

CAPÍTULO VII-POTENCIAL METALOGENÉTICO

VII.1- INTRODUÇÃO

A despeito de sua pouca importância relativa para a produção mineral nos tempos atuais, os terrenos ofiolíticos desempenharam seu papel na história da civilização ocidental como importantes fornecedores de metais, particularmente onde floresceram as civilizações mediterrâneas, em decorrência de sua privilegiada situação geográfico-geológica, a exemplo dos povos helênicos, do Império Romano e da Europa Medieval até a explosão da Revolução Industrial. Os ofiolitos também marcam a história com sua contribuição de rochas as mais variadas e de rara beleza para a construção de edifícios e monumentos históricos como, por exemplo, as mais diversas peças lavradas e esculpidas em rochas de mélanges ofiolíticas que se encontram em Veneza e muitas outras cidades da Europa e Oriente Médio. Entretanto, o enorme crescimento da demanda por metais na economia mundial no último século, aliado às características geológico-metalogenéticas dos ofiolitos, delegaram estes terrenos a plano inferior em termos de atratividade prospectiva.

Leblanc (1991), Prichard *et al.* (1996), Galley & Koski (1999), Ravizza *et al.* (2001), Ortiz *et al.* (2004), Suita *et al.* (2004a) e Prichard (2004) apresentam trabalhos sobre a distribuição de ouro (Au) e/ou de elementos do grupo da platina (EGP) em complexos ofiolíticos, com o objetivo de discutir o potencial metalogenético das rochas das diversas seções da litosfera oceânica.

A exploração de ouro e de platinóides em terrenos ofiolíticos exige conhecimento do contexto paleotectônico e da história geológica da seqüência. O Au e os EGP podem ser concentrados por processos magmáticos, mas remobilizados e reconcentrados por diferentes processos geológicos, tais como serpentinização, hidrotermalismo e/ou metamorfismo, magmatismo orogênico, deformação, soergimento e erosão, durante a migração desde a dorsal oceânica e/ou zona de suprasubducção até a colisão continental (Proenza *et al.*, 2004).

É neste contexto que este capítulo discute a origem do ouro e de elementos do grupo da platina em seqüências ofiolíticas e traz um apanhado geral sobre o modo de ocorrência, especialmente do Au, nas rochas da seção sedimentar do ofiolito de Ribeirão da Folha. Para facilitar a discussão este capítulo foi dividido em três itens: (i) Panorama do ouro em ofiolitos; (ii) Distribuição de elementos do grupo da platina em seqüências ofiolíticas e, (iii) Panorama geoquímico do ofiolito de Ribeirão da Folha.

VII.2- PANORAMA DO OURO EM OFIOLITOS

A prospecção de ouro em complexos ofiolíticos tem recebido pouca atenção se comparada às produções científicas em outros tipos de concentrações auríferas, em parte devido à dificuldade de se identificar com clareza a pilha ofiolítica (geralmente desmembrada e com forte alteração metamórfica), mas principalmente em decorrência do pequeno retorno econômico. Os dados de produção presentes na literatura, compilados por Castroviejo (2004), mostram a nítida diferença entre os prospectos de “ouro ofiolítico” e os demais (Tabela 16).

Tabela 16- Dados comparativos entre a produção aurífera de ofiolitos e de outros jazimentos/regiões selecionadas, segundo Castroviejo (2004).
*A.S = alta sulfetação.

Jazimentos/Países	Tipo	Produção 2001
Chipre	Ofiolítico	--
Oman	Ofiolítico (gossan, VMS)	603 kg Au
Yanacocha (Peru)	Epitermal A.S*	58.657 kg Au
Peru	Epitermal e outros	138.022 kg Au
África do Sul	Rand, orogênico e outros	394.765 kg Au

