).

O K-feldspato apresenta-se totalmente desestabilizado; a maioria dos cristais apresenta substituição por mica branca na fase potássica

das pertitas, no núcleo ou em todo o mineral. Quanto mais próximo aos veios de quartzo, mais intensa é a substituição para mica. Ocorrem inclusões de quartzo, de feldspato ou de plagioclásio. Os contatos são serrilhados e o tamanho médio dos K-feldspatos varia entre 2,5 e 5,0 mm.



Figura 6 - Foto de veios de quartzo do tipo "stockwork" em prospecto aurífero desativado.



Figura 7 - Fotomicrografia de quartzo criptocristalino reinfiltando veios de mica branca. QzCp = Quartzo Criptocristalino e Mb = mica branca. Luz Polarizada.

O plagioclásio (albita) apresenta maclas total ou parcialmente substituídas por finas lamelas ou por “pintas” de mica branca, principalmente no núcleo desestabilizado, preservando os bordos inalterados. Ocorre em proporção e tamanho menor que o K-feldspato (em torno de 1 e 2 mm) e sempre associado a este mineral, apresenta contatos serrilhados. Cristais fraturados e preenchidos por mica branca são comuns.

A mica branca ocorre desde submilimétrica até como “pintas” de alguns centímetros, ou menos frequentemente na forma de lamelas. Ocorre sempre associada a veios de quartzo e como produto de alteração do feldspato. Apresenta-se em três feições relacionadas às distâncias dos veios de quartzo: (i) próxima ao veio, aparece em lamelas finamente cristalizadas com quartzo em vênulos subparalelos ou “stockwork” (Figura 8); quando o veio corta cristais de K-feldspato, a mica branca ocorre fibro-radiada, preenche fraturas submilimétricas em forma de redes ou contornando as bordas dos sulfetos; em alguns locais, a mica branca apresenta-se como uma “massa” de argilominerais amarelo-esverdeada; (ii) um pouco mais distante do veio (± 15 mm), a mica branca substitui o K-feldspato e o plagioclásio e

também como uma pseudomorfose das biotitas; restando assim, apenas o contorno dos cristais; (iii) mais distante dos veios, a alteração ocorre por substituição seletiva, ou seja, a mica branca aparece finamente cristalizada nas porções potássicas dos intercrescimentos perfiticos e nas maclas da albita intercrescida com biotita cloritizada.

A clorita ocorre como produto de alteração da biotita. Isto se dá ao longo dos seus planos de clivagem (a partir da substituição da biotita para mica branca, ocorre a formação de quartzo, ilmenita e titanita) (Figura 9). Finas palhetas de clorita encontram-se misturadas com mica branca e com alguns sulfetos. Aparecem também, localizadamente, em microveios mais tardios, reinfiltando as vênulas de mica branca. Nesse caso, estão associadas à alteração fílica que se superpõe ao estágio de cloritização da biotita e é evidenciada pela seguinte paragénese: mica branca em lamelas bem desenvolvidas em meio a “restos” de clorita; cristais milimétricos subédricos de quartzo; ilmenita e titanita oxidadas e, não muito frequente, fluorita incolor ou roxa. A biotita sem alteração é rara e quando preservada, mostra-se anédrica com tamanhos entre 0,7 a 2 mm e coloração marrom avermelhada.

