

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**CARACTERIZAÇÃO HIDROTÉRMICA DO PROSPECTO RIO VERMELHO:
NOVA MINERALIZAÇÃO TIPO IOCG NA PROVÍNCIA CARAJÁS (PA)**

EZEQUIEL POZOCCO

ORIENTADOR - Prof. Dr. José Carlos Frantz

CO-ORIENTADOR - Profa. Dra. Juliana Charão Marques

COMISSÃO EXAMINADORA:

Profa. Dra. Carolina Penteado Natividade Moreto – Universidade de Campinas

Profa. Dra. Lena Virgínia Soares Monteiro – Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Artur César Bastos Neto – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre
em Geociências

Porto Alegre, 2018.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitor: Jane Fraga Tutikian

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Pozocco, Ezequiel

Caracterização hidrotermal do prospecto Rio Vermelho: nova mineralização tipo IOCG na Província Carajás (PA) . / Ezequiel Pozocco. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2018.
[54 f.] il.

Dissertação (Mestrado).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2018.

Orientador: José Carlos Frantz

Co-Orientador: Juliana Charão Marques

1. IOCG. 2. Carajás. 3. Mineralizações. 4. Cobre. I. Título.

CDU 550.4

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Miriam Alves

CRB 10/1947

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Campus do Vale Av. Bento Gonçalves, 9500 - Porto Alegre - RS - Brasil

CEP: 91501-970 / Caixa Postal: 15001.

Fone: +55 51 3308-6329 Fax: +55 51 3308-6337

E-mail: bibgeo@ufrgs.br

Agradecimentos

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, bem como ao Programa de Pós-Graduação em Geociências, aos professores e funcionários e em especial aos orientadores Prof. José Carlos Frantz e Profa. Juliana Charão Marques pelos ensinamentos, paciência e pela oportunidade de aprendizado que me foi dada, algo que levarei comigo para a vida toda. Aos alunos de graduação em geologia Renan Guilherme e Natanael Cesáreo pelo apoio com as partes gráficas e com as análises de MEV. A Empresa Codelco do Brasil Mineração Ltda, pelo apoio e acesso aos dados de pesquisa da área do Prospecto Rio Vermelho, sem o qual não seria possível desenvolver o trabalho que resultou nessa Dissertação de Mestrado. À minha família, em especial a minha esposa Thaís, que sempre me apoiou e encorajou a seguir adiante sem nunca pensar em desistir.

RESUMO

O prospecto Rio Vermelho está localizado no setor oriental da Província Mineral de Carajás, perto do contato com os metassedimentos da Faixa Araguaia. A mineralização está localizada em uma zona de *splay* da Falha de Carajás, próxima do depósito IOCG do Cristalino (Huhn *et al.*, 1999). O minério é hospedado por granitoides arqueanos deformados e afetados por alterações hidrotermais de vários estágios controladas por estruturas NNW-SSE. O levantamento geológico de superfície-subsuperfície e petrografia detalhada, juntamente com análises de química mineral, permitiram a identificação de diferentes estágios hidrotermais. A alteração hidrotermal começa com um sistema sódico com albita e quartzo substituindo o feldspato original. A alteração sódica é melhor preservada em áreas distais. A potassificação, representada pela cristalização do microclínio juntamente com o quartzo, sobrepõe a paragênese da albita e ocorre proximal à zona de minério. A cloritização ocorre em dois momentos diferentes, pré e sin-mineralização. A pré-mineralização é caracterizada por clorita lamelar associada a epidoto e quartzo. A sin-mineralização é marcada por clorita fibro-radial, enriquecido em Fe-Al e Mn, e associada com óxidos de ferro e sulfetos de cobre que preenche veios e brechas. Antes da fase de mineralização, a silicificação marca o início da fase de brechação que produz veios de quartzo. O estágio de mineralização de cobre, com o minério preenchendo brechas dominado por calcopirita, com bornita subordinada, ocorre associado a óxidos de ferro, com abundante hematita e magnetita subordinada. A sericitização com epidoto e carbonato é um processo pós-mineralização e caracteriza a última fase de alteração hidrotermal. O hidrotermalismo que começa com fases sódicas, termina com sericita, parece marcar uma variação na temperatura entre 600 a 250 °C. A transição de alteração sódica e potássica de alta temperatura para baixa temperatura na zona do minério em um ambiente dúctil-rúptil sugerem uma entrada de água meteórica no sistema. A hematita derivada da transformação de magnetita indica fluidos extremamente oxidados e sugere uma temperatura de deposição <350° C durante a formação do minério. As características hidrotermais da mineralização de cobre do Prospecto Rio Vermelho sugerem um IOCG superficial dominado por hematita. Sua posição regional nas bordas da Faixa Araguaia, mas não afetada pelos processos neoproterozóicos, abre uma nova área de exploração na parte mais oriental do Domínio Carajás.

Palavras-Chave: Rio Vermelho; IOCG; Província Carajás; Mineralização de Cobre.

ABSTRACT

The Rio Vermelho prospect is located in the eastern sector of the Carajás Mineral Province, near to the contact with the metasediments of the Araguaia Fold Belt. The mineralization is located in a horse splay zone of the Carajás Fault, near to the Cristalino IOCG deposit (Huhn *et al.* 1999). The ore is hosted by Archean deformed granitoids affected by multi-stages hydrothermal alteration controlled by a NNW-SSE structures. Geological surface and subsurface survey and detailed petrography coupled with mineral chemistry analyzes allowed the identification of different hydrothermal stages. The hydrothermal alteration starts with a sodic system with albite and quartz substituting the original feldspars. The sodic alteration is preserved in distal areas. Potassification, represented by the crystallization of microcline together with quartz, overprints the albite paragenesis and occurs proximal to the ore zone. Chloritization occurs in two different moments, pre- and syn-mineralization. The pre-mineralization is characterized by lamellar chlorite associated with epidote and quartz. The syn-mineralization is marked by fibro-radial chlorite, enriched in Fe-Al and Mn, and associated with iron oxide and copper sulfides filling veins and breccias. Before the mineralization stage, silicification marks the beginning of the brecciation phase producing quartz veins. The copper mineralization stage, with ore filling breccias dominated by chalcopyrite with subordinate bornite, occurs associated with iron oxides, with abundant hematite and subordinate magnetite. Sericitization with epidote and carbonate is a post-mineralization process and characterizes the last hydrothermal alteration phase. The hydrothermalism starting with sodic phases and ending with sericite marks a temperature ranging from 600 to 250°C. The transition from high temperature sodic and potassic alteration to low temperature in the ore zone in a ductile-ruptile environment, suggest an input of oxidized meteoric water. The hematite derived from magnetite transformation indicates extremely oxidized fluids and suggests a depositional temperature < 350° during the ore formation. The hydrothermal characteristics of the copper mineralization of the Rio Vermelho Prospect suggest a shallow IOCG type dominated by hematite. Its regional position at the borders of the Araguaia Fold Belt, but not affected by the Neoproterozoic processes, opens a new area for exploration in the easternmost part of the Carajás Domain.

Keywords: Rio Vermelho; IOCG; Carajás Province; Copper Mineralization.

Estrutura da Dissertação

A presente dissertação contém um capítulo introdutório que mostra a localização da área de estudos, enfatizando a importância do trabalho, seus objetivos gerais e a metodologia utilizada. O capítulo seguinte aborda a geologia regional da Província Carajás para o entendimento do arcabouço tectono-estratigráfico da região em questão. Uma revisão do modelo de depósitos IOCG segue como capítulo que antecede o artigo “HYDROTHERMAL CHARACTERIZATION OF THE RIO VERMELHO PROSPECT: A NEW IOCG MINERALIZATION IN THE CARAJÁS PROVINCE” submetido ao periódico Journal of South American Earth Science, que contém uma sumarização de todo o trabalho executado com suas interpretações e conclusões. A dissertação é encerrada com um capítulo final abordando as conclusões acerca do trabalho executado.

Lista de Figuras

- Figura 1 - Mapa de localização do Prospecto Rio Vermelho.....10
- Figura 2 - A) Cráton Amazônico com os Domínios Carajás (CD) e Rio Maria (RMD); B–Mapa Geológico Regional do Domínio Carajás (modificado de Vasquez *et al.*, 2008). Quadrado em vermelho destacando a área de estudos que representa a figura 2 do artigo submetido (capítulo 4).....13
- Figura 3 - Distribuição geográfica de depósitos com recursos superiores a 100 Mt agrupados como IOCG, depósitos de óxido de Fe (P, F, REE) e depósitos tipo skarns. A distribuição dos depósitos é apresentada em relação à posição dos Crátos Arqueanos e Paleo-Mesoproterozóicos apresentados por Artemieva e Mooney (2001). Mapa extraído de Groves *et al.* 2010.....15
- Figura 4: A–Perfil esquemático indicando o ambiente tectônico e litosférico de formação de depósitos tipo IOCG, em crátos pré-cambrianos e em posições de extensão em arcos magmáticos. Os depósitos tipo IOCG são formados em margens de crosta continental cratonizada acima da litosfera do manto metasomatizada, normalmente com idade Arqueana. (Figura modificada de Groves & Bierlein, 2007). B– Perfil esquemático de detalhe com modelo para a gênese dos depósitos tipo IOCG, onde com baixos graus de fusão parcial do manto litosférico metasomatizado é possível produzir magmas básicos-ultrabásicos, com provável afinidade alcalina e enriquecidos em voláteis, Cu e Au. (Extraído de Groves *et al.* 2010)....16
- Figura 5: Desenho esquemático identificando as possíveis fontes de fluidos formadores dos depósitos tipo IOCG, com a geometria das alterações e corpos mineralizados que poderiam ser formados para cada fonte. Extraído de Barton & Johnson, 2000.....18

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivos	9
1.2 Localização.....	10
1.3 Metodologia	10
2. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	12
3. DEPÓSITOS TIPO IRON-OXIDE-COPPER-GOLD (IOCG).....	14
5. CONCLUSÕES.....	49

1. INTRODUÇÃO

A Província Mineral de Carajás (PMC) é uma das mais importantes províncias metalogenéticas globais, contendo grande parte das reservas mundiais de ferro, depósitos de níquel, ouro, platina, paládio, manganês, além das importantes reservas de cobre já identificadas. As minas de Cobre do Sossego (245 Mt @ 1.1% Cu and 0.28 g/t Au, Lancaster *et al.*, 2000) e Salobo (789 Mt @ 0,96% Cu e 0,52g/t Au; Souza & Vieira 2000), bem como uma série de depósitos de cobre de classe mundial como Cristalino, Igarapé-Bahia, Furnas entre outros, somam reservas aproximadas de 4.000 Mt de minério, fato que torna a Província Mineral de Carajás um dos ambientes mais prospectivos para este metal no continente. Estudos recentes acerca destes depósitos de Cu vem acarretando sua incorporação gradativamente na classe de depósitos tipo IOCG (Iron-Oxide-Copper-Gold) que é um dos estilos de mineralização mais importantes no cenário de exploração mineral da atualidade, principalmente devido à possibilidade de grande tonelagem e expressivo teor de metais envolvidos nos depósitos encontrados.

No contexto das novas descobertas minerais de Carajás encontra-se a área de interesse do presente trabalho, denominada Prospecto Rio Vermelho, situado na porção leste da Província Mineral de Carajás, em zona de *splay* da Falha Carajás, próximo ao Depósito Cristalino que contém 500 Mt @ 1.0% Cu, 0.3 g/t Au (Huhn *et al.*,1999), conforme observado na figura 1. A geologia da região marca o contato entre duas importantes unidades tectônicas, o embasamento da Província Carajás com os metassedimentos da Faixa Paraguai-Araguaia, um local onde ainda não haviam sido encontradas, até o momento, mineralizações de Cobre, principalmente do tipo IOCG. O entendimento do sistema hidrotermal e da mineralização de cobre do Prospecto Rio Vermelho pode, assim, abrir uma nova perspectiva de pesquisa para a região leste da Província Mineral de Carajás, um fato novo dentro da complexa história das mineralizações que ocorrem na região.

1.1 Objetivos

Os objetivos propostos para este trabalho foram a caracterização do hidrotermalismo que atuou na região do Prospecto Rio Vermelho, estabelecendo uma correlação com a mineralização de cobre; caracterização da mineralogia de minério e sua associação com a alteração hidrotermal, através de petrografia, imagens de MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) e análises de microsonda em minerais; comparação do ambiente gerador da mineralização com os de depósitos já conhecidos da Província Mineral de Carajás permitindo uma classificação apropriada quanto ao estilo de mineralização.

1.2 Localização

O Prospecto Rio Vermelho, está localizado na porção extremo leste da Província Mineral de Carajás, junto à Vila Rio Vermelho, divisa dos municípios de Curionópolis e Xinguara, região sul do Estado do Pará (Fig.1). O acesso à área se dá a partir da localidade de Parauapebas pela rodovia PA-275 em trecho asfáltico de 65Km até o município de Eldorado dos Carajás. A partir daí, segue-se pela BR-155, sentido sul em trecho de 50Km, até a Vila Rio Vermelho, onde está situada a área do presente trabalho. O acesso local é feito através de estradas vicinais trafegáveis o ano todo.

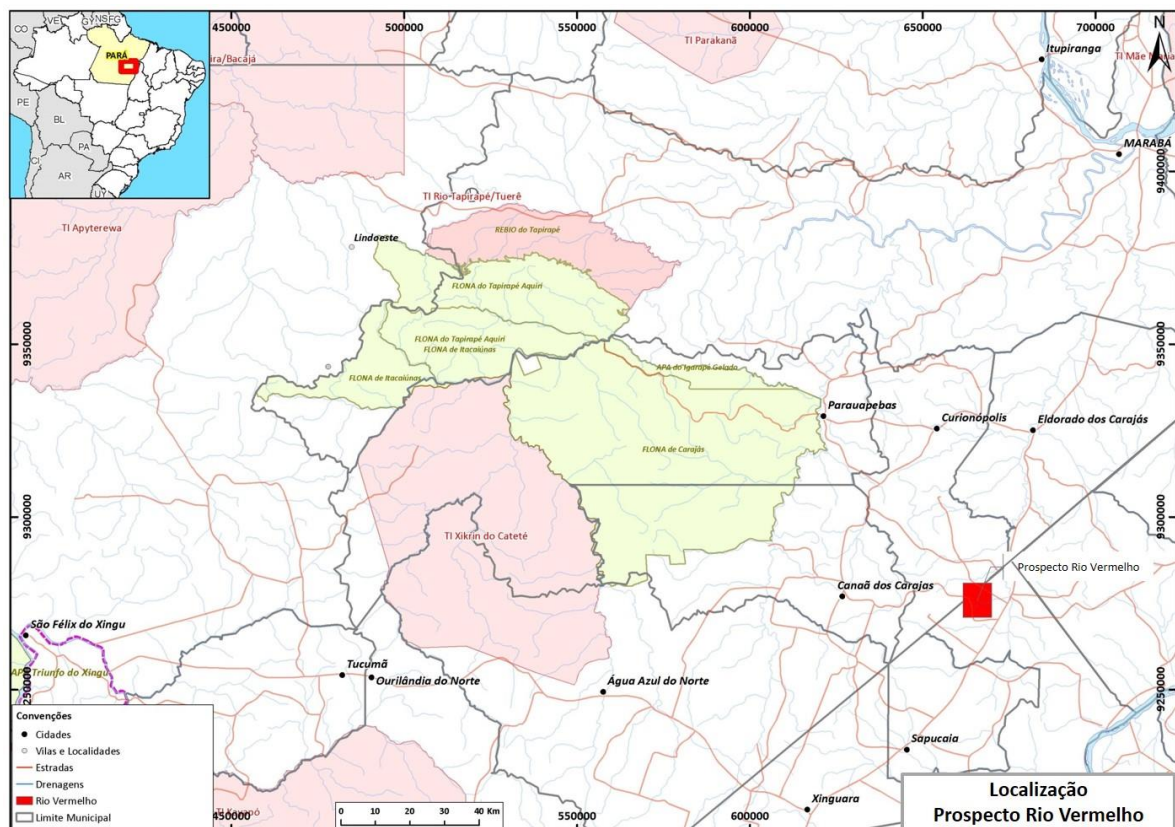


Figura 1: Mapa de localização do Prospecto Rio Vermelho.