Uma proposta de classificação das concentrações auríferas ofiolíticas, considerados o estado suboceânico (concentrações primárias), o estado de obducção (concentrações exóticas ou modificadas) e os fenômenos superficiais (concentrações supergênicas), é apresentada por Castroviejo (2004) e Proenza *et al.* (2004). As concentrações auríferas primárias estão presentes nos protólitos da série ofiolítica antes da obducção. As concentrações exóticas ou modificadas são de difícil reconhecimento devido à complexidade e intensidade dos processos orogênicos sobre a pilha ofiolítica. Geralmente são concentrações epigenéticas, condicionadas pelo contexto geotectônico, composição litológica e geoquímica do ofiolito, que podem determinar a existência de mecanismos e armadilhas (*traps*) eficazes para a extração e/ou acúmulo do ouro. O marcante contraste reológico (rúptil-dúctil) que se encontra na pilha ofiolítica é um mecanismo importante para a geração de espaços e conseqüente mineralização. Outro ponto importante é a existência de pré-concentrações de Au e a abundância de sulfetos de Fe, que contribuem para a precipitação deste metal eventualmente mobilizado por fluidos hidrotermais. As concentrações supergênicas relacionam-se aos processos de alteração superficial associados à alteração intempérica e à erosão do ofiolito. A Tabela 17 apresenta um resumo dos principais tipos de concentrações auríferas, com Cu, Zn, Ni, Co e EGP associados, enfatizando seus subtipos e exemplos atuais.

Tabela 17- Resumo dos principais tipos de concentrações auríferas em complexos ofiolíticos, segundo Castroviejo (2004) e Proenza *et al.* (2004).

	<i>Subtipos</i>	<i>Principais características</i>	<i>Exemplos</i>
Concentrações Primárias	1- Sulfeto maciço vulcanogênico (VMS)	Contém a acumulação aurífera primária mais importante da seqüência ofiolítica. Os sulfetos maciços estão enriquecidos em ouro por efeito de fluidos hidrotermais exalativos submarinos, cuja circulação se deve ao calor gerado pelo magma suboceânico. Distingue-se o tipo Au-Cu-Zn, com conteúdo relativo de Cu maior que Pb/Zn e ouro de elevada pureza (finura > 800). As tonelagens geralmente são baixas (Tabela 16), podendo ocorrer camadas enriquecidas em Au e Cu (~2,5 ppm Au e 2% Cu).	Minas ativas atualmente: Chipre, Oman, Turquia.
	2- Magmática	As concentrações magmáticas se destacam pela presença de ouro em peridotitos mantélicos ricos em sulfetos, com ou sem cromita podiforme; em cumulados ultramáficos com sulfetos magmáticos na base da crosta oceânica (geralmente possuem platinóides) e em sulfetos magmáticos na parte superior da câmara magmática. Três processos são de fundamental importância neste subtipo: fusão parcial, fracionamento magmático e alteração hidrotermal. Para o ouro os processos hidrotermais possuem uma importância decisiva.	Não há registro de exploração econômica de Au, exceto quando este metal ocorre como subproduto.
	3- Porfirítica e epitermal	São depósitos transicionais aos VMS e despertam grande interesse com relação à exploração aurífera. Os maiores jazimentos geralmente estão associados à presença de rochas vulcânicas félsicas, o que distingue estes depósitos dos VMS ofiolíticos típicos.	Ofiolito de Semail (Oman), Conical Seamount (Nova Guiné).
	4- Gossan fóssil de fundo oceânico (ocres)	Associa-se à oxidação submarina dos sulfetos maciços vulcanogênicos (VMS), originando as formações conhecidas como ocres, habitualmente ricas em ouro.	Mina ativa atualmente: Troodos (Chipre).
	5- Segunda fase de mineralização aurífera	Trata-se de uma mineralização aurífera dispersa e com silicificação associada, resultante dos processos submarinos hidrotermais de baixa temperatura. Esta mineralização se desenvolve após o fim da atividade hidrotermal responsável pela principal mineralização (VMS), longe da dorsal oceânica. A este processo estão associados os sedimentos metalíferos citados nos ofiolitos de Bou Azzer (Marrocos) e Oman e explicados como resultado da interação água marinha-basalto.	Ofiolito de Troodos (Chipre), Bou Azzer (Marrocos) e Oman.
Concentrações Exóticas	1- Metamórfica	Exemplificando este subtipo os autores citam os importantes depósitos auríferos <i>listwaeníticos</i> , associados a uma alteração hidrotermal do protólito ultramáfico, que é substituído em grande parte por carbonato. O enriquecimento em Au se acentua em zonas silicificadas, relacionadas a fraturas ou contatos tectônicos, onde se formam as <i>birbiritas</i> (serpentinitos silicificados).	Ofiolito de Bou Azzer (Marrocos), para <i>listwaenita</i> e <i>birbirita</i> , e Amquat (Oman) e Ofiolito da Faixa Brasília (Suíça <i>et al.</i> , 2004), para <i>birbirita</i> .