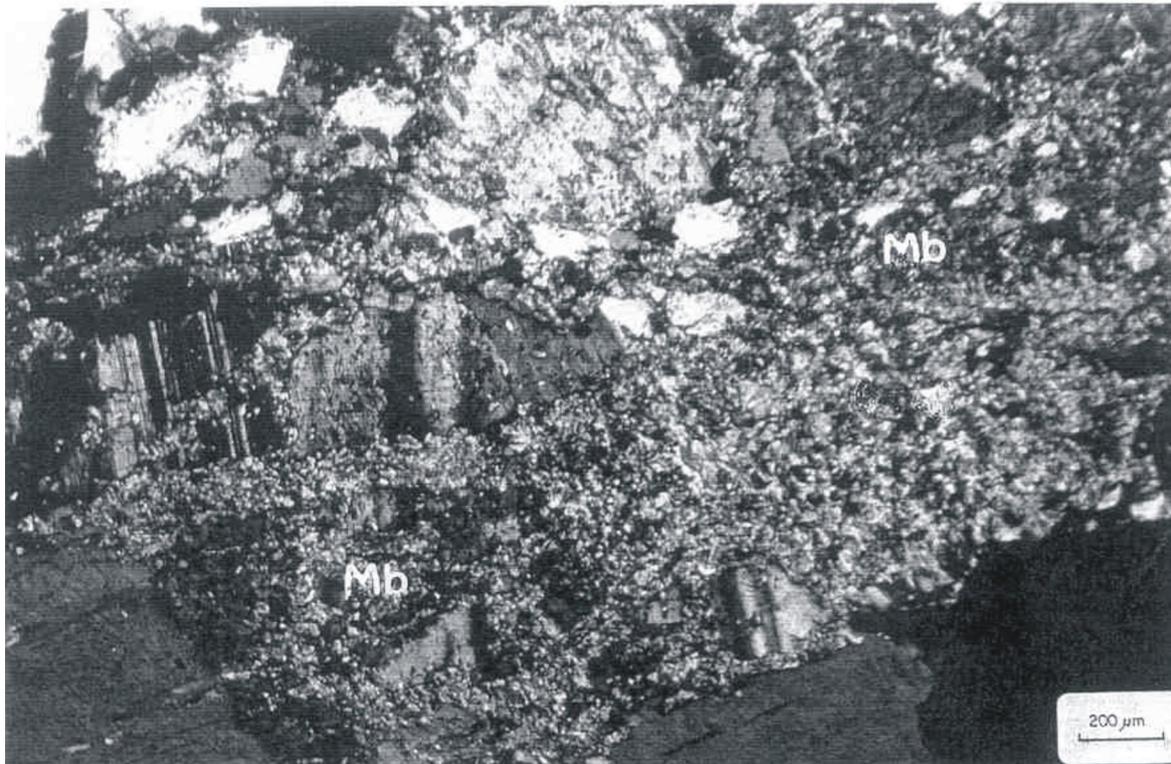


Figura 8 - Fotomicrografia de veios de mica branca finamente cristalizada distribuídos como "stockwork". mb = mica branca. Luz Polarizada.

A pirita ocorre em grãos de tamanho e forma variados, apresentando manchas alaranjadas geradas por oxidação. Alguns mostram os bordos bastante corroídos, outros, o

núcleo. Os cristais de menor tamanho ocorrem em veios de quartzo com mica branca. Veios irregulares formados por pirita fraturada ocorrem raramente e são posteriores à cristalização da

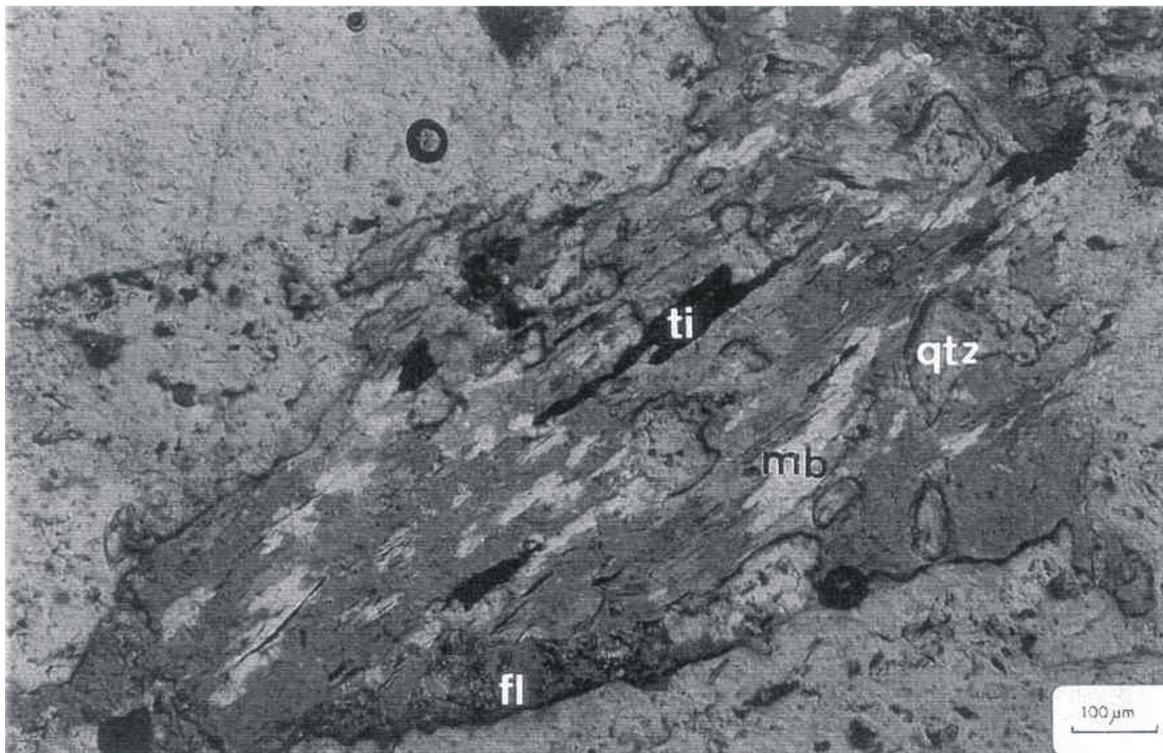


Figura 9 - Fotomicrografia de biotita cloritizada substituída por mica branca gerando: mica branca + quartzo + titanita + fluorita. mb = mica branca, qtz = quartzo, ti = titanita, fl fluorita. Luz Natural.

pirita euédrica (Figura 10). Em algumas amostras os grãos de pirita são bem desenvolvidos, com tamanho médio de 5 mm, apresentando micro-inclusões.