1.3 Metodologia

Na área do Prospecto Rio Vermelho foi realizado um mapeamento geológico, complementado com informações de furos de sondagem exploratória executados pela Empresa Codelco do Brasil Mineração Ltda. As amostras de rocha oriundas de testemunhos de sondagem foram laminadas em seções delgada/polidas para estudos petrográficos que foram realizados com microscópios de luz transmitida e refletida. Os estudos de microscopia eletrônica de varredura (MEV) deram suporte a uma caracterização de maior detalhe para definição da paragênese hidrotermal e da mineralogia de minério. O equipamento

utilizado foi um JEOL 6610-LV *Scanning Microscope* do Laboratório de Geologia Isotópica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, equipado com detector de espectrômetro de dispersão de energia *Bruker Nano XFlash 5030* (EDS), sob condições de voltagem de aceleração de 20kV e corrente de feixe de 20nA. Análises de microsonda eletrônica foram realizadas em fases de cloritas pré-selecionadas nos estudos petrográficos e de MEV. Estas análises foram realizadas no Departamento de Ciências Geológicas e Engenharia Geológica da Queen's University em Kingston no Canadá, em microsonda JEOL PC-EPMA versão 1.11.2.0 totalmente automatizada. As análises foram realizadas com tensão operacional de 15kV e corrente de 10 nA.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A Província Mineral de Carajás é dividida em dois segmentos distintos, sul e norte, denominados como Domínio Rio Maria a sul (Vasquez *et al.* 2008) e Domínio Carajás a norte (Vasquez *et al.* 2008), conforme observado na figura 2A. Os Terrenos Granito-Greenstone do Domínio Rio Maria do segmento sul são formados por sequências vulcano-sedimentares, tipo *Greenstone Belt*, com intrusões graníticas associadas. O Domínio Carajás, onde está inserido o Prospecto Rio Vermelho, no segmento norte, é representado pelos complexos Xingu (Silva *et al.* 1974) e Pium (Araújo *et al.* 1988; DOCEGEO 1988) no seu embasamento, e pelo Gnaiss Estrela, Suíte Plaquê e as sequências vulcano-sedimentares do Supergrupo Itacaiúnas (DOCEGEO, 1988) no topo. O embasamento do Domínio Carajás é formado por terrenos granito-gnáissicos tipo tonalito-trondhjemitó-granodiorito (TTG), por vezes migmatitizados, do Complexo Xingu e por granulitos do Complexo Pium, ambos de idade arqueana (Fig. 2B).

As rochas do Complexo Pium ocorrem como corpos alongados de orientação aproximada E-W e representariam fragmentos de crosta inferior, encaixados ao longo de zonas de cisalhamento (Araújo *et al.* 1988). A idade de 3.000 Ma, obtida em datação Pb-Pb em rocha total (Rodrigues *et al.* 1992), foi interpretada como a idade de cristalização do protólito ígneo dos granulitos. A datação U-Pb em zircões de rochas do Complexo Xingu forneceu idade de 2.860 Ma, sugerida como idade da migmatitização (Machado *et al.* 1991). Os granitos arqueanos deformados, que incluem a Suíte Plaquê (Araújo *et al.* 1988), o Complexo Estrela (Barros *et al.* 2001), de 2.700 Ma de idade, o Granito Planalto (2747 ± 2 Ma, Pb-Pb em zircão; Huhn *et al.* 1999), o Diorito Cristalino (2.738 ± 6 Ma, Pb-Pb em zircão; Huhn *et al.* 1999), o granito Old Salobo (2.573 ± 2 Ma, U-Pb em zircão; Machado *et al.* 1991) e o Granito Itacaiúnas (2.560 ± 37 Ma, Pb-Pb em zircão; Souza *et al.* 1996), são intrusivos no Complexo Xingu e no Supergrupo Itacaiúnas, e marcam importantes eventos magmáticos arqueanos na Província Mineral de Carajás.

O Supergrupo Itacaiúnas (Fig. 2B) engloba sequências vulcano-sedimentares com diferentes graus metamórficos e deformacionais, como os grupos Igarapé Salobo, Grão-Pará, Igarapé Bahia, Igarapé Pojuca e Buritirama. É comum a presença de vulcanismo básico predominante na base, com intercalações de rochas sedimentares químicas, formando as unidades supracrustais do Supergrupo. Estas unidades supracrustais são sobrepostas discordantemente por arenitos e siltitos, de ambiente fluvial a marinho raso, inseridos no Grupo Rio Fresco (DOCEGEO 1988) com idade de 2.681 ± 5 Ma (U-Pb em zircão por SHRIMP; Trendall *et al.* 1998) ou na Formação Águas Claras (Araújo & Maia 1991; Nogueira & Truckenbrodt 1994; Nogueira *et al.* 2000).

O Grupo Grão-Pará é a unidade que possui os mais expressivos depósitos de ferro da Província enquanto o Grupo Buritirama detém as principais mineralizações de manganês. Os demais grupos possuem mineralizações de ouro e sulfetos de metais base, sendo o cobre um dos mais importantes. Além das sequências vulcano-sedimentares, o Supergrupo Itacaiúnas também apresenta intrusões máfico-ultramáficas, tais como Complexo Luanga (2.763 ± 6 Ma, U-Pb em zircão; Machado *et al.* 1991), Vermelho e Onça-Puma, que apresentam mineralizações de Pt-Pd além de depósitos de níquel. Diques e *sills* de gabro

relacionados a estas intrusões foram datados e forneceram idades entre 2.760 e 2.650 Ma (Pb-Pb em zircão, Dias *et al.* 1996; Galarza & Macambira 2002; Pimentel *et al.* 2003). Intrusões gabróicas, com idades de cristalização em torno de 2.760 Ma (U-Pb em zircão), foram consideradas cogenéticas com as rochas metavulcânicas dos grupos Igarapé Salobo e Pojuca (Pimentel *et al.* 2003; Marschik *et al.* 2005).

Intrusões graníticas anorogênicas de idade paleoproterozóica, do tipo A intra-placa, alcalinos a sub-alcalinos, tendo como exemplos os granitos Central de Carajás, *Young* Salobo, Pojuca, Cigano e Breves (com idades em torno de 1.880 Ma, U-Pb em zircão); Machado *et al.* 1991; Dall'Agnol *et al.* 1994; Tallarico *et al.* 2004) encerram os eventos magmáticos que atuaram de forma mais expressiva sobre a Província Mineral de Carajás.

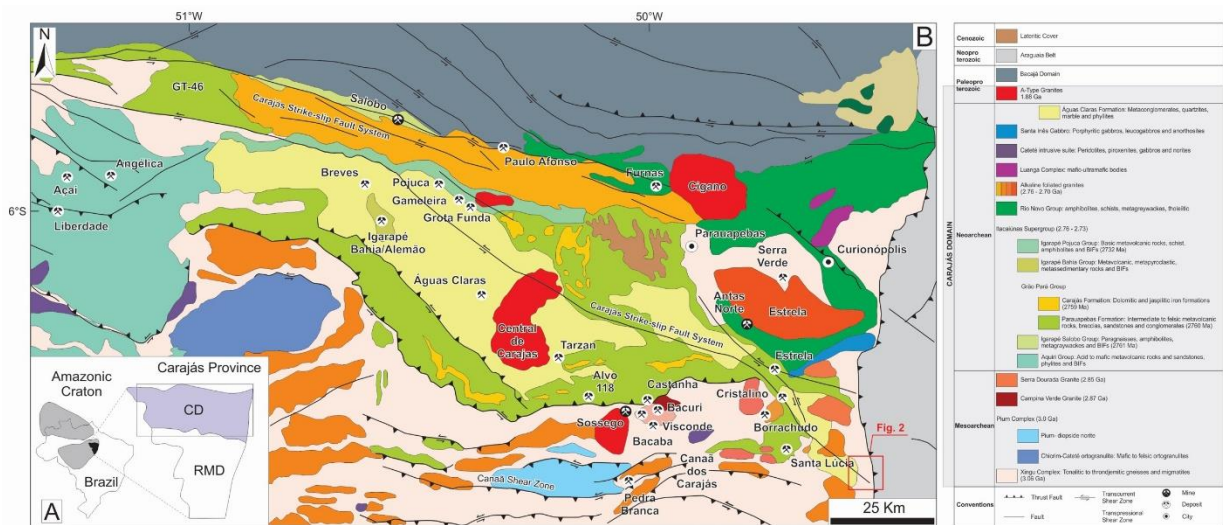


Figura 2: A–Cráton Amazônico com os Domínios Carajás (CD) e Rio Maria (RMD); B–Mapa Geológico Regional do Domínio Carajás (modificado de Vasquez *et al.*, 2008). Quadrado em vermelho destacando a área de estudos que representa a figura 2 do artigo submetido (capítulo 4).

A leste, as rochas da Província Mineral de Carajás são recobertas por metassedimentos pertencentes ao Cinturão Araguaia (Fig. 2B) de idade neoproterozóica (Moura & Gaudette 1993a), mais especificamente relacionados à Formação Couto Magalhães que é representada basicamente por filitos, ardósias, metarcósios e metacalcários que estariam depositados no topo do Grupo Tocantins. Corpos gabróicos da Suíte Xambica, com idade (U-Pb em zircão) de 820 Ma (Gorayeb *et al.* 2004), cortam as rochas supracitadas na forma de diques, sills e pequenos *stocks*. O cinturão Araguaia teria sua evolução associada a uma fase *rift* inicial com magmatismo alcalino associado, seguido por posterior inversão tectônica, com metamorfismo e deformação associada em graus variáveis promovendo na porção oeste o empurrão destas rochas no sentido NW sobre as rochas do Cráton Amazônico.

Coberturas detrito-coluvionares e extensas zonas de crostas lateríticas ocorrem de maneira abundante sobre amplas áreas do Cinturão Itacaiúnas, com melhor desenvolvimento sobre regiões planas que apresentam grande variação do regime freático.

Estruturas transcorrentes com dezenas de quilômetros compõe a compartimentação tectono-estrutural em formato de sigmoide da Província Carajás (Fig. 2B). Estas estruturas também são os principais corredores hidrotermais que afetaram o conjunto de rochas da região. Araújo *et al.*, (1988) propuseram um modelo transtensional-transpressional, sugerindo que a estrutura sigmoidal de Carajás se formou durante evento de transtensão destal, o que levou à formação da bacia que controlou o desenvolvimento dos sistemas de falhas Carajás e Cinzento, os principais corredores estruturais da região. A transpressão sinistral no sistema de cisalhamento Carajás causou uma inversão tectônica da bacia em uma estrutura em flor positiva. Já Pinheiro e Holdsworth (1997) e Domingos (2009) propuseram um modelo baseado em reativação tectônica. O modelo sugere uma bacia intracratônica formada por transposição sinistral regional que sobrepõe as rochas do embasamento, intensamente deformadas e metamorfizadas (alta T) de idade 2.850 Ma. Os sistemas de Transcorrência Carajás e Cinzento foram formados ao mesmo tempo, no entanto, várias fases de reativação sinistral e destal foram consideradas a partir de 2.700 Ma (Pinheiro e Holdsworth, 1997; Domingos, 2009). Evento de extensão crustal ocorreu em torno de 1.880 Ma (Pinheiro e Holdsworth, 1997), permitindo a colocação da Suíte Intrusiva Serra dos Carajás, bem como de outros granitos anorogênicos de idade similar associados e esse evento.

3. DEPÓSITOS TIPO IRON-OXIDE-COPPER-GOLD (IOCG)

Os depósitos hidrotermais do tipo IOCG (Iron-Oxide-Copper-Gold) foram primeiramente referidos por Hitzman *et al.* 1992, onde o autor chamou a atenção para esta classe de depósitos de origem hidrotermal, ricos em óxidos de ferro, em geral com sulfetos de cobre e ferro associados. Segundo Groves *et al.* 2010, em um trabalho de revisão, classificou os depósitos tipo IOCG *sensu stricto* como magmático-hidrotermais que contem cobre e ouro, estruturalmente controlados, em geral com volumes significativos de brecha, alteração de borda sódica ou sódico-cálcica em escala regional, e com mineralização caracterizada pela abundancia de óxidos de Fe-Ti e/ou silicatos de ferro em associação íntima com sulfetos de Fe-Cu. Ainda, dentre as características citadas por Groves *et al.* 2010 como pontos comuns na formação deste tipo específico de depósitos estão os enriquecimentos em elementos terras raras leves nos fluidos hidrotermais que formaram os depósitos, os baixos conteúdos de enxofre e as relações temporais (não espaciais) com intrusões magmáticas.

Em relação à economicidade, os maiores depósitos do tipo IOCG conhecidos são: Salobo, Cristalino, Sossego e Alemão na Província Carajás; Olympic Dam (no Cráton de Gawler) e Ernest Henry (no Distrito de Cloncurry), ambos na Austrália e Candelária–Punta del Cobre no Chile; todos com reservas minerais superando 100Mt (Williams *et al.* 2005) o que os torna parte importante das reservas mundiais de cobre.

Tectonicamente a maior parte dos depósitos do tipo IOCG estão localizados sobre margens de áreas cratônicas arqueanas e paleo a mesoproterozóicas, como no Cráton Amazônico no Brasil e no Cráton de

Gawler na Austrália, marcando faixas de idade preferenciais pré-cambrianas para os maiores depósitos deste tipo (Fig. 3). Estes depósitos teriam sido formados em períodos onde os supercontinentes já estavam aglutinados e de forma preferencial sobre regiões de bordas dos mesmos. A ocorrência em menor escala de depósitos de idade fanerozóica como os da costa do Chile e Peru marcam um contraste em relação ao ambiente de formação quando comparados aos seus análogos pré-cambrianos. Neste caso específico, os depósitos tipo IOCG estão associados a um períodos de dispersão e remobilização continental, em ambientes de arco ativo e não a um período de estabilidade tectônica como os de margens cratônicas.

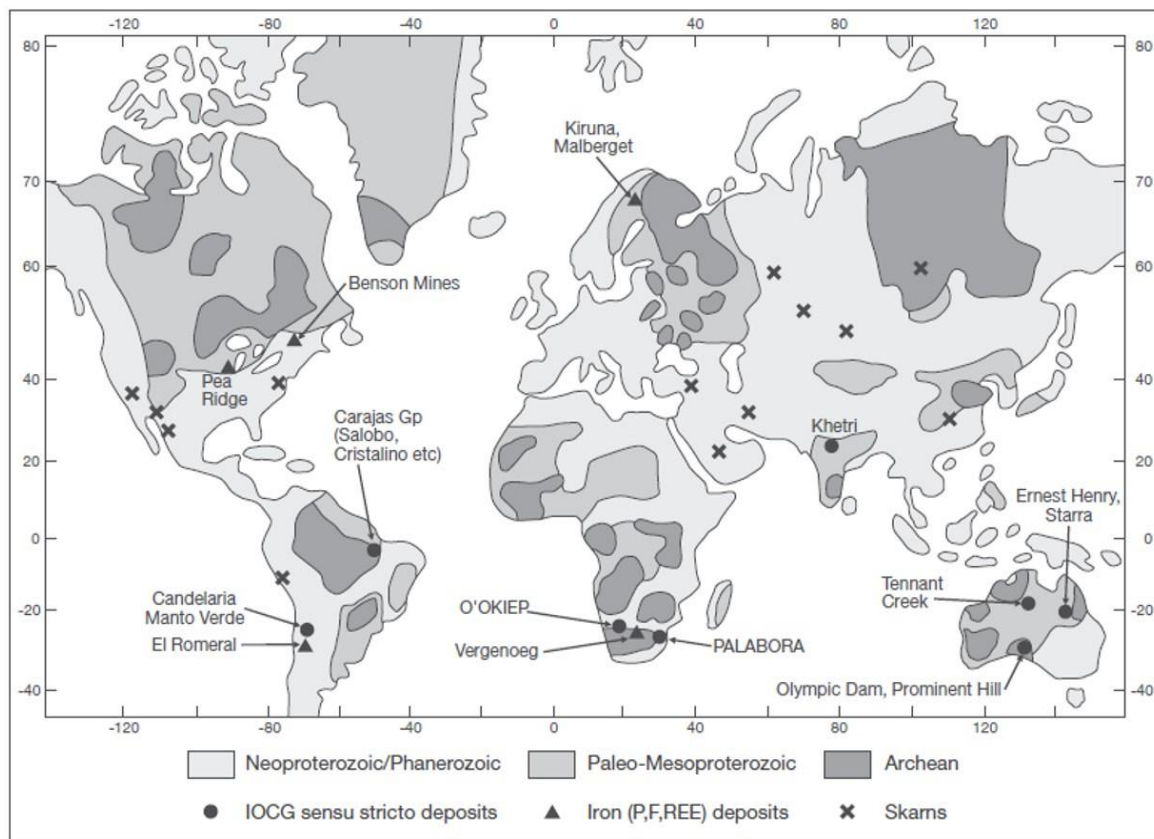


Figura 3: Distribuição geográfica de depósitos com recursos superiores a 100 Mt agrupados como IOCG, depósitos de óxido de Fe (P, F, REE) e depósitos tipo skarns. A distribuição dos depósitos é apresentada em relação à posição dos Crátons Arqueanos e Paleo-Mesoproterozóicos apresentados por Artemieva e Mooney (2001). Mapa extraído de Groves *et al.* 2010.