Concentrações Exóticas	2- Orogênica	Esta concentração é bastante discutida pelos autores. Representa uma das tipologias mais importantes de Au em ofiolito, com uma larga história de exploração. É importante a identificação da história orogênica responsável pela colocação do ofiolito no continente e das conseqüentes modificações sofridas por toda a seção devido à tectônica (fraturas, zonas de cisalhamento) e ao evento térmico.	British Columbia
	3- Relacionada a intrusões ou depósito epitermal	Os autores consideram que existe potencial para formação de concentrações auríferas, sobre séries ofiolíticas em contexto acrescionário, associadas a intrusões posteriores e/ou depósitos epitermais.	Mina de Rosebery, Tasmânia, associada a intrusões.
Concentrações Supergênicas	1-Zona de oxidação (gossan aurífero)	Produto da oxidação subaérea, <i>in situ</i> , dos VMS ofiolíticos aflorantes, muito enriquecido em ouro. Não deve ser confundido com os depósitos oxidados de fundo oceânico (ocre).	Ofiolito de Oman (~0,6 t/ano)
	2- Laterita	A laterita se forma principalmente em regiões tropicais, a partir das litologias ofiolíticas. É pouco estudada para ouro e conta com modestas explorações na Austrália e África. Apresenta grande importância para o beneficiamento de níquel e, em menor proporção, de cobalto.	Nova Caledônia, para níquel, Bou Azzer (Oman), para cobalto.
	3- Detrítica	Quando a erosão alcança os corpos ofiolíticos, o ouro aparece em concentrações detríticas, sendo beneficiado em <i>placers</i> .	Oeste dos Estados Unidos, com recuperação de EGP como subproduto do ouro.

Realizada a caracterização dos diversos tipos de concentrações auríferas, torna-se importante a apresentação de dados de conteúdos de Au das litologias da pilha ofiolítica, como parâmetro de comparação do potencial metalogenético de cada litotipo (Tabela 18). É importante ressaltar que alguns minerais como, por exemplo, magnetita, hornblenda e sulfetos, possuem a capacidade de concentrar ouro, atingindo conteúdos maiores que as rochas. Os dados, comparados com o manto terrestre, mostram que os dunitos apresentam um nítido empobrecimento em ouro, visto que este elemento se fraciona e permanece no magma. Os sedimentos metalíferos, serpentinitos e alguns cromititos apresentam-se medianamente enriquecidos, enquanto que os sulfetos magmáticos e hidrotermais apresentam enriquecimento marcante neste metal (fator próximo a 10^3), comprovando a eficiência dos depósitos de sulfetos maciços vulcanogênicos (VMS).

Tabela 18- Conteúdos médios de Au em rochas ofiolíticas (Leblanc, 1991; *in*: Castroviejo, 2004).