QUÍMICA MINERAL

Rochas Cornubianíticas

Minerais Metamórficos – As análises foram realizadas no Laboratório de Microsonda Eletrônica do Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica (CPGq), do Instituto de Geociências da UFRGS. O equipamento utilizado foi uma Microsonda Eletrônica CAMECA modelo SX 50.

A **andaluzita** mostra teores médios de 37% de SiO_2 e 62% de Al_2O_3 nos cornubianitos, caracterizando um protólito de composição pelítica. A alteração hidrotermal sobre este mineral é marcada pela cristalização de finíssimas lamelas de mica branca nas porções mais internas do cristal. A **estaurolita** também apresenta composição rica em Si^{4+} e Al^{3+} , além de Fe^{2+} .

O diagrama de Al^{VI} versus $\text{Mg}/\text{Mg}+\text{Fe}^{2+}$ apresenta a variação composicional da **biotita** dos cornubianitos em relação à **biotita** dos granitos. A **biotita** dos primeiros tende a termos mais flogopíticos (Figura 11) e apresenta teores de Fe^{2+} e Ti^{4+} inferiores, e teores de Al^{total} e Mg^{2+} mais altos, quando comparadas às biotitas do granito. Tanto o teor de Fe^{2+} baixo, quanto o Al^{total} elevado, podem estar relacionados com a composição **pelítica** da rocha original. Os cristais

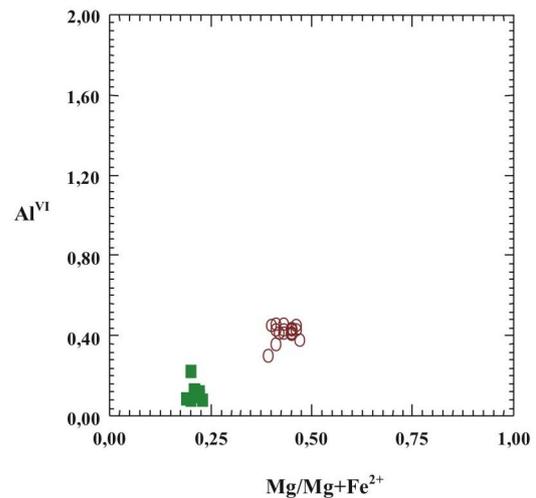


Figura 11 - Diagrama Al^{VI} e $\text{Mg}/\text{Mg}+\text{Fe}^{2+}$ de classificação de biotitas do granito (■) e do cornubianito (O)