Os principais depósitos tipo IOCG ilustram grande diversidade geológica como um todo, pois ocorrem em uma ampla gama de rochas hospedeiras como granitoides, rochas vulcânicas básicas a intermediárias, siliciclásticas entre as mais comuns. Williams *et al.* 2005 descrevem que a idade das rochas hospedeiras pode ser muito similar à idade da mineralização (Olympic Dam, Candelária, Punta-del-Cobre) ou em outros casos pode representar um hiato (Salobo, Ernest Henry), de modo que a formação do minério também poderia se relacionar com um evento geológico em muito separado do evento que formou as rochas

encaixantes. A mineralização é interpretada como formada em uma ampla faixa de profundidade, desde 10 km (Ernest Henry) até próximo da superfície (Olympic Dam).

Os depósitos tipo IOCG mostram algumas diferenças importantes quando comparados a outros tipos de depósitos hidrotermais, uma delas com relação ao seu magmatismo associado. Apesar da comprovada existência de magmatismo félsico associado a este tipo de depósitos (comumente granitos do tipo A de afinidade alcalina a subalcalina), já são conhecidos dados petrográficos, geoquímicos e isotópicos que indicam participação de magmas básico-ultrabásicos derivados do manto, a maior parte de afinidade alcalina, na formação dos depósitos. Groves *et al* 2010 indicam que em estágios cratônicos, ocorre espessamento da crosta com consequente espessamento do manto litosférico metasomatizado, o que em presença de pequenos graus de fusão parcial poderia gerar magmas básicos-ultrabásicos de afinidade alcalina enriquecidos em voláteis e em cobre e ouro (Fig. 4A e B).

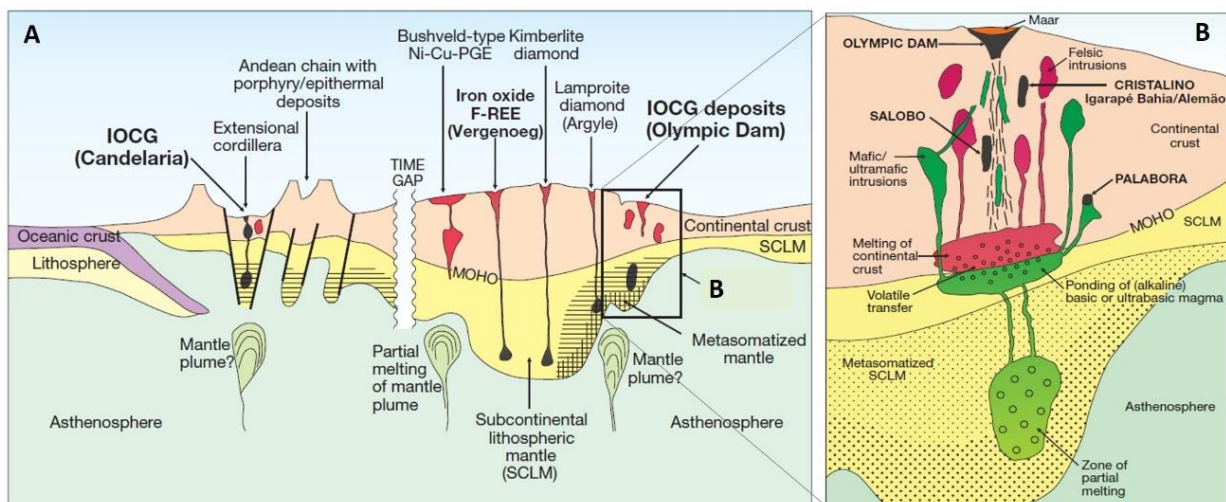


Figura 4: A–Perfil esquemático indicando o ambiente tectônico e litosférico de formação de depósitos tipo IOCG, em crátons pré-cambrianos e em posições de extensão em arcos magmáticos. Os depósitos tipo IOCG são formados em margens de crosta continental cratonizada acima da litosfera do manto metasomatizada, normalmente com idade Arqueana. (Figura modificada de Groves & Bierlein, 2007). B–Perfil esquemático de detalhe com modelo para a gênese dos depósitos tipo IOCG, onde com baixos graus de fusão parcial do manto litosférico metasomatizado é possível produzir magmas básicos-ultrabásicos, com provável afinidade alcalina e enriquecidos em voláteis, Cu e Au. (Extraído de Groves *et al.* 2010).

O enriquecimentos em Fe, Cu, Au, P, Co, Ni, Ba, As, Mo e elementos terras raras leves em depósitos tipo IOCG, bem como de outros elementos como U e Ag (Olympic Dam na Austrália e Candelária no Chile) mostram a diversidade de metais e elementos traços que ocorrem neste tipo de depósito. Esta grande diversidade provavelmente esteja relacionada ao envolvimento de magmas ultrabásicos a básicos do manto (no caso de elementos como Ni e Co) e associados a lixiviação de metais em grandes volumes de material crustal (no caso de elementos como U e Zn, por exemplo), Hitzman & Valenta, 2005.

Esse tipo particular de depósitos é estruturalmente controlado, em geral situado sobre grandes zonas de falha, zonas de cisalhamento, intersecções de estruturas, ou contatos tectônicos, que atuam como condutos para percolação dos fluidos hidrotermais mineralizantes. As rochas encaixantes e vicinais à mineralização apresentam alteração hidrotermal intensa como característica marcante dos depósitos tipo IOCG. Segundo Williams *et al.* 2005, nas zonas mineralizadas, as condições variáveis de pressão e temperatura indicadas por zonas de alteração e pela mineralização são refletidas em uma gama de depósitos que variam desde aqueles cujo óxido de Fe dominante é magnetita e a alteração é caracterizada por minerais como biotita, feldspato-K, e anfibólio para os sistemas dominados por hematita com sericita e clorita representando as principais fases de alteração silicática. Na porção distal das zonas mineralizadas, e em geral nas mais profundas, desenvolve-se uma alteração sódica a sódico-cálcica que é mais extensa quando comparada às alterações proximais (Hitzman, *et al.* 1992). As alterações sódico e/ou sódico-cálcicas costumam preceder a formação das zonas mineralizadas, conforme indicam vários trabalhos executados na Província Carajás como por exemplo de Monteiro *et al.* 2008a que descreve as alterações regionais sódicas precursoras nos corpos Pista, Sequeirinho e Baiano da Mina Sossego, e que evoluem para alterações cálcio-sódicas acompanhadas da precipitação de magnetita e apatita. Alterações com carbonatos tendem a ser posteriores às fases mineralizadas com óxidos de ferro e sulfetos de cobre. A oscilação nas condições de fO_2 - fS_2 -(T) durante a mineralização pode produzir depósitos que variam desde tipos pobres em pirita, com associações de minerais de Cu como calcopirita, bornita e calcocita (Salobo, Brasil) até tipos em que a pirita e a calcopirita são os sulfetos dominantes (Ernest Henry, Austrália).

Todos os modelos genéticos para sistemas IOCG indicam a participação de soluções altamente salinas, pobres em sulfetos, e fluidos oxidados para explicar os abundantes óxidos de Fe e baixa sulfetação. Porém, as fontes dos fluidos, as estruturas e os *traps* para a mineralização podem ser distintos para cada depósito. Evidências obtidas em inclusões fluidas sugerem que soluções com alta salinidade, comumente com um componente carbônico, estariam sempre envolvidas na gênese dos depósitos tipo IOCG (Williams *et al.* 2005). No entanto, as fontes de água, CO₂, metais, enxofre e da própria salinidade não seriam restritas, sendo possível que esses componentes tenham origens diferentes na composição do fluido. Barton & Johnson 2004, defendem que para cada fonte de fluido, seja ela de origem magmática, metamórfica ou bacinal, existirá uma geometria da alteração, das zonas mineralizadas e uma paragênese de alteração hidrotermal distinta, conforme indicado na figura 5. Esta afirmação evidencia a enorme gama possível de depósitos tipo IOCG com características distintas, porém, sempre matendo o preceito básico do enriquecimento em óxidos de ferro e baixo enxofre.

A diversidade das características que participam da formação dos depósitos tipo IOCG e os seus sistemas complexos representa um desafio contínuo na busca do seu conhecimento e entendimento. Embora exista um amplo acordo sobre o que geralmente constitui essa família de depósitos, há pouco consenso sobre as características dos sistemas geológicos e dos processos que os formam, fato que torna o estudo deste tipo de depósitos algo realmente necessário e desafiador.

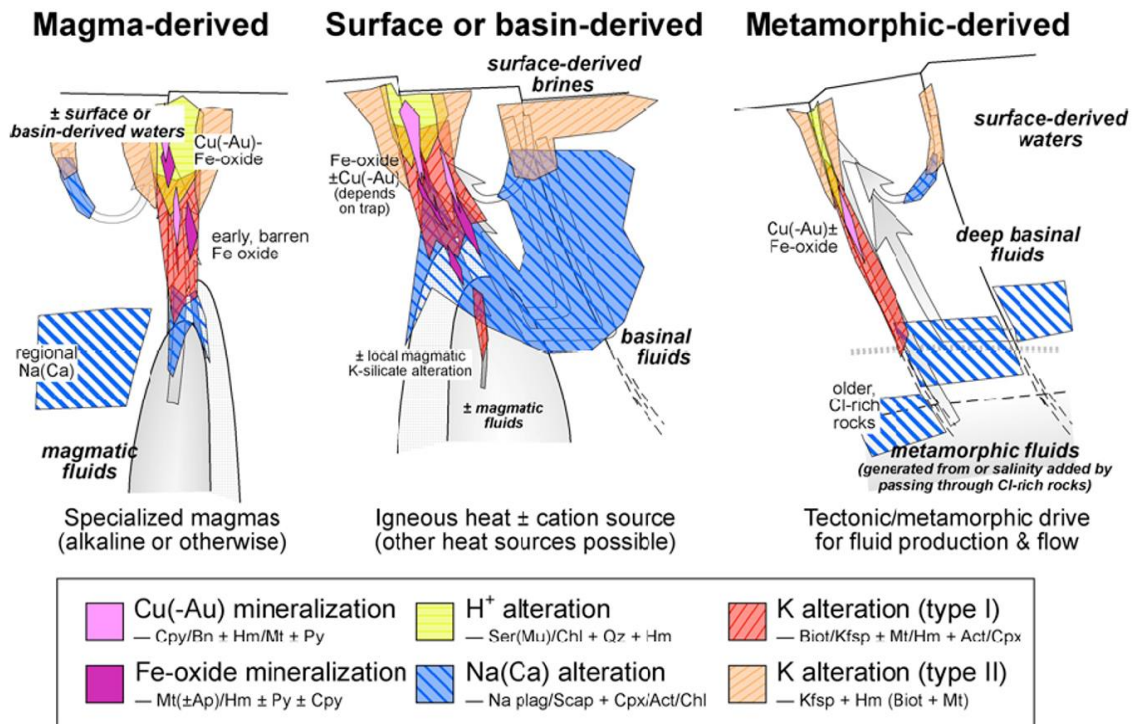


Figura 5: Desenho esquemático identificando as possíveis fontes de fluidos formadores dos depósitos tipo IOCG, com a geometria das alterações e corpos mineralizados que poderiam ser formados para cada fonte. Extraído de Barton & Johnson, 2000.

4. ARTIGO: “HYDROTHERMAL CHARACTERIZATION OF THE RIO VERMELHO PROSPECT: A NEW IOCG MINERALIZATION IN THE CARAJÁS PROVINCE”

CARTA DE ACEITE DE SUBMISSÃO DO ARTIGO:

Successfully received: submission HYDROTHERMAL CHARACTERIZATION OF THE RIO VERMELHO PROSPECT: A NEW IOCG MINERALIZATION IN THE CARAJÁS PROVINCE for Journal of South American Earth Sciences

Yahoo/Entrada

1. **Journal of South American Earth Sciences** <EvisSupport@elsevier.com>

Para:geoezequiel@yahoo.com.br

24 de jan às 11:56

This message was sent automatically. Please do not reply.

Ref: SAMES_2018_31

Title: HYDROTHERMAL CHARACTERIZATION OF THE RIO VERMELHO PROSPECT: A NEW IOCG MINERALIZATION IN THE CARAJÁS PROVINCE

Journal: Journal of South American Earth Sciences

Dear Mr. Pozocco,

Thank you for submitting your manuscript for consideration for publication in Journal of South American Earth Sciences. Your submission was received in good order.

To track the status of your manuscript, please log into

EVISE® at: http://www.evise.com/evise/faces/pages/navigation/NavController.jspx?JRNL_ACR=SAMES and locate your submission under the header 'My Submissions with Journal' on your 'My Author Tasks' view.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,

Journal of South American Earth Sciences

Have questions or need assistance?

For further assistance, please visit our [Customer Support](#) site. Here you can search for solutions on a range of topics, find answers to frequently asked questions, and learn more about EVISE® via interactive tutorials. You can also talk 24/5 to our customer support team by phone and 24/7 by live chat and email.

Copyright © 2018 Elsevier B.V. | [Privacy Policy](#)

Elsevier B.V., Radarweg 29, 1043 NX Amsterdam, The Netherlands, Reg. No. 33156677.

HYDROTHERMAL CHARACTERIZATION OF THE RIO VERMELHO PROSPECT: A NEW IOCG MINERALIZATION IN THE CARAJÁS PROVINCE

Ezequiel Pozocco ^{a*}, José Carlos Frantz^b, Juliana Charão Marques^b

a. Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, 91501-970, RS, Brazil.

b. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Avenida Bento Gonçalves 9500, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brazil

* Corresponding author: e-mail geoezequiel@yahoo.com.br . Address: Estrada João de Oliveira Remião, nº 1761, casa 10, Porto Alegre, 91550-000, RS, Brazil

HIGHLIGHTS

- New IOCG mineralization characterized in the eastern border of the Carajás Province;
- Copper mineralization associated to iron oxides;
- Chlorite generation in two phases: pre- and syn-mineralization;
- Shallow IOCG dominated by hematite;

ABSTRACT

The Rio Vermelho prospect is located in the eastern sector of the Carajás Mineral Province, near to the contact with the metasediments of the Araguaia Fold Belt. The mineralization is located in a horse splay zone of the Carajás Fault, near to the Cristalino IOCG deposit (Huhn et al. 1999). The ore is hosted by Archean deformed granitoids affected by multi-stages hydrothermal alteration controlled by a NNW-SSE structures. Geological surface and subsurface survey and detailed petrography coupled with mineral chemistry analyzes allowed the identification of different hydrothermal stages. The hydrothermal alteration starts with a sodic system with albite and quartz substituting the original feldspars. The sodic alteration is preserved in distal areas. Potassification, represented by the crystallization of microcline together with quartz, overprints the albite paragenesis and occurs proximal to the ore zone. Chloritization occurs in two different moments, pre- and syn-mineralization. The pre-mineralization is characterized by

lamellar chlorite associated with epidote and quartz. The syn-mineralization is marked by fibro-radial chlorite, enriched in Fe-Al and Mn, and associated with iron oxide and copper sulfides filling veins and breccias. Before the mineralization stage, silicification marks the beginning of the brecciation phase producing quartz veins. The copper mineralization stage, with ore filling breccias dominated by chalcopyrite with subordinate bornite, occurs associated with iron oxides, with abundant hematite and subordinate magnetite. Sericitization with epidote and carbonate is a post-mineralization process and characterizes the last hydrothermal alteration phase. The hydrothermalism starting with sodic phases and ending with sericite marks a temperature ranging from 600 to 250°C. The transition from high temperature sodic and potassic alteration to low temperature in the ore zone in a ductil-ruptil environment, suggest an input of oxidized meteoric water. The hematite derived from magnetite transformation indicates extremely oxidized fluids and suggests a depositional temperature < 350° during the ore formation. The hydrothermal characteristics of the copper mineralization of the Rio Vermelho Prospect suggest a shallow IOCG type dominated by hematite. Its regional position at the borders of the Araguaia Fold Belt, but not affected by the Neoproterozoic processes, opens a new area for exploration in the easternmost part of the Carajás Domain.

KEYWORDS

Rio Vermelho; IOCG; Carajás Province; Copper Mineralization.

1. INTRODUCTION

The Carajás Mineral Province is one of the most important global metallogenetic province containing iron ore deposits and gold, platinum, palladium, manganese and important copper reserves. In the last years, the new copper deposits have been grouped in a particular class, the IOCG (Iron Oxide-Copper-Gold) (Grainger et al., 2008, Xavier et al., 2012), one of the most important mineralization styles in today's exploration scenario due to the possibility of hosting large tonnage and expressive metal content. Several world class deposits have been discovered in Carajás, like the well known Salobo, Sossego, Cristalino, Alvo 118 and others. The entire province sums approximately 4000 Mton of copper ore, a fact that makes Carajás Province the most prospective environment for this metal in the country. In

this context, the recent discovery of the Rio Vermelho copper mineralization, 25km east of the giant Cristalino Deposit that hosts 500 Mt @ 1.0% Cu, 0.3 g/tAu (Huhn et al., 1999), and at the extreme eastern border of the Carajás Domain where no other IOCG prospect have been previously described, represents an important finding and an excellent target to be explored although still requiring further studies.