Tipo de Rocha	Au (ppb)	Tipo de Rocha	Au (ppb)
Manto	0,79	Cumulado ultramáfico	1,9
Lherzolito	1,5	Cumulado máfico	1,0
Dunito	0,2	Basalto (MORB)	1,3
Serpentinito	8,9	Sulfetos magmáticos	117,0
Cromitito pobre em EGP	6,1	Sulfetos hidrotermais	527,0
Cromitito rico em EGP	2,0	Sedimentos metalíferos	21,5

VII.3- DISTRIBUIÇÃO DE ELEMENTOS DO GRUPO DA PLATINA EM SEQUÊNCIAS OFIOLÍTICAS

Prichard (2004) apresenta um estudo completo sobre a distribuição de EGP em ofiolitos. Segundo a autora, todos os platinóides são encontrados em complexos ofiolíticos a níveis de ppb. Os valores mais altos estão comumente associados a sulfetos (Pt, Pd e Rh) e cromitito podiforme (Os, Ir e Ru) na parte plutônica da pilha. A sequência ofiolítica rica em platinóides é formada a partir de altas taxas de fusão mantélica, dando lugar a magmas boniníticos. Os EGP se concentram durante a cristalização por processos magmáticos, podendo sofrer mobilizações e reconcentrações secundárias por diversos processos: alteração hidrotermal durante a formação da crosta oceânica, metamorfismo associado a fluidos, processos tectônicos e alteração intempérica. O ofiolito de Troodos (Chipre) ilustra a existência de pequenas concentrações de EGP de origem hidrotermal associadas às concentrações magmáticas. O estudo dos depósitos de sulfetos maciços vulcanogênicos (VMS) e dos *umbers* manganésíferos associados demonstra que os sedimentos exalativos estão ligeiramente enriquecidos em Pt e Pd (Ravizza *et al.*, 2001).

VII.4- PANORAMA GEOQUÍMICO DO OFIOLITO DE RIBEIRÃO DA FOLHA

A exploração de ouro na região de Ribeirão da Folha-Baixa Quente data do início do século XVIII e esteve associada, inicialmente, aos aluviões e solos colúviais e elúviais laterizados. A fase inicial da exploração aurífera na região teve início nos arredores da cidade de Minas Novas e se espalhou por quase todo o Vale do rio Araçuaí (ver história da exploração aurífera em Pedrosa-Soares, 1995). Atualmente, apesar da fiscalização ambiental, ouro ainda é extraído em pequenos garimpos aluvionares nos arredores de Baixa Quente.

Vieira (1982) descreve, para a área em questão, a presença de xistos grafitosos, provavelmente vulcanogênicos, com grãos de ouro disseminados e ricos em pirita e arsenopirita. Segundo este autor, ouro disseminado ocorre também nos aluviões do Rio Setúbal, córregos do Ouro e Indaiá, e em veios de quartzo e cascalhos relacionados aos sedimentos terciários.

Os dois tipos de ocorrência aurífera mais importantes da seção sedimentar do ofiolito de Ribeirão da Folha, associados à reconcentração deste metal, são: a) ouro associado aos veios de quartzo e, b) ouro associado às zonas de cisalhamento sulfetadas. Em ambos os casos, os fluidos mineralizantes estão relacionados à desvolatilização das rochas durante o metamorfismo regional de fácies anfibolito médio (temperatura entre 530° e 600° C e pressão entre 4,9 e 5,3 kbar; item IV.3.2). Segundo Seward (1991), o transporte de ouro em soluções hidrotermais é realizado por

compostos sulfetados, clorados e fluorados. Logo, em contraposição ao intervalo de temperatura anteriormente referido, os compostos sulfetados, que ocorrem na forma de $Au_2(HS)_2S^{-2}$, $Au(HS)_2$ e $Au(HS)$, são estáveis em temperaturas entre 25° e 360° C, com pH ácido a alcalino.

Os veios de quartzo auríferos possuem espessura milimétrica a decimétrica e preenchem fraturas de tração do tipo T (*tension gashes*). O ouro ocorre disseminado no quartzo leitoso e acinzentado, sob a forma de pintas visíveis a olho nu e/ou pequenas pepitas. Os teores deste metal podem atingir dezenas de g/t.

Estudos de inclusões fluidas em amostras de veio de quartzo aurífero pouco leitoso, coletado nos arredores de Minas Novas, foram apresentados por Pedrosa-Soares (1995) e evidenciam quatro tipos de inclusões (duas precoces e duas tardias) (Tabela 19).