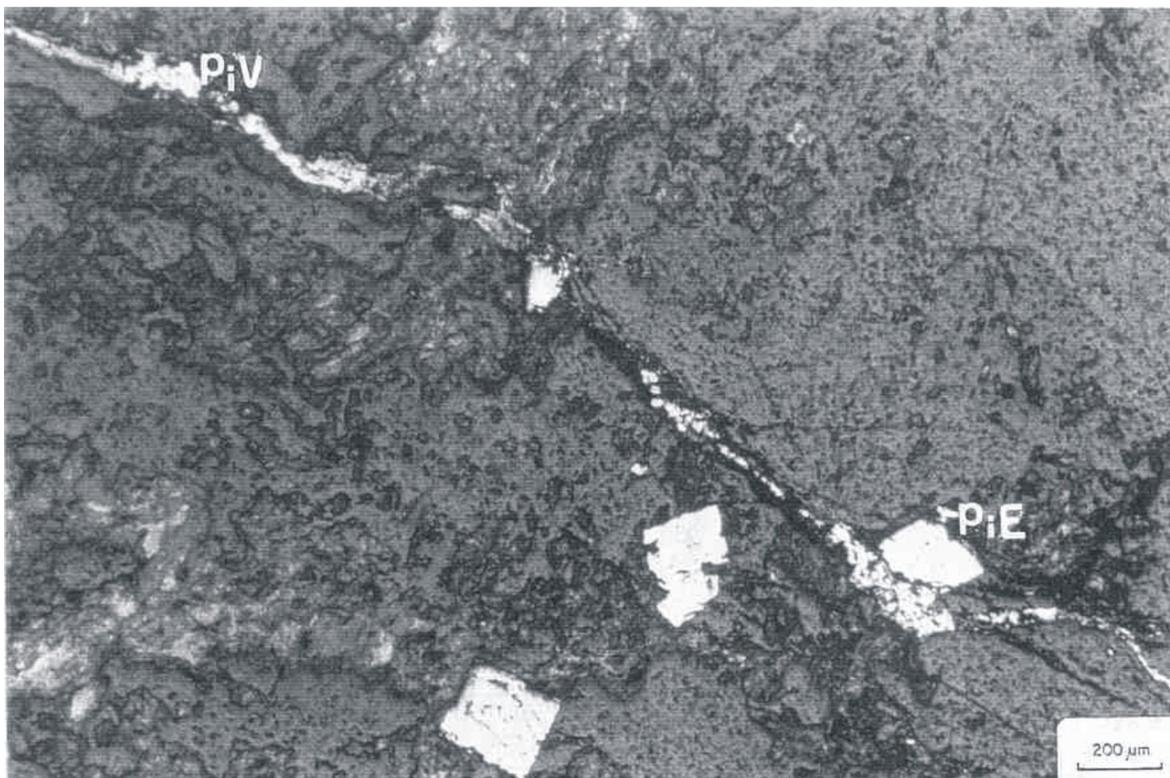


Figura 10 - Fotomicrografia de veio de pirita quebrando cristais de pirita cúbica anteriormente formada PiE = Pirita Euédrica e PiV = Pirita em Veio. Luz Refletida.

de **Granada** apresentam variações nos teores de Fe^{2+} , Mg^{2+} e Mn^{2+} .

Minerais Hidrotermais - O estudo da química mineral foi realizado também sobre os minerais que caracterizam a alteração hidrotermal a partir do metamorfismo térmico. Os dados geoquímicos permitiram mostrar que a clorita associada com as rochas básicas é distinta daquela associada com as rochas pelíticas, a primeira possuindo teores mais elevados de Mg^{2+} e Fe^{2+} , maiores razões Mg^{2+}/Fe^{2+} e teores mais baixos de Al_{total} (Figura 12), certamente refletindo as diferentes composições das rochas. A clorita nos cornubianitos formou-se a partir da alteração de biotita.

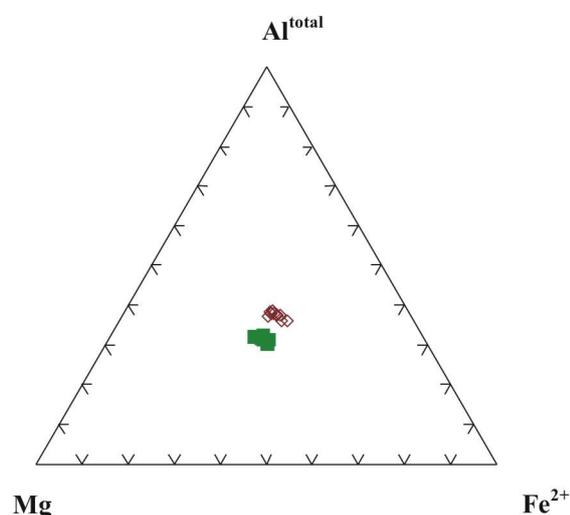


Figura 12 - Diagrama ternário com a variação dos teores de Al, Mg e Fe^{2+} para as cloritas do cornubianito de origem metapelítica (◇) e de origem metabásica (■). Os índices são da fórmula estrutural na base de 11 Oxigênios.

Os dados relativos à **mica branca** concentram-se ao longo da linha muscovita-celadonita, revelando uma composição fengítica e formação a temperaturas mais altas. Quando localadas no diagrama triangular de Velde (1985) juntamente com as micas brancas do granito, mostram pequena dispersão, indicativa de que estejam relacionadas ao mesmo evento hidrotermal (Figura 13). A fengita das rochas cornubianíticas apresenta composições bastante homogêneas, com pequenas variações representadas nas fórmulas estruturais:

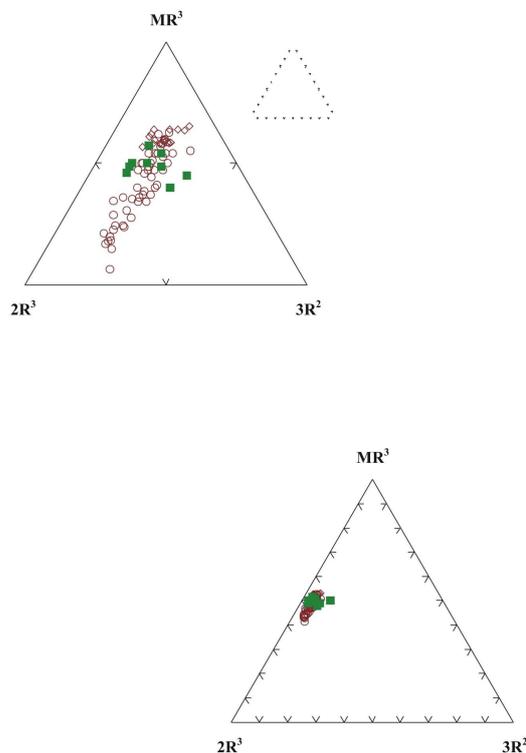
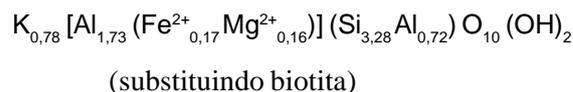
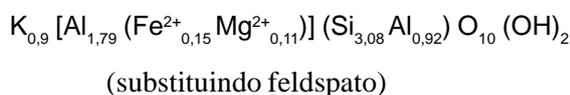