The main objective of this work is to characterize this new identified mineralization, describing the hydrothermalism processes and the copper ore mineralization of the Rio Vermelho Prospect based on a detailed geological and petrographic study. A detailed geological survey together with petrography and mineral chemistry analyzes provide a novel data collection allowing comparisons to other Cu deposits of the Province. The better understanding of the Rio Vermelho copper mineralization system provides important prospecting information for the Carajás Mineral Province amplifying the geological knowledge of the region and extending the exploration to its eastern part.

2. REGIONAL GEOLOGIC CONTEXT

The Carajás Mineral Province is located in the southeast Amazonian Craton and is part of the Central Amazon Province. It was formed and tectonically stabilized in the Archean and is divided into two distinct segments: the south, named as Rio Maria Granite-Greenstone Domain, and north, represented by the Carajás Domain (Vasquez et al., 2008), where the Cu mineralization occur, including the Rio Vermelho mineralization (Fig. 1A). The Rio Maria Granite-Greenstone is formed by volcano-sedimentary Greenstone Belt sequences and granitic intrusions. The Carajás Domain is constituted by basement rocks of the Xingu (Silva et al., 1974) and Pium Complexes (Araújo et al., 1988, DOCEGEO 1988), covered by the supracrustal rocks of the Itacaiúnas Supergroup and intruded by several granitic bodies (Fig.1B).

The Xingu Complex has a variety of lithologies and structures and hosts the studied mineralization. The Complex was denominated by Silva et al., (1974) as a group of polymorphic/polydeformed granodioritic rocks occurring in a large region in the southern part of the Amazon Craton. It is also constituted by tonalitic to granodioritic gneisses with local deformed granitic

rocks. The Pium Complex lithologies form generally elongated bodies with approximate orientation E-W and represent fragments of lower crust, embedded along big shear zones (Araújo et al., 1988). The 2858 ± 9 Ma Pb-Pb dating obtained in total rock (Pidgeon et al., 2000) is interpreted as the age of crystallization from the granulite igneous protolith. U-Pb zircon dating of the Xingu Complex (basement from the Carajás Domain) provided an age of 2859 ± 2 Ma, suggested as the age of the migmatization (Machado et al., 1991).

The Itacaiúnas Supergroup (DOCEGEO, 1988) includes all volcano-sedimentary sequences from the Carajás Domain showing different metamorphic and deformation conditions – Igarapé Salobo, Grão-Pará Group, Igarapé Bahia, Igarapé Pojuca, Buritirama group and mafic-ultramafic intrusions. It is common the presence of expressive basic volcanism in the base of the supracrustal units of the Supergroup, with intercalations of sedimentary chemical rocks. The Itacaiúnas Supergroup covers the Xingú and Pium basement rocks from the Carajás Domain.

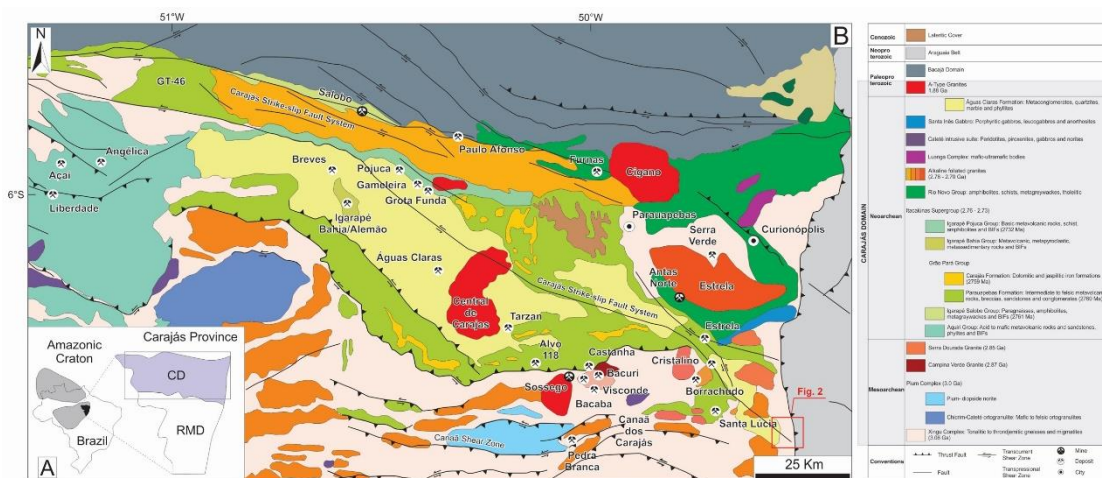


Figure 1. A – Amazonian Craton showing the Carajás (CD) and Rio Maria (RMD) Domains; B – Geological Map of the Carajás Domain (modified from Vasquez et al., 2008). Inset showing the position of the studied area to be detailed in figure 2.

The Grão-Pará Group hosts the most expressive iron deposits while the Buritirama Group holds the main manganese mineralization. The other groups have gold and base metal sulphides mineralization. The mafic-ultramafic intrusions of the Itacaiúnas Supergroup, such as Luanga Complex (2763 ± 6 Ma, U-Pb in zircon, Machado et al., 1991), Vermelho and Onça-Puma, contains Pt-Pd and nickel deposits

(Ferreira Filho et al., 2007). Dykes and gabbroic sills related to these intrusions were dated and provided ages ranging from 2.76 to 2.65 Ga (Dias et al., 1996; Galarza & Macambira 2002; Pimentel et al., 2003). Some gabbroic intrusions, especially those crystallized at ~ 2.76 Ga, were considered to be cogenetic with metavolcanic rocks of the Igarapé Salobo-Pojuca Group (Pimentel et al., 2003; Marschik et al., 2005).

The Itacaiunas Supergroup units are overlapped discordantly by sandstones and siltstones, from fluvial to shallow marine environments from the Rio Fresco Group (DOCEGEO 1988) or Aguas Claras Formation (Araujo & Maia 1991; Nogueira & Truckenbrodt 1994; Nogueira et al., 2000). The age of 2681 ± 5 Ma (SHRIMP U-Pb zircon, Trendall et al., 1998) was obtained from sandstone detritic zircons interpreted as apparently derived from a syn-depositional volcanism, defining the basin depositional age.

Deformed archaean granitoids, which includes the Plaquê Suite (Araújo et al., 1988), Estrela Complex (2.7-Ga), Planalto Granite (2747 ± 2 Ma, Pb-Pb in zircon, Huhn et al., 1999), Diorito Cristalino (2738 ± 6 Ma, Pb-Pb in zircon; Huhn et al., 1999), Old Salobo (2573 ± 2 Ma, U-Pb in zircon; Machado et al., 1991) and Granito Itacaiúnas (2560 ± 37 Ma, Pb-Pb in zircon; Souza et al., 1996) are all intrusive in the Xingu Complex and in the Itacaiúnas Supergroup, and mark important Archean magmatic events with associated copper mineralization in the Carajás Mineral Province.

Paleoproterozoic type A intra-plate alkaline to sub-alkaline anorogenic granitic intrusions, like the Carajás Central Granite, Young Salobo, Pojuca, Cigano and Breves (~ 1.88 Ga; Machado et al., 1991; Dall'Agnol et al., 1994; Tallarico et al., 2004) are considered the last magmatic event on the Carajás Mineral Province. This magmatic event is related to the second expressive pulse of copper mineralization.

In the extreme east, the Carajás Province is covered by metasediments of the Couto Magalhães Formation from the Neoproterozoic Araguaia Belt (Moura & Gaudette 1993a), a NW-verging thrust belt over the Amazonian Craton. The rocks are phyllites, metagrawakess, metasilstones and metacalcareous. The metasediments are crosscut by gabbroic dikes, sills and small stocks from the Xambioa Suite (820 Ma; Gorayeb et al., 2004). The regional structures in the Carajás domain are characterized by E-W and ESE-WNW trends. The shear zones mark the contact between the metavolcano-sedimentary units of the

Itacaiúnas Supergroup (ca. 2.73–2.76 Ga) and Mesoarchean basement rocks (ca. 3.0–2.83 Ga; Machado et al., 1991; Pidgeon et al., 2000; Feio, 2011; Moreto et al., 2011a, b).

Araújo et al., (1988) proposed a transtensional-transpressional model suggesting that the Carajás sigmoidal structure was formed during dextral transtension that led the formation of a pull-apart basin developing then the Carajás and Cinzento fault systems. Sinistral transpression in the Carajás shear system caused a tectonic inversion of the basin in a positive flower structure.

Pinheiro and Holdsworth (1997) and Domingos (2009) proposed a model based in a tectonic reactivation. The model suggests an intracratonic basin formed owing a regional sinistral transpression that overlays the intensely deformed and metamorphosed (high-T) basement rocks aged ca. 2.85 Ga. Under regional brittle dextral transtension around 2.8 to 2.7 Ga, the volcanic-sedimentary rocks deposited within the Carajás sigmoidal structure during a tectonic subsidence. The Carajás and Cinzento strike-slip fault systems were formed at the same time, however several phases of sinistral and dextral reactivation were considered to have occurred since ca. 2.7 Ga (Pinheiro and Holdsworth, 1997; Domingos, 2009). A crustal extension took place around 1.8 Ga allowing the emplacement of the Serra dos Carajás Intrusive Suite and other anorogenic granites.

3. THE IOCG DEPOSITS FROM CARAJÁS

The IOCG deposits are characterized by expressive iron oxide concentrations, more than iron sulfides, associated with copper sulfides. Several world-class IOCG deposits (>100Mt) have been discovered in the Carajás Mineral Province since 70's. Deposits like the Sossego (245 Mt @ 1.1% Cu and 0.28 g/t Au, Lancaster et al., 2000); Salobo (789 Mt @ 0,96% Cu and 0,52g/t Au; Souza & Vieira 2000); Cristalino (500 Mt @ 1,0% Cu and 0,3g/t Au; Huhn et al., 1999), Igarapé Bahia–Alemão (219 Mt @ 1,4% Cu and 0,86g/t Au; Tallarico et al., 2005), Gameleira (100 Mt @ 0,7% Cu; Rigon et al., 2000) and Alvo 118 (70 Mt @ 1,0% Cu and 0,3 g/t Au; Rigon et al., 2000) exemplify the important regional IOCG discoveries.

The IOCG deposits from the Carajás Province show major similarities with other well known IOCG deposits worldwide such as: (i) association with shear zones; (ii) intrusive suits vicinity; (iii) variable host rocks (volcano-sedimentary sequences, granites, basement gneisses, mafic-ultramafic rocks; (iv) strong hydrothermal alteration, that are pervasive and widespread; (v) strong Fe- and LREE-enrichment, commonly associated to anomalous Co and U (Grainger et al., 2008); (vi) wide range of crystallization temperature and salinity conditions suggesting fluid mixing (Monteiro et al., 2008a). Widespread sodic and calcic hydrothermal zones, another common characteristic of the IOCG deposits, have also been identified and described in the Carajás Province, mainly represented by scapolite and albite (Sousa 2007, Monteiro et al., 2007). Boron isotopes in the mineralization fluids (Xavier et al., 2006, 2008) suggest participation of marine evaporates, similar to other world-class IOCG provinces. Volcanogenic metallogenic models were also proposed (Lindenmayer 1990, Villas & Santos 2001, Dreher 2004, Dreher et al., 2008) for some deposits like the Salobo and Igarapé-Bahia, however the characteristics of these deposits were considered more similar to those expected for the IOCGs (Grainger et al., 2008).

Xavier et al., (2012) divide the IOCG deposits from the Carajás Province in two sectors, northern and southern, both controlled by kilometric shear zones systems. The Cinzento shear zone in the northern sector hosts deposits like the Salobo and GT46. The southern sector, controlled by the Carajás strike-slip shear zone, hosts the Alvo 118, Sossego, and Cristalino deposits, together with several other satellite deposits (e.g., Visconde, Castanha, Bacaba, Jatobá, Bacuri).

In the Carajás Mineral Province, the genesis of the IOCG deposits have been related to three different granitic generation episodes that occurred at 2.76 Ga (Galarza et al., 2003), 2.57Ga (Réquia et al., 2003, Tallarico et al., 2005, Grainger et al., 2008) and 1.88 Ga (Pimentel et al., 2003), respectively.

4. METHODOLOGY

Geological mapping at the Rio Vermelho Prospect have been carried out and complemented with information from detailed drill core logging. Detailed petrographic survey were performed in samples (12 thin sections) from a selected drill core. The petrographic studies were performed under transmitted and reflected light microscope. Scanning Electron Microscope (SEM) studies gave support to a more detailed

characterization of the hydrothermal paragenesis and the ore assemblages. The instrument used to support the petrographic studies was a JEOL 6610-LV equipped with a Bruker Nano XFlash 5030 energy dispersive spectrometer (EDS) detector at the Laboratório de Geologia Isotópica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Microprobe analyzes were carried out only for chlorites at the Department of Geological Sciences and Geological Engineering of the Queen's University on a fully automated JEOL PC-EPMA version 1.11.2.0 instrument. The wavelength dispersive analyses were performed at an operating voltage of 15kV and a beam current of 10 nA.

5. RESULTS

5.1 GEOLOGICAL CONTEXT FROM THE RIO VERMELHO PROSPECT

The region marks an important contact between two distinct groups: the Xingu Complex, basement of the Carajás Province (western part) and the Couto Magalhães Formation, part of Araguaia Fold Belt (eastern area) (Fig. 1). Deformed granites in the western portion and metasedimentary rocks in the eastern portion of the study area (Fig. 2) dominate the geology of the Rio Vermelho Prospect. The terrain morphology is plain and the rocks are extensively covered by laterite duricrust associated to colluvial/alluvial soils. The Xingu Complex is represented by the deformed granites and minor structurally controlled intrusive diorites and metagabbros and will be described in further detail considering are the host rocks of the mineralization. The Couto Magalhães Formation are locally represented by siltstones and pelites with subordinate quartzites. The entire sedimentary sequence were metamorphosed under low-grade conditions and present foliation oriented in N20-40E directions, plunging gently (15 - 30°) to southeast. Vasquez et al., (2008) considers that the low angle foliation results from a thrust of the Araguaia fold belt over the rocks of the Carajás Domain. Quartz veins parallel to the main foliation locally occurs. Younger mafic intrusions, represented by gabros and pyroxenites occur, in the southern part of the area crosscutting both the Xingu Complex and the Couto Magalhães Formation rocks (Fig. 2). These mafic rocks occur like intrusive dikes, oriented N-S, with magmatic texture and original minerals completely preserved. Sulfides represented by pyrrhotite and pyrite occur in trace concentrations and are related to the magmatic event.

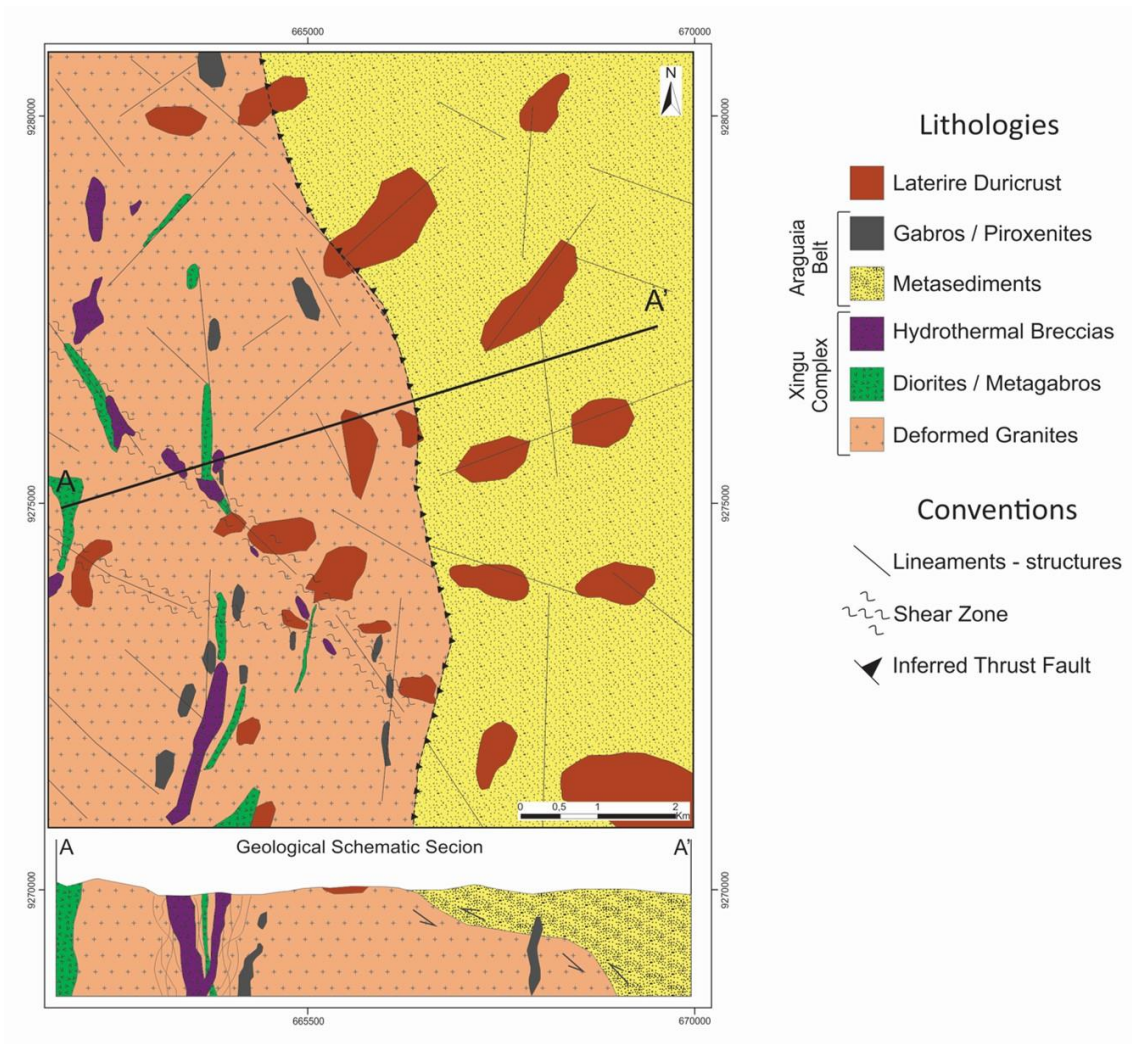


Figure 2. Geological map and schematic geological section of the Rio Vermelho Prospect. (modified from Codelco 2015).