Tabela 19- Dados de inclusões fluidas em veio de quartzo aurífero (Pedrosa-Soares, 1995).

T1A/T1B (inclusões precoces)	T2A (inclusão tardia)	T2B (inclusão tardia)
Não orientadas	Orientadas	Orientadas
Bifásicas, sem fase sólida	Bifásicas, sem fase sólida	Monofásicas, sem fase sólida
Salinidade da fase aquosa equivalente a 2% em peso NaCl	Salinidade da fase aquosa equivalente a 4% em peso NaCl	-----
Composição: H ₂ O, CO ₂ , N ₂	Composição: H ₂ O, CO ₂	-----
Temp. de homogeneização: • inicial: 190° C • final: 280° C	Temp. de homogeneização: • inicial: 160° C • final: 250° C	-----

A baixa salinidade e a composição (H₂O + CO₂) do fluido evidenciam que a deposição do ouro nos veios de quartzo da região de Minas Novas é semelhante aos depósitos exclusivamente auríferos hospedados em cinturões ardoseanos (*slate belt gold only*) (Phillips & Powell, 1992). As temperaturas de homogeneização total das inclusões fluidas mostram que estes veios se cristalizaram a baixas temperaturas (no mínimo 250-280° C). Entretanto, como os xistos hospedeiros destes veios auríferos mostram metamorfismo na fácies xisto verde e/ou transição xisto verde/anfibolito (zona da granada, ca. 450° C, Pedrosa-Soares 1995), eles seriam receptores dos fluidos metamórfico-hidrotermais, produzidos e liberados por seção mais profunda da Formação Ribeirão da Folha, localizada na área aqui estudada, a temperaturas entre 530° e 600° C.

Em função do espesso manto de intemperismo da área estudada, rochas frescas das zonas de cisalhamento sulfetadas ocorrem de maneira esparsa, especialmente nos leitões do Ribeirão da Folha e nos córregos do Ouro e Indaiá (próximo a Baixa Quente). São zonas de cisalhamento sincinemáticas à foliação regional, de baixo ângulo de mergulho, compostas por xisto peraluminoso basal sobreposto por muscovita xisto sulfetado resultante da alteração hidrotermal relacionada ao cisalhamento dúctil, além de outras rochas da unidade sulfetada (variedades de metachert e diopsidito). Os poucos registros de exploração aurífera em zonas de cisalhamento sulfetadas

encontram-se nos arredores de Baixa Quente, especificamente nos aluviões dos córregos do Ouro e Indaiá, onde Vieira (1982) identificou uma reserva de aproximadamente 57 quilos de ouro, com teor médio de $0,068 \text{ g/m}^3$, em cascalhos dos córregos supracitados.

Dosagens de ouro em amostras da Formação Ribeirão da Folha (Tabelas 11 a 14), incluindo xistos pelíticos, metacherts e diopsiditos, evidenciam a baixa concentração aurífera nesta seção sedimentar. Estes dados também indicam que os fluidos metamórficos não encontraram condições propícias para deposição de ouro nas zonas de cisalhamento, mais provavelmente em função das condições de PT do metamorfismo ($530\text{-}600^\circ \text{ C}$; $4,9\text{-}5,3 \text{ kbar}$) do que da ausência de rochas geoquimicamente capazes de provocar a cristalização dos compostos portadores de Au. Desta forma, a área de Ribeirão da Folha-Baixa Quente representaria uma zona profunda de produção de fluidos, com pequena capacidade de retenção de mineralização aurífera em suas rochas (Fig.39).