Figura 13 - Micas brancas fengíticas formadas no granito (O e ◇) e no cornubianito (■) representadas no diagrama Ternário de Velde (1985).

Caracterização dos Processos Hidrotermais - A cloritização das biotitas ocorreu de forma prevasiva seletiva, onde a forma da biotita é preservada, variando apenas a tonalidade da cor. Em alguns casos, mais distante dos veios, essa reação foi identificada devido à composição química dos minerais, uma vez que petrograficamente as palhetas de biotita não mostram evidentes sinais de alteração. As análises revelam, num mesmo cristal, uma transição na composição da biotita para clorita, em que se identificam biotita com teores elevados de Fe^{2+} e clorita com quantidades anômalas de K^+ e Ti^{4+} .

A mica branca dos cornubianitos também está relacionada à fase hidrotermal devido à sua associação com os veios de quartzo. Próximo a esses veios, a mica branca, finamente cristalizada, distribui-se sobre a matriz dos cornubianitos metapelíticos, preferencialmente sobre microcristais de feldspato e sobre porfiroblastos de biotita. Em alguns pontos, junto a cristais de granada, a biotita ocorre

intercrescida com a mica branca, que apresenta hábito fibro-radiado. Nesta fase hidrotermal, é comum a alteração para mica branca de alguns minerais cuja identificação petrográfica torna-se imprecisa, devido ao avançado grau de substituição, porém, com análises de microsonda, foi possível classificá-los como oligoclásio-andesina. Ocorrem ainda finíssimas lamelas de mica branca sobre cristaloblastos de andaluzita.

O epidoto ocorre como inclusão em lamelas de biotita alterada e apresenta composição de clinzoisita, conforme Deer et al. (1966). O epidoto ocorre também, preenchendo microfraturas, e juntamente com a clorita, caracterizam um processo de alteração propilítica, baixa relação fluido/rocha, nos cornubianitos.

Granito Periférico

Minerais Hidrotermais - Os principais minerais analisados por microsonda, associados ao evento hidrotermal no granito, foram mica branca, clorita e biotita cloritizada.

Micas Brancas - A principal variação, apesar de ser sutil, está refletida no diferente modo de ocorrência da mica branca. Aquelas que substituem a clorita são enriquecidas em Mg^{2+} e Al^{3+} , algumas sendo levemente mais empobrecidas em K^+ . As micas brancas próximas ao feldspato potássico e as de hábito lamelar e fibro-radiado, são enriquecidas em K^+ . As que estão em veios de quartzo são levemente enriquecidas em Al^{3+} e K^+ .

A mica branca, classificada também no diagrama de Velde, é fengítica (Figura 14); porém, quando intercrescida com clorita no estágio de alteração fílica, apresenta-se mais rica em $R^3(Al^{3+})$ e empobrecida em $R^2(Fe^{2+}$ e $Mg^{2+})$ e K^+ interlamelar. A fengita que substituiu o K-feldspato mostra-se mais enriquecida em $MR^3(K^+)$; a que ocorre em veios, apresenta o maior número de valores próximo ao pólo MR^3 , sendo que alguns dados aproximam-se de R^3 . As principais variações químicas da fengita refletem os minerais que foram substituídos e podem ser observadas pelas fórmulas estruturais médias:

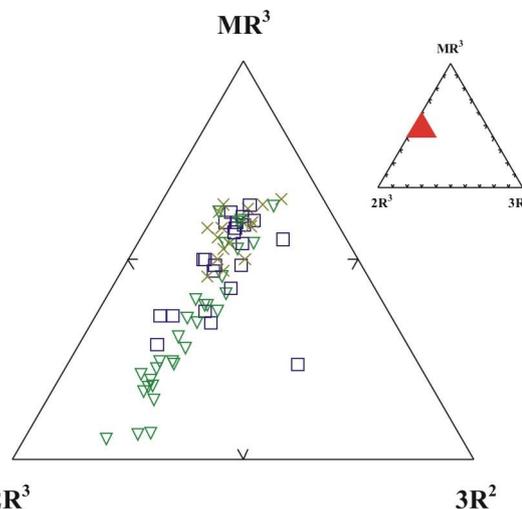
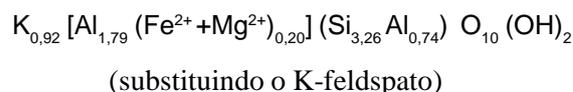
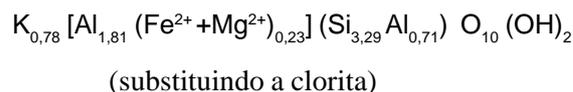