5.2 HOST ROCKS

In the Rio Vermelho Prospect, the copper mineralization is hosted by strongly hydrothermalized deformed granitic rocks controlled by NW-SE structures that constitute an important regional corridor where the mineralization fluids have percolated. This regional structure hosts other important copper occurrences like the Cristalino, Alvo 118 and Sossego deposits (Fig. 1).

The granites dominate the western part of the area and are generally granodiorites deformed in ductil/rupitil regime, composed essentially by quartz-plagioclase-biotite-K_feldspar-chlorite. The regional foliation that affects the granitoids is a tectonic SC type, generally oriented N70-80W. Quartz veins follow a NNW-SSE direction that is the same of the hydrothermal breccia bodies that occurs inside the

granite. The breccias are characterized by quartz and granite fragments with chlorite-hematite-quartz-magnetite-epidote infill with common presence of sulfide box works. The hydrothermal events that affect these rocks include pervasive sodic alteration with albite precipitation followed by potassification with K-feldspar and brecciation with chlorite-hematite-quartz-magnetite-epidote cement and sulfides remains.

Intrusive diorites and metagabbros are very usual in the area and are correlated to the Xingu Complex. These rocks occur as dykes following the two main structures, one NW-SE and another NE-SW. The dykes show deformed borders and original textures preserved in the center of the bodies. The main hydrothermal assemblage is represented by albite and actinolite in a stockwork followed by quartz and magnetite. The presence of sulfides (pyrite and chalcopyrite) along the veins is common.

5.3 HYDROTHERMAL ALTERATION ZONES

The hydrothermal alteration on the Rio Vermelho Prospect is more intense along the NNW-SSE structures that control the regional fluid corridor. The hydrothermal zones are vertical and controlled by ruptil-ductil shear zones where breccias occur. Albitization (sodic alteration) is considered a distal hydrothermal halo followed by potassification (k-feldspar) that is more proximal to the copper ore mineralization. In the copper ore zone, a chloritization associated with iron oxide occurs simultaneously to the ore deposition as matrix and infill of a breccia system. The spatial relationship of the different hydrothermal alteration zones with the ore is well represented in figure 3 that exhibits the geological vertical variation along a drill core.

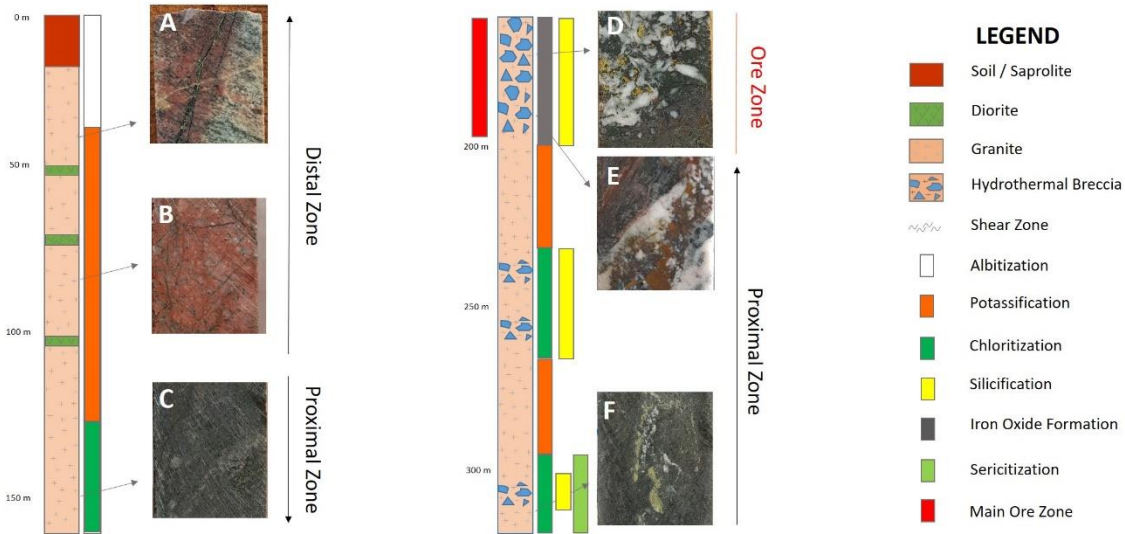


Figure 3. Main hydrothermal alteration sequences observed in granitic host rocks of the Rio Vermelho Prospect (drill hole II). A - Albitized zone (ab+qtz) in white color cutted by potassic halo in red color with kf+ab+qtz; B - Pervasive potassic zone (kf+ab+qtz) cutted by chl and qtz stockwork veinlets; C - Pervasive chloritization with chl+ep with recrystallized milky qtz from the original granite; D - Hydrothermal breccia with qtz clasts and infill of chl+mt+hm+msk+ep with cpy. Initial silicification is represented by the qtz clasts at the breccia; E - Hydrothermal breccia with chl+hm+mt+msk matrix crosscutted by qtz+cpy+bn vein; F - Pervasive chloritization with intense presence of se+ep+cb phase. (ab = albite; kf = potassic feldspar; chl = chlorite; qtz = quartz; ep = epidote; hm = hematite; msk = musketovite; mt = magnetite; cpy = chalcopyrite; bn = bornite; se = sericite; cb = carbonate)

The first stage of hydrothermal alteration is a sodic alteration characterized by an albitization, represented by white xenomorphic to hipidiomorphic coarse-grained albite associated with quartz that occur substituting original feldspars of the host rock (Fig. 4A). This type of alteration occurs regionally in the granites. In the diorites, the sodic alteration is represented by actinolite that occurs together with magnetite-quartz filling a stockwork vein system. The second stage of hydrothermal alteration is a potassification represented by the crystallization of medium to fine grained microcline with quartz and albite (Fig. 4B). This phase occurs as alteration fronts over the first albitization phase. Intense reddish color of the granite (Fig. 3B) characterizes this type of alteration and occurs due the precipitation of a fine hematite “dust” over the grains. The potassification occurs at the margins and near to the central main halo where the ore zone is hosted.

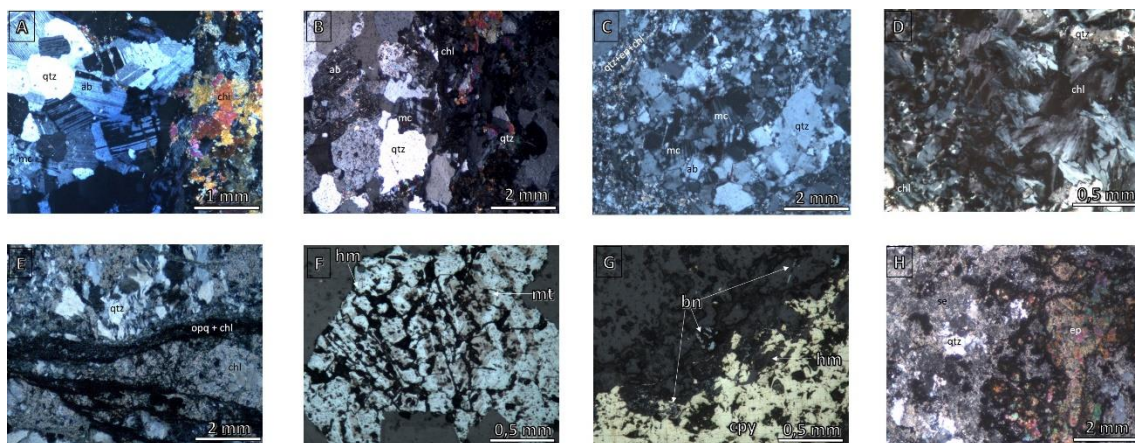


Figure 4. A – quartz plus albite formation on center and chlorite in the right border; B – microcline with quartz crystallization over pre-existing quartz-albite; C – intense quartz formation with posterior epidote-chlorite over microcline-albite; D – chlorite fibroradial over recrystallized quartz; E – recrystallized quartz with lamellar chlorite crosscutted by fibroradial chlorite with opaque minerals; F – detail from transformation of magnetite to hematite; G – hematite with bornite inclusions and chalcopyrite with hematite inclusions; H – last phase epidote and sericite over pre-existing plagioclase. (ab = albite; mc = microcline; chl = chlorite; qtz = quartz; ep = epidote; opq = opaques; hm = hematite; mt = magnetite; cpy = chalcopyrite; bn = bornite; se = sericite)

The next stage of hydrothermal alteration is a chloritization, but it occurs in two different episodes, one pre-mineralization and other syn-mineralization. The first stage of chloritization begins with chlorite I-epidote-quartz in a stockwork and advances to a more pervasive chloritization (Fig. 4C). In this first moment, chlorite I occurs as lamellar grains with epidote and quartz. The second episode of chloritization is easy to be identified owing to the presence of fibro-radial crystals (chlorite II) (Fig. 4D). This second episode differs from the first in style and association. The fibro-radial chlorite occurs with iron oxide and copper sulfides filling veins and breccias (Figs. 5A, 5B and 5D). Silicification is an important stage of alteration because provokes an intense fracturing of the host rock opening significant conduits to the ore fluids. Quartz occurs in veinlets and veins that are not abundant in distal zones but start to be very common when more proximal to the ore zones. Quartz occurs as medium grained completely recrystallized minerals and is correlated to the first stage of brecciation (Fig. 4D). Areas more intensively silicified are the best sites for subsequently ore formation.

Iron oxide formation is characterized by hematite-musketovite with subordinate magnetite that occurs associated to fibro-radial chlorite and epidote in breccias and veins (Fig. 4E). The transformation of magnetite to hematite is showed in Figure 4F. The copper mineralization, represented by major chalcopyrite and minor bornite, takes place simultaneously to this stage and are normally associated to the iron oxide paragenesis (Fig. 4G). The mineralization occurs disseminated in veins, veinlets and in breccias always associated to chlorite and iron oxides or quartz. Chalcopyrite is the earliest sulfide and is followed by subsequent precipitation of minor bornite (Fig. 5A). Accessory minerals observed using

Scanning Electron Microscope (SEM) are molybdenite and galena that occur associated to recrystallized quartz grains (Figs. 5A and 5C).

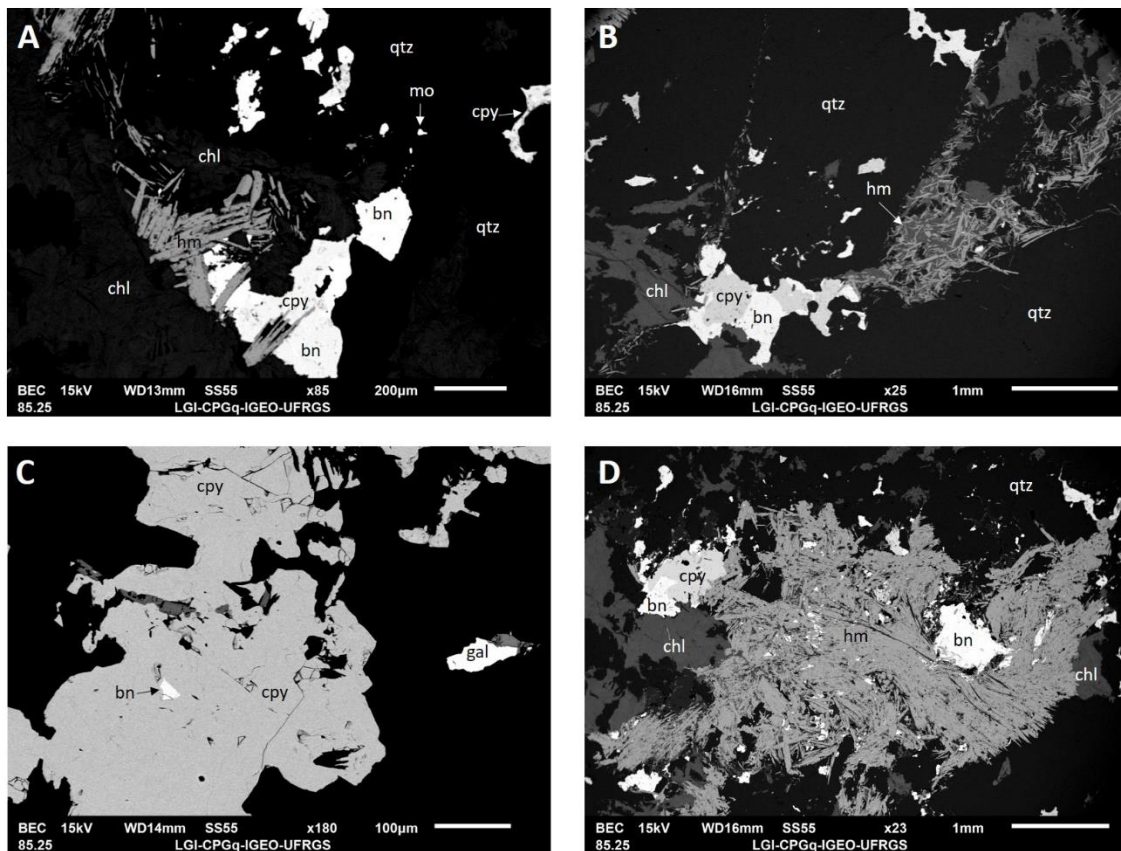


Figure 5. A – quartz (with molibdenite inclusions) grains crosscutted by chlorite plus hematite with chalcopyrite and bornite; B – intense fibrous hematite with cpy and bn cutting pre-existing chlorite and quartz; C – cpy with bornite and galena inclusions; D – quartz cutted by strong chlorite and hematite halo with chalcopyrite and bornite. (chl = chlorite; qtz = quartz; hm = hematite; cpy = chalcopyrite; bn = bornite; gal = galena; mo = molibdenite)

The last hydrothermal alteration episode in the Rio Vermelho Prospect is the sericitization. Is a post-mineralization stage and is represented by pervasive sericite formation replacing plagioclase and chlorite grains (Fig. 4H). Epidote and subordinated carbonate veins occur during this late alteration stage.

5.4 MINERAL CHEMISTRY (Electron Microprobe Analysis -EMA)

Chlorite is an important hydrothermal mineral in the Rio Vermelho Prospect considering it is correlated to distinct hydrothermal alteration stages of the Rio Vermelho Prospect. Representative analyzes from the two different chlorite phases identified in the petrography were obtained by electron microprobe (EMA). The chlorite I, from the pre-mineralization stage, is represented by light green lamellar crystals (Fig. 6A) that occurs associated with epidote and recrystallized quartz in veinlets, narrow veins and hydrothermal fronts. The chlorite II, from the mineralization stage, is green fibro-radial crystals (Fig. 6B) and occurs associated to iron oxide minerals and sulfides like infill in breccias.