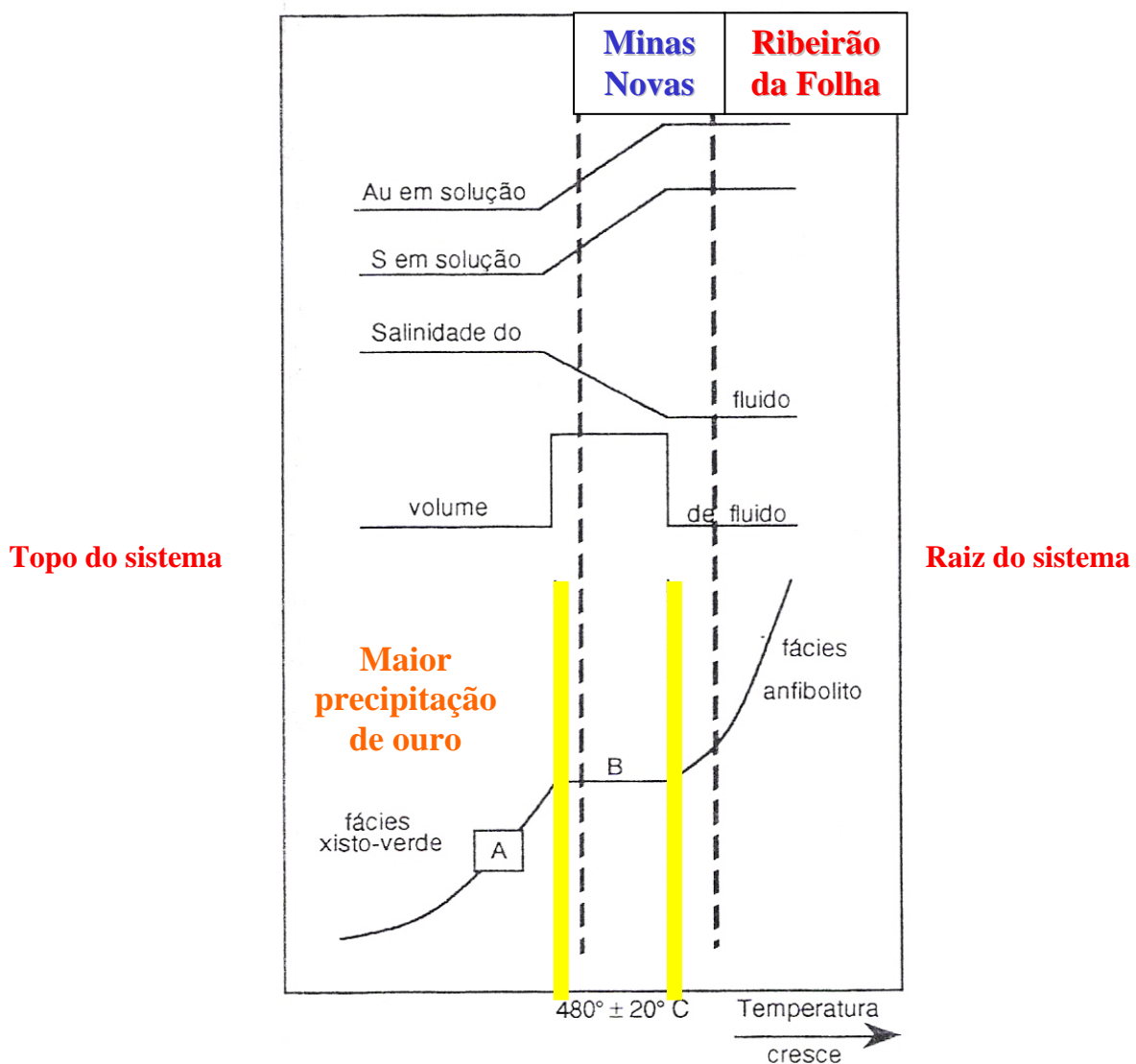


Fig.39- Esquema metalogénico proposto para a região de Ribeirão da Folha - Minas Novas, evidenciando a zona mais propícia para a precipitação do ouro (fácies xisto verde). Modificado de Pedrosa-Soares (1995).