Figura 14 - Micas brancas fengíticas formadas no granito com diferentes origens: substituindo cloritas (\blacktriangledown), em lamelas com K-feldspato (X) e em veios (O). Diagrama Ternário de Velde (1985).

Cloritas - Utilizando a classificação proposta por Foster (1962), as cloritas, na sua grande maioria, caem no campo da chamosita. Os dados analíticos, quando observados com mais detalhe, apresentam uma tendência na composição de acordo com os minerais associados (mica branca, biotita, feldspatos). Ou seja: (i) clorita intercrescida com feldspato apresenta um empobrecimento em Fe^{2+} , além de uma certa contaminação de K^+ na sua composição; (ii) clorita substituída por mica branca, apresenta as mesmas quantidades de Si^{4+} e Al^{total} , porém mostra menor teor de Mg^{2+} e maior de Fe^{2+} , quando comparada à (iii) clorita que substituiu a biotita. (Figura 15).

Os dados analíticos mostram que o aumento de Fe^{2+} na clorita não afetou a quantidade de Al^{IV} , apenas substituiu, além do Mg^{2+} , o Al^{VI} , sugerindo não ter influência direta na composição tetraédrica dos cristais (Figura 16). Observa-se também um aumento de Al^{total} com Fe^{2+} que substituiu principalmente o Al^{VI} , enquanto o aumento de Al^{IV} independe desta relação.

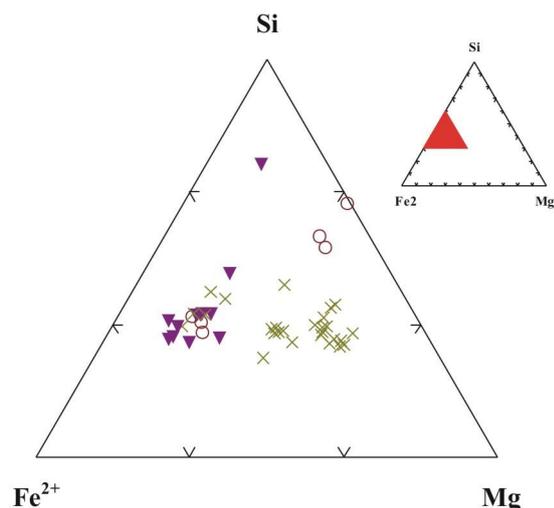


Figura 15 - Diagrama ternário com a variação composicional de Si/Fe²⁺/Mg para cloritas do granito substituindo K-feldspato (O), biotita (X) e sendo substituídas por mica branca (▼).

Biotitas - A composição química da biotita primária mostra uma variação entre o conteúdo de Fe²⁺ e Al^{VI} que ocorre, de modo proporcional e pode indicar uma correlação de substituição entre os íons do octaedro (Al^{VI}). O teor de Ti⁴⁺, relativamente elevado, indica que esta biotita tem uma origem magmática e, portanto, de alta temperatura (Bailey, 1984). A variação entre teores de Al^{VI} e Mg/(Mg+Fe²⁺), mostra que a biotita do granito tende a termos aníticos (Figura 11).

Caracterização dos Processos Hidrotermais

A composição da mica branca caracterizada como fengita, depende da sua forma de ocorrência. Quando ela ocorre intercrescida com clorita, é comum apresentar um enriquecimento em Fe²⁺ e Mg²⁺ e um empobrecimento em K⁺, como descrito anteriormente. A mica branca lamelar ou fibrorradia que está associada ao K-feldspato é mais rica em Al³⁺ e K⁺ e empobrecida em Fe²⁺. Dentro da série muscovita-celadonita as substituições Si^{IV}+(R²⁺) <=> Al^{IV}+Al^{VI} são chamadas de substituições fengíticas (Velde, 1985). Na figura 15 estão locados os dados geoquímicos da fengita no sistema MR³ - 2R³ - 3R². A que coexiste com a clorita na alteração fílica, tende ao pólo da pirofilita por apresentar maior vacância interlamelar (menos K⁺).