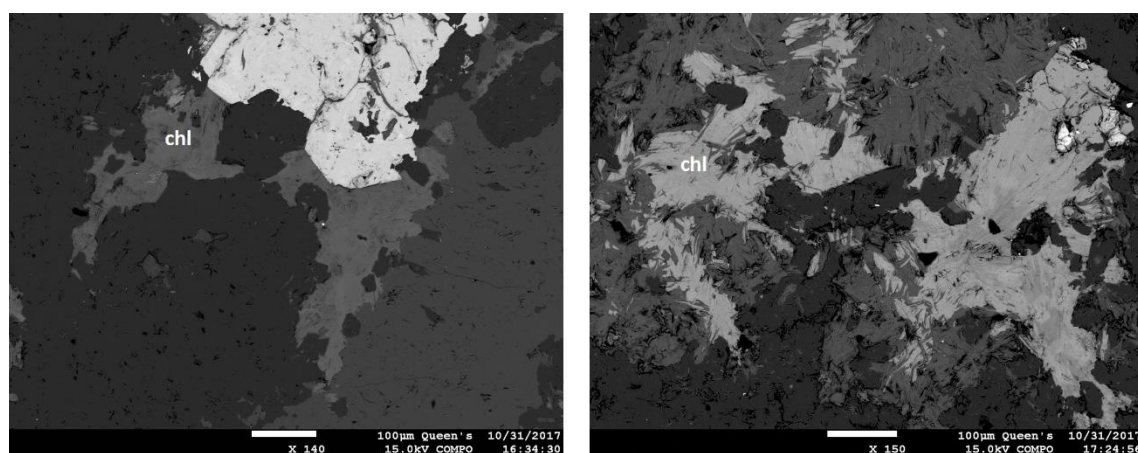


Figure 6. A – Backscattering image showing typical lamellar chlorite analyzed by microprobe from the Rio Vermelho Prospect pre-mineralization chloritization stage; B – Backscattering image showing fibroradial chlorite analyzed by microprobe from the Rio Vermelho Prospect syn-mineralization chloritization stage. (chl = chlorite)

The general formula used to calculate chlorites in this work is based on 14 equivalent oxygen - $(\text{Mg,Al,Fe})_{4-6} (\text{Si,Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_8$ ou $(\text{Mg,Al,Fe,Mn,Ti})_{4-6} (\text{Si,Al})_4 (\text{O,OH,F,Cl})_{14}$.

Table I shows examples of two average composition, representatives of chlorite I (lamellar) and II (fibro-radial), and their respectively formula. Both types of chlorite are classified as ripidolites.

Table I: Representative microprobe analyses of lamellar and fibro-radial chlorites from the Rio Vermelho Prospect.

	<u>Si⁴⁺</u>	<u>Al^{IV}</u>	<u>Al^{VI}</u>	<u>Al^{Tot}</u>	<u>Ti⁴⁺</u>	<u>V³⁺</u>	<u>Fe²⁺</u>	<u>Mn²⁺</u>	<u>Mg²⁺</u>	<u>Ca²⁺</u>	<u>Ba²⁺</u>	<u>Na⁺</u>	<u>K⁺</u>	<u>F⁻</u>	<u>Cl⁻</u>	<u>Total cations</u>
Lamellar Chlorite	2,732	1,268	1,29	2,558	0,003	0,001	3,008	0,076	1,602	0,001	0	0,003	0,004	0	0,008	9,981
Fibroradial Chlorite	2,644	1,356	1,405	2,761	0,003	0	3,751	0,172	0,63	0,003	0	0,011	0,005	0,109	0,007	9,965

Lamellar Ripidolite (Fe_{3,008} Mg_{1,602} Al_{1,290} Mn_{0,076} Ti_{0,003})_{5,979} (Si_{2,73} Al_{1,268})₄ (O, OH, Cl)₁₄

Fibroradial Ripidolite (Fe_{3,751} Al_{1,405} Mg_{0,630} Mn_{0,172} Ti_{0,003})_{5,961} (Si_{2,644} Al_{1,356})₄ (O, OH, F, Cl)₁₄

The main differences observed indicate that lamellar chlorite I tends to have higher Si values than the fibro-radial chlorite II, whereas this last type is more aluminous for both Al^{IV} and Al^{VI}, a fact that can be visualized in the Si versus Al^{Tot} diagram in Figure 7A. There is a positive correlation between Fe and Al in the fibro-radial chlorite II, while this correlation is erratic or inexistent for the lamellar chlorite I (Fig. 7B). Mg and Al indicate an opposite correlation, with decrease of Mg and increase of Al in the fibro-radial chlorite II, while the correlation is also erratic or nonexistent in lamellar chlorite I (Fig. 7C). The erratic behavior or non-correlation of Al with Fe and Mg in lamellar chlorite indicates that Al variations in this type of chlorite are possibly related to substitutions between Al^{IV} and Si at the tetrahedral site. The correlations between Mg and Fe in the two types of chlorite indicate an increase of Fe and decrease of Mg with the increase of Al (Fig. 7D) and the consequent negative correlation between Fe and Mg in both types of chlorite. Radial chlorite II tends to have more aluminous and iron rich compositions and less magnesium than lamellar chlorite I.

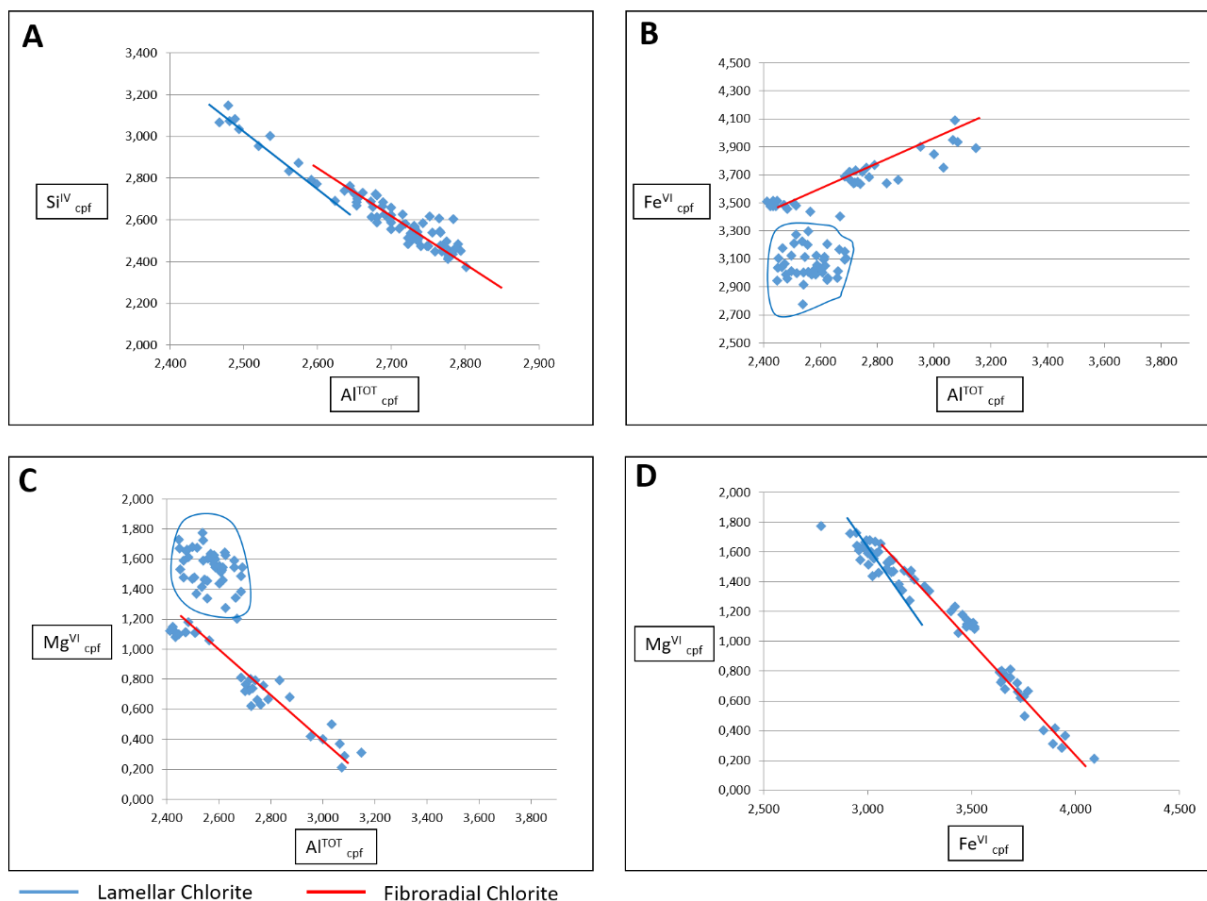


Figure 7. Chemical diagrams for lamellar and fibro-radial ripidolites. A – Si^{IV} x Al^{Tot} diagram; B – Fe^{VI} x Al^{Tot} diagram; C – Mg^{VI} x Al^{Tot} diagram; D – Mg^{VI} x Fe^{VI} diagram

6. DISCUSSION

The studies performed at the Rio Vermelho Prospect allow the characterization the hydrothermalism stages that affected the Xingu Complex lithologies and their relationship with the copper mineralization. Hydrothermal zones are strongly controlled by NNW-SSE structures that are the main pathways for the fluid transportation and best sites for the ore deposition (Fig. 2). The copper mineralization and the NNW-SSE structures related to the Carajás System are not affected by the late NNE-SSW structures related to the Neoproterozoic Araguaia Belt.

The entire hydrothermal alteration history at the Rio Vermelho Prospect is summarized in Figure 8. It starts with albitization (sodic alteration), followed by potassification, chloritization and silicification as pre-mineralization stages. During the copper ore depositional period, iron oxide formation is the most

prominent alteration product and is coeval to a second chloritization stage. Late sericitization ends the hydrothermal alteration processes. The ore mineralogy from the Rio Vermelho Prospect, characterized by detailed petrography and Scanning Electron Microscope (SEM) studies, indicates an assemblage with chalcopyrite-bornite-musketovite-hematite and minor magnetite.

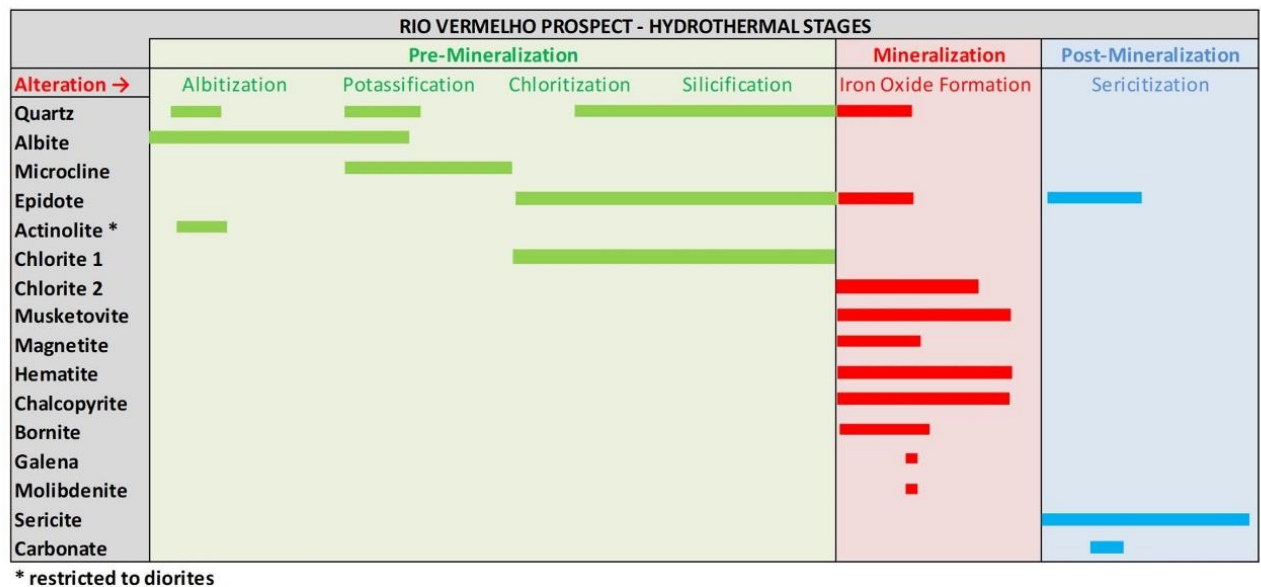


Figure 8. Mineral associations related to the different hydrothermal alteration processes and pre- syn- and post-mineralization stages from the Rio Vermelho Prospect.

The evolution of the hydrothermal assemblages starting with albitization, passing to potassification and finishing with sericitization (Figs. 8 and 9) show clear evidences of decreasing in temperature, salinity and ph conditions. Distal and wide albitic zones are a typical feature of IOCG systems (Hitzman, 2000) and also suggest initial temperatures between 400-600°C (Pollard, 1983). The chloritization after a potassic alteration (k-feldspar), occurring pre- to syn-mineralization, denotes a reduction in the fluid salinity owing to the crystallization of chlorite (Fig. 9). The microprobe analysis from the two chlorite phases indicates that the lamellar chlorite, related to the pre-mineralization stage, is enriched in Mg and Si when compared to the second stage represented by fibroradial chlorite crystals. The fibroradial chlorite, related to syn-mineralization processes, is relatively enriched in Fe, Al and shows positive correlation between Al and Fe plus a slight increase of Mn. These features may be related to the greater amount of sulfide phases associated to this period of chlorite formation. In addition, during the

crystallization of the Fe-rich radial chlorite that occurs in equilibrium with the deposition of the ore, the ore paragenesis shows a substantial enrichment in Fe (hematite>>magnetite), suggesting high Fe availability and relatively high fO_2 . The temperature of the ore deposition can be inferred by the coeval hydrothermal paragenesis that suggests crystallization between 300 – 350°C, with increasing fO_2 considering magnetite is in the first stages of mineralization and changes to hematite in the last stages.

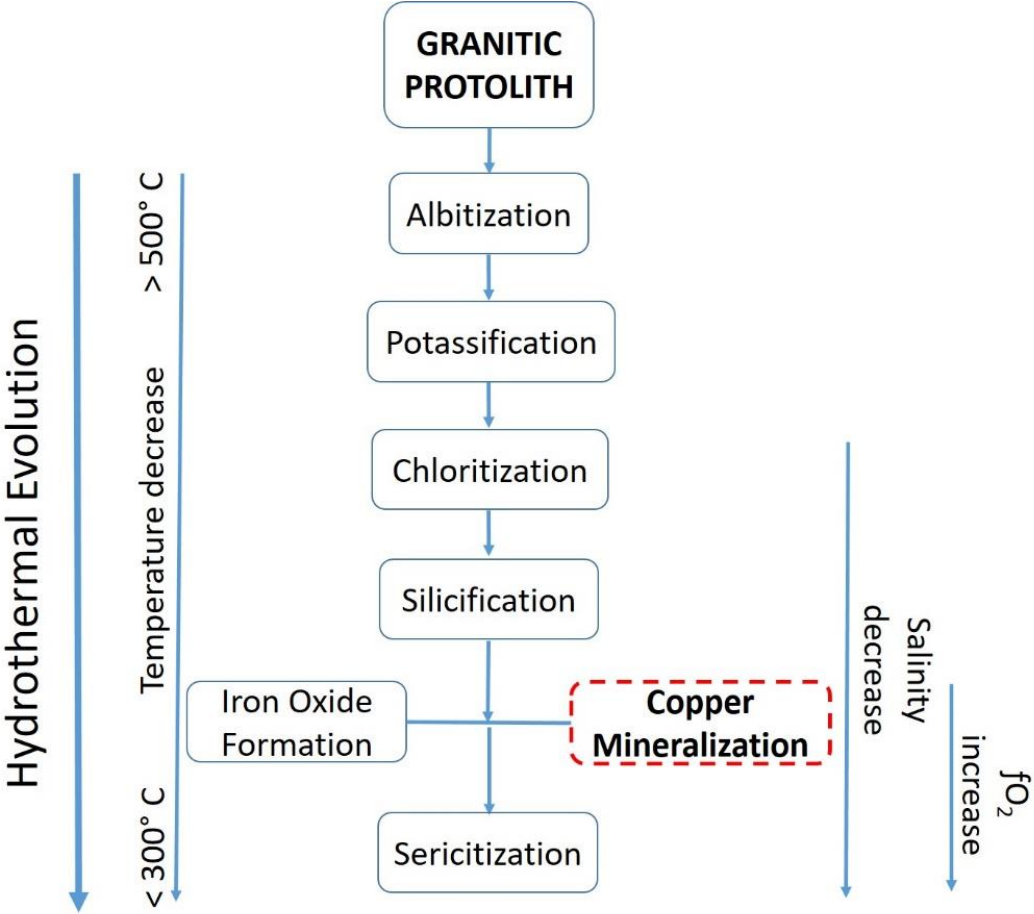


Figure 9. Schematic hydrothermal alteration evolution and associated estimated conditions (salinity, fO_2 , T) from the Rio Vermelho Prospect mineralization (modified from Augusto et al. 2008).

The ore paragenesis, chalcopyrite-bornite-musketovite-hematite with subordinate magnetite, is considered to have precipitated in highly oxidized conditions. The high fO_2 conditions are similar to the reported for the Alvo 118 Deposit (Torresi, 2011; Fig. 10), an important IOCG example from the Carajás Mineral Province. The increase in fO_2 conditions, evidenced by the formation of iron oxides (early magnetite and later hematite), and the decrease in temperature in the ore zone in a ductil-ruptil environment, suggest the input of oxidized meteoric water. The hydrolytic stage with sericite is a post-ore

deposition feature and is possible related to an increase of meteoric water contribution in the hydrothermal fluid. This last episode suggests maximum 300° C temperature (Inoue, 1995) indicating that Rio Vermelho Prospect hydrothermal system has possible ranged in temperature between 600° C and 250°.