De um modo geral, a seqüência de itens sumarizada abaixo, baseada em dados de Pedrosa-Soares (1995) e desta dissertação (mineragrafia, química mineral e litoquímica), pode ser utilizada para explicar as ocorrências de ouro na seção sedimentar do ofiolito de Ribeirão da Folha:

- Etapa de precipitação de pirita + calcopirita, como resultado da atividade hidrotermal submarina associada ao magmatismo ofiolítico, juntamente com a deposição dos demais compostos que formaram a seção sedimentar do assoalho oceânico;
- Processo de obducção e incorporação da pilha ofiolítica ao continente, associado a transformações orogênicas. Neste estágio ocorre a formação da xistosidade principal (Sn) e das zonas de cisalhamento dúcteis, em condições de fácies anfibolito médio (T= 530-600° C; P= 4,9-5,3 kbar), implantada em rochas de comportamento reológico semelhante e que permitiu a fuga de fluidos resultantes das reações metamórficas sem que houvesse deposição significativa de minerais auríferos em zonas de cisalhamento sulfetadas. O metamorfismo foi responsável pela recristalização de pirita e calcopirita sob a forma de pirrotita, um sulfeto de mais alta temperatura. Esta é a principal fase de geração dos sulfetos hoje observados e se caracteriza por: (i) recristalização dos sulfetos paralelamente à xistosidade principal, principalmente nas variedades de metachert e subordinadamente nos xistos pelíticos; nas amostras de diopsiditos, onde o bandamento é bem desenvolvido, os sulfetos ocupam os espaços intergranulares; (ii) inclusões de pirita e/ou calcopirita nos cristais de pirrotita, mostrando a nítida relação entre os dois primeiros sulfetos e a geração de pirrotita; a presença de certa quantidade de pirrotita isenta de inclusões sugere o consumo total de pirita + calcopirita ou cristalização a partir de outros fluidos metamórfico-hidrotermais;
- Os fluidos de baixa salinidade (2-4% de equiv. NaCl) e composição rica em H₂O e CO₂ foram gerados em zonas caracterizadas por altas temperaturas e lixiviação intensa do pouco Au das rochas metassedimentares e ascenderam a profundidades mais rasas;
- A cristalização dos veios de quartzo auríferos é a última etapa do processo e ocorreu durante a fase rúptil-dúctil que sucedeu a geração da xistosidade principal no domínio predominantemente dúctil. Os veios auríferos preenchem principalmente fraturas do tipo T (*tension gashes*) e foram depositados a temperaturas mais baixas (mínimo de 200-250° C), de fácies xisto verde e/ou transição xisto verde/anfibolito, conforme indicam as inclusões fluidas.

Suita *et al.* (2004a) sugerem a possibilidade de existirem sulfetos maciços vulcanogênicos com concentrações anômalas de Au, associados aos corpos de diopsidito sulfetado e uma larga remobilização neoproterozóica deste metal e de platinóides. Segundo os autores, estes elementos se concentrariam no setor proximal em relação à fonte exalativa. Entretanto, todas as análises litoquímicas apresentadas nesta dissertação mostram que os sedimentos exalativos do ofiolito de

Ribeirão da Folha apresentam grande contribuição da fração pelítica e provavelmente tenham se depositado longe da fonte hidrotermal. Este é um dos fatores que explicaria as baixas concentrações de ouro (e outros metais) em todas as rochas. Os platinóides também não apresentam ocorrências e/ou anomalias significativas e este fato pode ter duas origens: (i) a taxa de fusão mantélica não foi suficiente para gerar uma concentração destes elementos na seção plutônica ou, (ii) não houve remobilização e/ou reconcentração suficiente nas rochas depositadas longe da fonte hidrotermal.

Uma última consideração diz respeito às anomalias em cromo e níquel dos diopsiditos sulfetados, especialmente na amostra do alto Ribeirão da Folha. Este diopsidito situa-se próximo dos corpos de ortoanfibolito e de rochas metaultramáficas, ao contrário das rochas do médio ribeirão. Desta forma, pode-se interpretar que este corpo está associado a uma maior lixiviação de elementos das seções máfica e ultramáfica do ofiolito, com posterior recristalização. As análises de química mineral corroboram a afirmação acima e evidenciam a presença de minerais ricos em cromo (alumínio cromita ?) e de pentlandita cobaltífera.