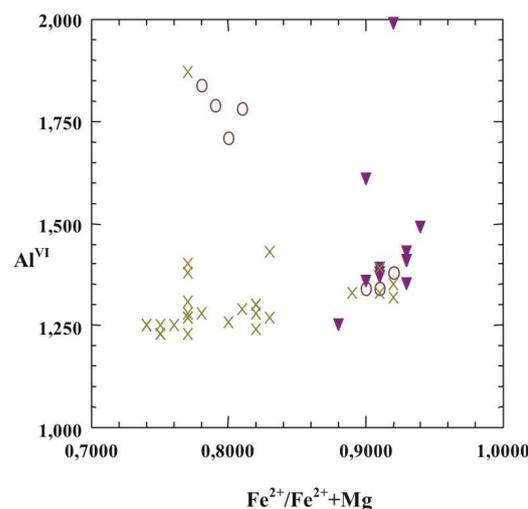


Figura 16 - Diagrama com a variação composicional de Al^{VI} e Fe²⁺/Fe²⁺+Mg para as cloritas do granito substituindo K-feldspato (O), biotita (X) e sendo substituídas por mica branca (▼).

DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Cornubianitos Metabásicos e Metapelíticos

As soluções que percolaram essas rochas durante o evento hidrotermal estão materializadas nos veios e esses apresentam composições associadas à química dos minerais formadores das rochas metamórficas.

Os cornubianitos metapelíticos são cortados por um grande número de veios de quartzo, milimétricos a subcentimétricos. A interação mineral-fluido hidrotermal gera as seguintes reações: (i) cloritização da biotita próximo a estes veios; (ii) formação de mica branca em alguns cristais de biotita e sobre andaluzita (iii) formação de mica branca nos microcristais de feldspato da matriz. Nos **cornubianitos de composição básica**, os veios são compostos por actinolita bem desenvolvida. São, via de regra, de espessura variada e mostram-se cortados por veios de epidoto submilimétricos. Nos cornubianitos de composição metabásica, a substituição de pirita pela ilmenita, apesar de rara (FeS₂ => FeTiO₃) pode significar um aumento da fugacidade de oxigênio (fO₂) dos fluidos. Nessa reação, o Ti⁴⁺ da ilmenita pode ter sido proveniente da reação da cloritização da biotita. Os processos de oxidação são muito importantes na evolução de um sistema hidrotermal, pois a elevação da fugacidade de oxigênio pode levar à precipitação

do Au transportado na forma de complexos sulfetados.

Granito Periférico

O granito de borda do CGSS apresenta, na sua grande maioria, clorita como produto da alteração da biotita relacionada a um evento pós-magmático com elevação da temperatura após a cristalização da biotita. Os cristais de clorita analisados foram primeiramente classificados segundo critérios petrográficos: clorita em veios, clorita alterada para mica branca (intercrescida), clorita substituindo biotita e clorita intercrescida em feldspatos. Essa diversidade de ocorrência pode explicar a relação de disponibilidade dos elementos, como: teor de Mg^{2+} é mais elevado na clorita associada à biotita em relação à clorita próxima à mica branca ou ao feldspato.

Nos cristais de biotita cloritizada com intensa alteração para mica branca, ocorre a cristalização de fluorita próximo à titanita, ilmenita e quartzo. A formação de minerais opacos relaciona-se ao processo de alteração da biotita para clorita e desta para mica branca, em que ocorre a expulsão do Ti^{4+} da estrutura da biotita ao alterar-se para clorita e do Fe^{2+} da estrutura da clorita, ao alterar-se para mica branca, formando titanita, ilmenita ($FeTiO_3$) e magnetita. A ilmenita foi gerada pela alteração da titanita e ocorre sobre os cristais de mica branca. Esta ocorrência deve-se, provavelmente, à baixa mobilidade do Ti^{4+} durante as reações hidrotermais na interação fluido-rocha.

A maioria dos cristais de pirita apresenta fraturas, aspectos de corrosão e inclusões de mica branca no seu interior, além de veios tardios de pirita cortando cristais de pirita euédrica. Estas observações evidenciam um segundo estágio de percolação de fluidos após a cristalização de pirita precoce, dentro da fase de alteração fílica.

As fraturas nos cristais de pirita precoce podem ter contribuído para a remobilização de Au (abrindo a estrutura dos sulfetos e reconcentrando Au) em alguns cristais, principalmente, se as condições físico-químicas tiverem sido favoráveis: pH ácido, fO_2 alta e temperaturas em decréscimo, em complexos sulfetados (Hemley & Hunt, 1992).