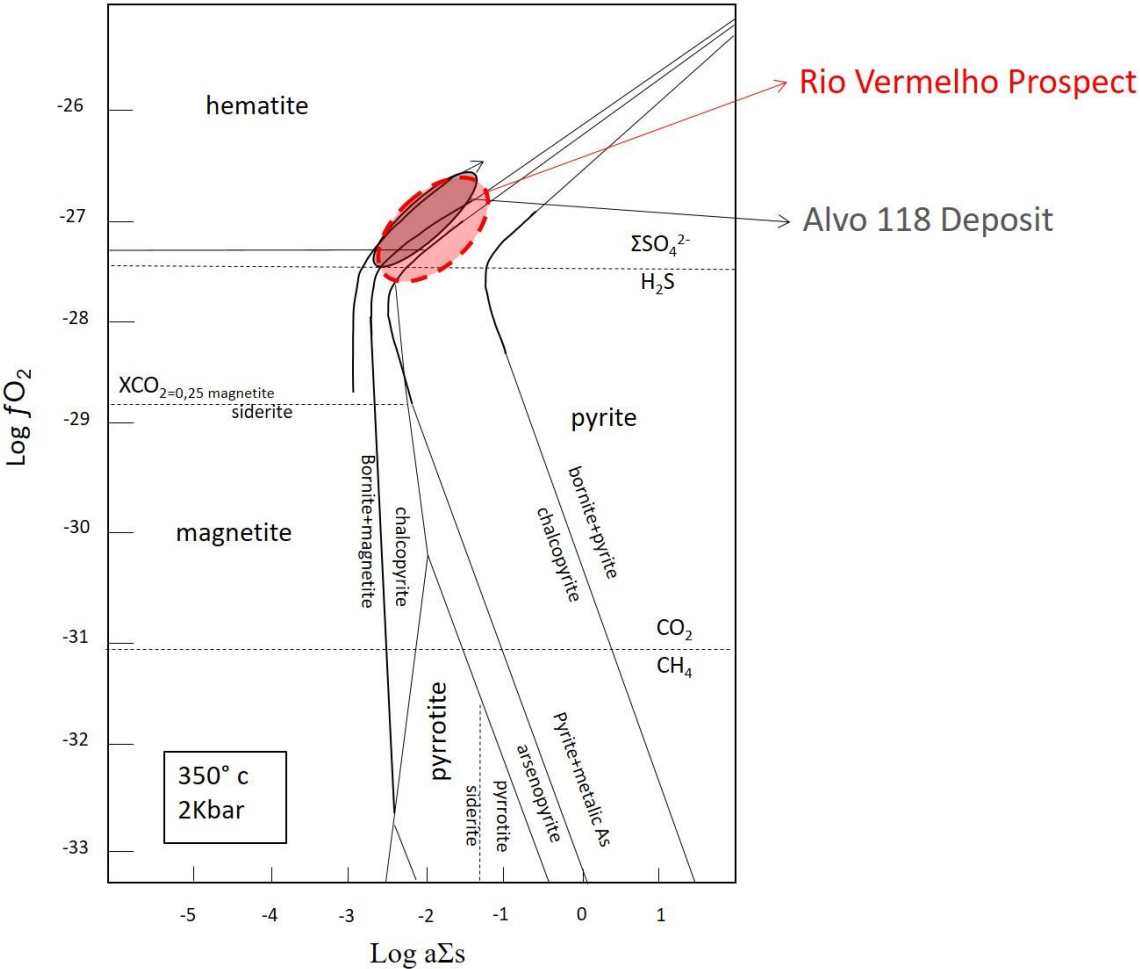


Figure 10 – Log aΣs versus Log fO₂ showing the stability fields for ion sulphides and oxides at T=350°C and P=2kbar (adapted from Torresi, 2011). The grey area indicates approximate conditions for the formation of the Alvo 118 (Torresi, 2011) and the red area delimitates the estimated conditions for the Rio Vermelho Prospect formation.

7. CONCLUSIONS

The Rio Vermelho Prospect can be classified as an IOCG mineralization type considering the characteristics of its ore and hydrothermal alteration assemblages. The voluminous alkali-rich alteration (sodic and potassic types), followed by chloritization, silicification and iron oxide formation associated to the copper mineralization hosted in breccias and veins/veinlets and later sericitization are similar to certain examples of IOCG deposits from the Carajás area and other important provinces around the world. Radial chlorites (enriched in Fe-Al-Mn) associated to the ore paragenesis indicates Fe increase, another common characteristic of IOCG deposits (Hitzman, 2000).

The hydrothermal paragenesis with iron ore minerals (musketovite-hematite and minor magnetite) associated to the copper mineralization (chalcopyrite-bornite) is dominated by hematite suggesting a depositional temperature $< 350^{\circ}$ with ore fluids extremely oxidized similar to most IOCG deposits. The ore stage is strongly controlled by structures that produce the hydrothermal breccias. The development of host rock fracturing possible has favored late influx of channeled meteoric water in the ore fluid. The meteoric water input resulted in hydrothermal fluid cooling and caused precipitation of sericite-epidote-carbonate as the last stage of hydrothermal alteration.

The IOCG mineralization of the Rio Vermelho Prospect is controlled by NNW-SSE structures related to a horse splay from the Carajás Fault System at the extreme eastern area of the Carajás Domain. The identification of this new IOCG prospect near to the border of the Carajás Domain and not affected by the younger NNE-SSW structures of the Araguaia Fold Belt, is a significant finding that can open new areas for exploration in the Province. The hydrothermal characteristics of the copper mineralization of the Rio Vermelho Prospect allow its classification as a shallow IOCG type dominated by hematite.

ACKNOWLEDGEMENTS

We are grateful to CODELCO DO BRASIL MINERAÇÃO LTDA. in the name of Marcos André Gonçalves for the permission and support to access the drill core samples. We are also grateful to Natanael Cesario Matos and Renan Guilherme de Souza for the special help with graphical art and in

SEM sessions at UFRGS. We also thank Brian Joy from the Department of Geological Sciences and Geological Engineering of the Queen's University for his support with microprobe analysis.

REFERENCES

Araújo, O. J. B., R. G. N. Maia, X. S. Jorge João & J. B. S. Costa, 1988. A megaestrutura arqueana da Folha Serra dos Carajás. *Anais do Congresso Latino-Americano de Geologia* 7: 324-338.

Araujo, O.J.B., Maia, R.G.N., 1991. Serra dos Carajas, folha SB.22-ZA, Estado do Para. Programa Levantamentos Geologicos Basicos do Brasil. Companhia de Pesquisa de Recursos Mimerais. 136 pp.

Augusto, R.A., Monteiro, L.V.S., Xavier, R. and Souza Filho, C.R., 2008. Zonas de alteração hidrotermal e paragênese do minério de cobre do Alvo Bacaba, Província Mineral de Carajás (PA). *Rev. Brasil. Geoci.* 38(2), 263–277.

Codelco do Brasil Mineração Ltda., 2015. Relatório de Fases II, Prospecto Rio Vermelho Sul: Relatório Interno, Parauapebas – PA (inédito), 23p.

Dall'Agnol, R., Teixeira, N.P., Magalhães, M.S., 1993. Diagnostic features of the tin-specialized anorogenic granites of the Eastern Amazonian Region. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias* 65, 33–50.

Dias G.S., Macambira M.J.B., Dall’Agnol R., Soares A.D.V., Barros C.E. 1996. Datação de zircões de sill de metagabro: comprovação da idade arqueana da Formação Águas Claras, Carajás - Pará. *In: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 5, Extended Abstracts*, p. 376-378.

Docegeo 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás – litoestratigrafia e principais depósitos minerais. *In: SBG, Congr. Brás. Geol., 35, Anexo aos anais*, p. 11-54.

Domingos, F., 2009, The structural setting of the Canaã dos Carajás region and Sossego-Sequeirinho deposits, Carajás, Brazil: Unpublished Ph.D. thesis, Durham University, 483 p. (available at Durham E-Theses Online: <http://etheses.dur.ac.uk/144/>).

Dreher, A.M., 2004, O depósito primário de Cu-Au de Igarapé Bahia, Carajás: Rochas fragmentárias, fluidos mineralizantes e modelo metalogénico: Unpublished Ph.D. thesis, Universidade Estadual de Campinas, 221 p.

Dreher, A.M., Xavier, R.P., Taylor, B.E., and Martini, S., 2008, New geologic, fluid inclusion and stable isotope studies on the controversial Igarapé Bahia Cu-Au deposit, Carajás province, Brazil: *Mineralium Deposita*, v. 43, p. 161–184.

Feio, G.R.L., 2011, Magmatismo granitóide arqueano da área de Canaã dos Carajás: implicações para a evolução crustal da Província Carajás. Unpublished Ph.D. thesis, Universidade Federal do Pará, 190 p.

Ferreira Filho, C.F., Cançado, F., Correa, C., Macambira, E.M.B., Siepierski, L., Junqueira-Brod, T. C. 2007. Mineralizações estratiformes de EGP-Ni associadas a complexos acamadados em Carajás: os

exemplos de Luanga e Serra da Onça, in. Contribuições à Geologia da Amazônia, Sociedade Brasileira de Geologia.

Galarza M., Macambira M.J.B. (2002) Petrologia e geocronologia das rochas encaixantes do depósito de Cu-Au Igarapé Bahia, Província Mineral de Carajás, Para, Brasil. In: Klein EL, Vasquez ML, Rosa-Costa LT (eds) Contribuicoes a Geologia da Amazonia 3:153-168.

Galarza, M.A., Macambira, M.J.B., Moura, C.A.V., 2003, Geocronologia Pb-Pb e Sm-Nd das rochas máficas do depósito Igarapé Bahia, Província Mineral de Carajás (PA): Simpósio de Geologia da Amazônia, 7th, Belém, Sociedade Brasileira de Geologia, Proceedings [CD-ROM].

Grainger, C.J., Groves, D.I., Tallarico, F.H.B., and Fletcher, I.R., 2008. Metallogenesis of the Carajás mineral province, southern Amazon craton, Brazil: Varying styles of Archean through Paleoproterozoic to Neoproterozoic base- and precious-metal mineralisation: Ore Geology Reviews, v. 33, p. 451–489.

Goarayeb, P. S. S., Moura, C. A. V.; Calado, W.M. 2004. Suíte Intrusiva Xambica: um magmatismo toleítico Neoproterozóico pré-tectônico no Cinturão Araguaia. In: Congresso Brasileiro de Geologia 42, Araxá, Anais. Sociedade Brasileira de Geologia, CD-ROM.

Hitzman, M.W., 2000, Iron oxide-Cu-Au deposits: What, where, when and why?, in Porter, T.M., ed., Hydrothermal iron-oxide copper-gold and related deposits: A global perspective: Adelaide, PGC Publishing, v. 1, p. 9–25.

Huhn S.R.B., Souza C.I.J., Albuquerque M.C., Leal E.D., Brustolin V. 1999. Descoberta do depósito Cu(Au) Cristalino: geologia e mineralização associada, região da Serra do Rabo - Carajás-PA. *In: SBG/Núcleo Norte, Simp. Geol. Amaz., 6, Boletim*, p. 140-143.

Inoue, A., 1995. Formation of clay minerals in hydrothermal environments. In *Origin and Mineralogy of Clays*, B. Velde, ed., Springer, Berlin, 268-330.

Lancaster Oliveira, J., Fanton, J., Almeida, A.J., Leveille, R.A., and Vieira, S., 2000, Discovery and geology of the Sossego copper-gold deposit, Carajás district, Pará State, Brazil: International Geology Congress, 31st, Rio de Janeiro, 6–17 August, Proceedings [CD-ROM].

Lindenmayer, Z.G., 1990, Salobo sequence, Carajás, Brasil: Geology, geochemistry and metamorphism: Unpublished Ph.D. thesis, Canada, University of Western Ontario, 407 p.

Machado, N.; Lindenmayer, Z.; Krogh, T.E. & Lindenmayer, D. 1991. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon Shield, Brazil. *Precambrian Research*, 49: 329-354.

Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Souza Filho C.R., Augusto R.A. 2007. Aplicação de isótopos estáveis ao estudo dos padrões de distribuição das zonas de alteração hidrotermal associados ao sistema de óxido de ferro-cobre-ouro Sossego, Província Mineral de Carajás. *In: SBGq, Congr. Bras. Geoq., 8, Atibaia, CD-Rom*.

Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Carvalho, E.R., Hitzman, M.W., Johnson, C.A., Souza Filho, C.R., and Torresi, I., 2008a, Spatial and temporal zoning of hydrothermal alteration and mineralization in the Sossego iron oxidecopper-gold deposit, Carajás mineral province, Brazil: Parageneses and stable isotope constraints: *Mineralium Deposita*, v. 43, p. 129–159.

Moreto, C.P.N., Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Amaral, W.S., Santos, T.J.S., Juliani, C., and Souza Filho, C.R., 2011a, Mesoarchean (3.0 and 2.86 Ga) host rocks of the iron oxide-Cu-Au Bacaba deposit, Carajás mineral province: U-Pb geochronology and metallogenetic implications: *Mineralium Deposita*, v. 46, p. 789–811.

Moreto, C.P.N., Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Kemp, T.I.S., and Souza Filho, C.R. 2011b, In situ LA-ICPMS U-Pb zircon dating of the host rocks of the Sossego and Bacaba iron oxide-copper-gold deposits, Carajás mineral province, Brazil: Biennial SGA Meeting, 11th, Antofagasta, Chile [CDROM].

Moura, C.A.V., Gaudette, H.E., 1993. Evidence of Brasiliano/ Panafrican deformation in the Araguaia Belt: implication for Gondwana evolution. *Revista Brasileira de Geociências* 23, 117–123.

Nogueira, A.C.R., Truckenbrod, W., Costa, J.B.S., Pinheiro, R.V.L., 1994. Análise faciologica e estrutural da Formação Aguas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás. 4° Simposio de Geologia da Amazonia, pp. 363-364.

Nogueira ACR, Truckenbrod W, Pinheiro RVL. 2000. Storm and tide-dominated siliciclastic deposits of the Archean Aguas Claras Formation, Serra dos Carajas, Brazil. In: 31 International Geological Congress, Rio de Janeiro, Abstracts.

Pidgeon, R.T., Macambira, M.J.B., and Lafon, J.M., 2000, Th-U-Pb isotopic systems and internal structures of complex zircons from an enderbite from the Pium Complex, Carajás province, Brazil: Evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of the enderbite: *Chemical Geology*, v. 166, p. 157–171.

Pimentel M.M., Lindenmayer Z.G., Laux J.H., Armstrong R., Araújo J.C. 2003. Geochronology and Nd geochemistry of the Gameleira Cu–Au deposit, Serra dos Carajás, Brazil: 1.8–1.7 Ga hydrothermal alteration and mineralization. *J. South Am. Earth Sci.*, **15**:803-813

Pinheiro, R.V.L., Holdsworth, R.E., 1997. Reactivation of Archean strike-slip fault systems, Amazon region, Brazil. *Journal of the Geological Society* 154, 99–103.

Pollard P.J., 1983. Magmatic and postmagmatic processes in the formation of rocks associated with rare element deposits. *Trans Inst Min Metall* 92: B1–B9.

Réquia, K., Stein, H., Fontboté, L., and Chiaradia, M., 2003, Re-Os and Pb-Pb geochronology of the Archean Salobo iron oxide copper-gold deposit, Carajás mineral province, northern Brazil: *Mineralium Deposita*, v. 38, p. 727–738.

Rigon, J.C., Munaro, P., Santos, L.A., Nascimento, J.A.S., and Barreira, C.F., 2000, Alvo 118 copper-gold deposit: Geology and mineralization, Serra dos Carajás, Pará, Brazil [abs.]: International Geological Congress, 31st, Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Geologia, International Union of Geological Sciences, Abstract Volume [CD-ROM].

Silva, G.G.; Lima, M.I.C.; Andrade, A.R.F.; Issler, R.S.; Guimarães, G. 1974. Geologia. Folha SB.22 - Araguaia e parte da SC.22.- Tocantins. DNPM/Radam. v.4, p.1- 72. (Relatório técnico)

Sousa, F.D.S., 2007, Estudo da alteração hidrotermal, com ênfase no metassomatismo sódico, de rochas granitóides e máficas da região de Canaã de Carajás, Província Mineral de Carajás: Unpublished M.Sc. dissertation, Belem, Universidade Federal do Pará, 212 p.

Souza, S.R.B., Macambira, M.J.B., Scheller, J., 1996. Novos dados geocronológicos para os granitos deformados do Rio Itacaiunas (Serra dos Carajás, PA); implicações estratigráficas. V Simpósio de Geologia da Amazônia, pp. 380–383.