A partir da análise petrográfica, foi possível estabelecer um zoneamento para a alteração hidrotermal e defini-la como sendo do tipo fílica, representada pela ocorrência de veios contendo quartzo + fengita ± pirita, sobreposta a uma alteração propilítica, responsável pela cloritização da biotita magmática, semelhante ao que ocorre nos processos de alteração em Cu-pórfiros (Titley, 1982)

A alteração hidrotermal a SW do CGSS concentra-se, basicamente, em zonas filonianas, sendo a alteração fílica predominante e representada por veios distribuídos como *stockwork* e formados por quartzo, mica branca (fengítica) e pirita.

As análises químicas de minerais do granito periférico revelam alteração da biotita magmática para clorita, que pode estar associada à fase pós magmática ou propilítica. Posteriormente a esta fase, ocorre a alteração da biotita cloritizada para mica branca, fase que caracteriza a alteração hidrotermal.

A ausência de CO_2 indica que os fluidos podem ter origem em níveis crustais rasos ou que tenham sofrido contaminação por águas subterrâneas, caracterizando um sistema hidrotermal convectivo. A remobilização, a concentração e a precipitação do ouro estão diretamente relacionadas ao sistema hidrotermal convectivo no granito São Sepé com as encaixantes, por estas serem potencialmente auríferas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAILEY, S.W. 1984. Micas. Reviews in Mineralogy. *Mineralogical Society of America*, v.13, 584 p.
- DEER, A.W.; HOWIE, A. W. & ZUSSMAN, J. 1966. Minerais Constituintes das Rochas - uma Introdução. *Fundação Calouste Gulbenkian*, Lisboa. 556p.
- FORSTER, M. D. 1962. Interpretation of the composition and a classification of the chlorites. *Geological Survey Professional Paper*, 414-A.

- GASTAL, M.C.P. & NARDI, L.V.S. 1995A. A diversidade dos processos de diferenciação nos sistemas magmáticos alta sílica: Granito Jaguari e Complexo Granítico São Sepé, RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 5 / CONGRESSO DE GEOQUÍMICA DOS PAÍSES DE LINGUA PORTUGUESA, 3. Niterói, 1995. Niterói, SBG.
- GASTAL, M.C.P.; NARDI, L.V.S. & LAFON, J.M. 1995B. Classificação dos granitóides pertencentes à Suite Intrusiva Saibro (SIS), RS. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 6 / ENCONTRO DE GEOLOGIA DO CONE SUL, 1. Porto Alegre, 1995. Atas... Porto Alegre, SBG. p. 72-76.
- GRESENS, R.L. 1967. Composition-volume relationship of metasomatism. *Chemical Geology*, 2:47-65.
- HEMLEY J.J. & HUNT, J.P. 1992. Hydrothermal ore-forming processes in the light of studies in rock-buffered systems: II Some general geologic applications. *Economic Geology*, 87: 23-43.
- HENLEY R.W. & TRUESDELL, A.H.; BARTON Jr.,P.B. & WHITNEY, J.A. 1984. Fluid-Mineral Equilibria in Hydrothermal Systems. *Reviews in Economic Geology*, Vol. 1. Soc. of Economic Geologists, El Paso, Texas, U.S.A. 267p.
- KOLLING, S. L. & FELDMANN, E. 1988. Geologia da Área Passo da Juliana Relatório Interno da Companhia Brasileira do Cobre (inédito).
- MATTOS, I. C. 1997. Estudo da Alteração Hidrotermal na Porção Sudoeste do Complexo Granítico São Sepé (São Sepé - RS). Curso de Pós-Graduação em Geociências. UFRGS. Dissertação de Mestrado. 158pp.
- MATTOS, I.C.; PHILIP, R. P.; MEXIAS, A. S.; GOMES, M. E. B. 2004. "Metamorfismo de Contato no Complexo Bossoroca, porção SW do Complexo Granítico São Sepé, RS". *Revista Brasileira de Geologia*. 34(1): 1-10.
- MONIER, G. & ROBERT, J.L. 1986. Muscovite solid solutions in the system $K_2O-MgO-FeO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$: an experimental study at 2 kbar P_{H_2O} and comparison with natural Li-free white micas. *Mineralogical Magazine*, 50:257-266.
- ROEDDER, E. 1984. Fluid Inclusions. *Reviews in Mineralogy. Mineralogical Society of America*. v. 3, 644 p.
- SARTORI, P. L. P. 1978. Petrologia do Complexo Granítico de São Sepé, RS. Modelo Evolucionar de Granitos do Sul do Brasil. São Paulo. 196 p. (*Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Geociências da USP*).
- TITLEY, S. R. 1982 . The Style and Progress of Mineralization and Alteration in Porphyry Copper System. In: Title, S.R. (ed.). *Advances in geology of the porphyry copper deposits, southwestern north america*. Tucson, Univ. Ariz. Press. p. 93-166.
- VELDE, B. 1985. Clay Minerals: a Physico-chemical Exploration of their Occurrence. *Amsterdam, Elsevier*. 425 p.