Souza, L.H., and Vieira, E.A.P., 2000, Salobo 3 Alpha deposit: Geology and mineralization, *in* Porter, T.M., ed., Hydrothermal iron-oxide copper-gold and related deposits: A global perspective: Adelaide, PGC Publishing, v. 1, p. 213–224.

Tallarico, F.H.B., McNaughton, N.J., Groves, D.I., Fletcher, I.R., Figueiredo, B.R., Carvalho, J.B., Rego, J.L., Nunes, A.R., 2004. SHRIMP II U–Pb constraints on the age of the Breves Cu–Au–(W–Bi–Sn) mineralisation: evidence of Paleoproterozoic (1.88 Ga) metallogeny in the Carajás Copper–Gold Belt, Brazil. *Mineralium Deposita* 39, 68–86.

Tallarico, F.H.B., Figueiredo, B.R., Groves, D.I., Kositcin, N., McNaughton, N.J., Fletcher I.R., and Rego J.L., 2005, Geology and SHRIMP U-Pb geochronology of the Igarapé Bahia deposit, Carajás copper-gold belt, Brazil: An Archean (2.57 Ga) example of iron-oxide Cu-Au-(U-REE) mineralization: *Economic Geology*, v. 100, p. 7–28.

Torresi I., Bortholoto D.F.A., Xavier R.P., Monteiro L.V.S, 2011. Hydrothermal alteration, fluid inclusions and stable isotope systematics of the Alvo 118 iron oxide–copper–gold deposit, Carajás Mineral Province (Brazil): implications for ore genesis. *Mineralium Deposita*, 47: 299-323.

Trendall, A.F., Basei, M.A.S., Laeter, J.R., Nelson, D.R., 1998. SHRIMP zircon U–Pb constraints on the age of the Carajás formation, Grão Pará Group, Amazon Craton. *Journal of South American Earth Sciences* 11, 265–277.

Vasquez, M. L., L. T. Rosa-Costa, C. G. Silva, P. F. Ricci, J. O. Barbosa, E. L. Klein, E. S. Lopes, E. B. Macambira, C. L. Chaves, J. M. Carvalho, J. G. Oliveira, G. C. Anjos & H. R. Silva, 2008. Geologia e recursos minerais do estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: Texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará. In: M. L. VASQUEZ & L. T. ROSA-COSTA (Orgs.): Escala 1:1.000.000: 1-329. CPRM, Belém.

Villas, R.N., and Santos, M.D., 2001, Gold deposits of the Carajás mineral province: Deposit types and metallogenesis: *Mineralium Deposita*, v. 36, p. 300–331.

Xavier R.P., Dreher A.M., Monteiro L.V.S., Araujo C.E.G., Wiedenbeck M., Rhede D. 2006. How was high salinidade acquired by brines associated with Precambrian Cu-Au systems of the Carajás Mineral Province (Brazil)? Evidence from boron isotope composition of tourmaline. *In: Pronex/UFPA e SBG/NO, Symposium on magmatism, crustal evolution, and metallogensis of the Amazonian Craton, Abstracts volume*, p. 34.

Xavier, R.P., Monteiro, L.V.S., Moreto, C.P.N., Pestilho, A.L.S., Melo, G.H.C., Silva, M.A.D., Aires, B., Ribeiro, C., and Silva, F.H.F., 2012, The iron oxide copper-gold systems of the Carajás mineral province, Brazil: Society of Economic Geologists, Special Publication no. 16, p. 433–454.

Xavier, R.P., Wiedenbeck, M., Trumbull, R.B., Dreher, A.M., Monteiro, L.V.S., Rhede, D., Araújo, C.E.G., and Torresi, I., 2008a, Tourmaline B-isotopes fingerprint marine evaporites as the source of high-salinity ore fluids in iron oxide-copper-gold deposits, Carajás mineral province (Brazil): *Geology*, v. 36, p. 743–746

5. CONCLUSÕES

Os dados obtidos durante a execução do presente trabalho, com base à geologia da área, as relações com outras mineralizações da Província Carajás, a caracterização das associações de minério e das assembléias hidrotermais permitem interpretar a área e o Prospecto Rio Vermelho como integrante do grupo de depósitos do tipo IOCG..

O volume expressivo de alteração sódica, seu caráter mais regional e precursor, a alteração potássica envelopando as zonas de minério, seguida de cloritização, silicificação e formação de óxidos de ferro associados à mineralização de cobre hospedada em brechas e veios, com sericitização tardia, são características similares a dos depósitos tipo IOCG da Província Carajás e de outras províncias minerais mundiais.

A fase de geração de clorita radial (enriquecidas em Fe-Al-Mn), e que seguiu a formação de clorita precoce da matriz, está associada à paragênese do minério e indica o aumento do Fe no sistema, outra característica comum dos depósitos IOCG (Hitzman, 2000).

A paragênese hidrotermal com minerais de ferro na forma de óxidos (musketovita-hematita e magnetita subordinada) associada à mineralização de cobre (calcopirita-bornita) tem a hematita dominante, sugerindo uma temperatura de deposição inferior a 350°, com fluídos oxidados semelhantes a uma parcela importante dentro do grupo dos depósitos tipo IOCG.

O estágio de mineralização tem forte controle nas estruturas que produzem brechas hidrotermais. O desenvolvimento de fraturas nas rochas hospedeiras favoreceu a entrada de água meteórica dirigida para a região mineralizada. O influxo de água meteórica contribuiu com o resfriamento das soluções hidrotermais e sua diluição acelerando reequilíbrios com a formação de epidoto-carbonato, e sericita como último estágio de alteração hidrotermal de mais baixa T. A formação de zonas de alteração hidrotermal inicia com a estabilização de zonas sódicas distais, passando a zonas potássicas proximais, posteriormente brechadas com a formação de clorita, epidoto, magnetita, musketovita, hematita e a geração da mineralização de cobre. Essa sequência indica que a variação de temperatura entre as fases iniciais de formação de minerais de alteração (pré-mineralização) e as fases finais tardias (pós-mineralização) foi possivelmente entre 600°C e 300°C.

A mineralização do tipo IOCG do Prospecto Rio Vermelho é controlada por estruturas NNW-SSE relacionadas ao *splay* do Sistema de Falhas Carajás na área extremo leste do Domínio Carajás. A identificação deste novo prospecto do tipo IOCG próximo à borda do Domínio Carajás, não afetado por estruturas NNE-SSW mais jovens da Faixa Araguaia, é uma descoberta significativa que abre novas áreas alvo para a exploração mineral na Província Carajás. As características hidrotermais da mineralização de cobre do Prospecto Rio Vermelho permitem classificá-lo como um depósito tipo IOCG superficial (raso) com domínio de hematita.

Referências

- Araújo, O. J. B., R. G. N. Maia, X. S. Jorge João & J. B. S. Costa, 1988. A megaestrutura arqueana da Folha Serra dos Carajás. *Anais do Congresso Latino-Americano de Geologia* 7: 324-338.
- Araujo, O.J.B., Maia, R.G.N., 1991. Serra dos Carajas, folha SB.22-ZA, Estado do Para. Programa Levantamentos Geologicos Basicos do Brasil. Companhia de Pesquisa de Recursos Mimerais. 136 pp.
- Artemieva, I.M., and Mooney, W.D., 2001, Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: A global study: *Journal of Geophysical Research*, v. 106, p. 16,387–16,414.
- Augusto, R.A., Monteiro, L.V.S., Xavier, R. and Souza Filho, C.R., 2008. Zonas de alteração hidrotermal e paragênese do minério de cobre do Alvo Bacaba, Província Mineral de Carajás (PA). *Rev. Brasil. Geoci.* 38(2), 263–277.
- Barton, M. D., and Johnson, D. A., 2000, Alternative brine sources for Fe-Oxide(-Cu-Au) systems: Implications for hydrothermal alteration and metals, in Porter, T. M., ed., *Hydrothermal Iron Oxide-Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective*, 1, Australian Mineral Foundation, p. 43-60.
- Barton, M.D. and Johnson, D.A., 2004, Footprints of Fe-oxide(-Cu-Au) systems. *SEG 2004: Predictive Mineral Discovery Under Cover*. Centre for Global Metallogeny, Spec. Pub. 33, The University of Western Australia, 112-116.
- Codelco do Brasil Mineração Ltda., 2015. Relatório de Fases II, Prospecto Rio Vermelho Sul: Relatório Interno, Parauapebas – PA (inédito), 23p.
- Dall'Agnol, R., Teixeira, N.P., Magalhães, M.S., 1993. Diagnostic features of the tin-specialized anorogenic granites of the Eastern Amazonian Region. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 65, 33–50.
- Dias G.S., Macambira M.J.B., Dall’Agnol R., Soares A.D.V., Barros C.E. 1996. Datação de zircões de sill de metagabro: comprovação da idade arqueana da Formação Águas Claras, Carajás - Pará. *In: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 5, Extended Abstracts*, p. 376-378.
- Docegeo 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás – litoestratigrafia e principais depósitos minerais. *In: SBG, Congr. Brás. Geol.*, 35, *Anexo aos anais*, p. 11-54.

Domingos, F., 2009, The structural setting of the Canaã dos Carajás region and Sossego-Sequeirinho deposits, Carajás, Brazil: Unpublished Ph.D. thesis, Durham University, 483 p. (available at Durham E-Theses Online: <http://etheses.dur.ac.uk/144/>).

Dreher, A.M., 2004, O depósito primário de Cu-Au de Igarapé Bahia, Carajás: Rochas fragmentárias, fluidos mineralizantes e modelo metalogenético: Unpublished Ph.D. thesis, Universidade Estadual de Campinas, 221 p.

Dreher, A.M., Xavier, R.P., Taylor, B.E., and Martini, S., 2008, New geologic fluid inclusion and stable isotope studies on the controversial Igarapé-Bahia Cu-Au deposit, Carajás province, Brazil: *Mineralium Deposita*, v. 43, p.161–184.

Feio, G.R.L., 2011, Magmatismo granitóide arqueano da área de Canaã dos Carajás: implicações para a evolução crustal da Província Carajás. Unpublished Ph.D. thesis, Universidade Federal do Pará, 190 p.

Ferreira Filho, C.F., Cançado, F., Correa, C., Macambira, E.M.B., Siepierski, L., Junqueira-Brod, T. C. 2007. Mineralizações estratiformes de EGP-Ni associadas a complexos acamadados em Carajás: os exemplos de Luanga e Serra da Onça, in: *Contribuições à Geologia da Amazônia*, Sociedade Brasileira de Geologia.

Galarza M., Macambira M.J.B. (2002) Petrologia e geocronologia das rochas encaixantes do depósito de Cu-Au Igarapé Bahia, Província Mineral de Carajás, Para, Brasil. In: Klein EL, Vasquez ML, Rosa-Costa LT(eds) *Contribuições a Geologia da Amazonia* 3:153-168.

Galarza, M.A., Macambira, M.J.B., Moura, C.A.V., 2003, Geocronologia Pb-Pb e Sm-Nd das rochas máficas do depósito Igarapé Bahia, Província Mineral de Carajás (PA): Simpósio de Geologia da Amazônia, 7th, Belém, Sociedade Brasileira de Geologia, Proceedings [CD-ROM].

Grainger, C.J., Groves, D.I., Tallarico, F.H.B., and Fletcher, I.R., 2008. Metallogenesis of the Carajás mineral province, southern Amazon craton, Brazil: Varying styles of Archean through Paleoproterozoic to Neoproterozoic base and precious-metal mineralisation: *Ore Geology Reviews*, v. 33, p. 451–489.

Gorayeb, P. S. S., Moura, C. A. V.; Calado, W.M. 2004. Suíte Intrusiva Xambica: um magmatismo toleítico Neoproterozóico pré-tectônico no Cinturão Araguaia. In: Congresso Brasileiro de Geologia 42, Araxá, Anais. Sociedade Brasileira de Geologia, CD-ROM.

Groves, D. I., and F. Bierlein, 2007, Geodynamic settings of mineral deposit systems, *J. of the Geol. Soc.*, London, 164, 19-30.

Groves, D.I., Bierlein, F.P., Meinert, L.D., and Hitzman, M.W., 2010, Iron oxide-copper-gold (IOCG) deposits through Earth history: Implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits: *Economic Geology*, v. 105, p. 641–654.

Hitzman, M.W., Oreskes, N., and Einaudi, M.T., 1992, Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits: *Precambrian Research*, v. 58, p. 241–287.

Hitzman, M.W., 2000, Iron oxide-Cu-Au deposits: What, where, when and why?, *in* Porter, T.M., ed., *Hydrothermal iron-oxide copper-gold and related deposits: A global perspective*: Adelaide, PGC Publishing, v. 1, p. 9–25.

Huhn S.R.B., Souza C.I.J., Albuquerque M.C., Leal E.D., Brustol in V. 1999. Descoberta do depósito Cu(Au) Cristalino: geologia e mineralização associada, região da Serra do Rabo - Carajás-PA. *In*: SBG/Núcleo Norte, Simp. Geol. Amaz., 6, *Boletim*, p. 140-143.

Inoue, A., 1995. Formation of clay minerals in hydrothermal environments. *In* *Origin and Mineralogy of Clays*, B. Velde, ed., Springer, Berlin, 268-330.

Lancaster Oliveira, J., Fanton, J., Almeida, A.J., Leveille, R.A., and Vieira, S., 2000, Discovery and geology of the Sossego copper-gold deposit, Carajás district, Pará State, Brazil: *International Geology Congress, 31st, Rio de Janeiro, 6–17 August, Proceedings [CD-ROM]*.

Lindenmayer, Z.G., 1990, Salobo sequence, Carajás, Brasil: *Geology, geochemistry and metamorphism*: Unpublished Ph.D. thesis, Canada, University of Western Ontario, 407 p.

Machado, N.; Lindenmayer, Z.; Krogh, T.E. & Lindenmayer, D. 1991. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon Shield, Brazil. *Precambrian Research*, 49: 329-354.

Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Souza Filho C.R., Augusto R.A. 2007. Aplicação de isótopos estáveis ao estudo dos padrões de distribuição das zonas de alteração hidrotermal associados ao sistema de óxido de ferro-cobre-ouro Sossego, Província Mineral de Carajás. *In*: SBGq, Congr. Bras. Geoq., 8, Atibaia, CD-Rom.

Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Carvalho, E.R., Hitzman, M.W., Johnson, C.A., Souza Filho, C.R., and Torresi, I., 2008a, Spatial and temporal zoning of hydrothermal alteration and mineralization in the Sossego iron oxide-copper-gold deposit, Carajás mineral province, Brazil: Parageneses and stable isotope constraints: *Mineralium Deposita*, v. 43, p. 129–159.

Moreto, C.P.N., Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Amaral, W.S., Santos, T.J.S., Juliani, C., and Souza Filho, C.R., 2011a, Mesoarchean (3.0 and 2.86 Ga) host rocks of the iron oxide-Cu-Au Bacaba deposit, Carajás mineral province: U-Pb geochronology and metallogenetic implications: *Mineralium Deposita*, v. 46, p. 789–811.

Moreto, C.P.N., Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Kemp, T.I.S., and Souza Filho, C.R. 2011b, In situ LA-ICPMS U-Pb zircon dating of the host rocks of the Sossego and Bacaba iron oxide-copper-gold deposits, Carajás mineral province, Brazil: Biennial SGA Meeting, 11th, Antofagasta, Chile [CDROM].

Moura, C.A.V., Gaudette, H.E., 1993. Evidence of Brasiliano/Panafrican deformation in the Araguaia Belt: implication for Gondwana evolution. *Revista Brasileira de Geociências* 23, 117–123.

Nogueira, A.C.R., Truckenbrod, W., Costa, J.B.S., Pinheiro, R.V.L., 1994. Análise faciológica e estrutural da Formação Aguas Claras, Pré-cambriano da Serra dos Carajás. 4º Simposio de Geologia da Amazonia, pp. 363–364.

Nogueira ACR, Truckenbrod W, Pinheiro RVL. 2000. Storm and tide-dominated siliciclastic deposits of the Archean Aguas Claras Formation, Serra dos Carajas, Brazil. In: 31 International Geological Congress, Rio de Janeiro, Abstracts.

Pidgeon, R.T., Macambira, M.J.B., and Lafon, J.M., 2000, Th-U-Pb isotopic systems and internal structures of complex zircons from an enderbite from the Pium Complex, Carajás province, Brazil: Evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of the enderbite: *Chemical Geology*, v. 166, p. 157–171.

Pimentel M.M., Lindenmayer Z.G., Laux J.H., Armstrong R., Araújo J.C. 2003. Geochronology and Nd geochemistry of the Gameleira Cu–Au deposit, Serra dos Carajás, Brazil: 1.8–1.7 Ga hydrothermal alteration and mineralization. *J. South Am. Earth Sci.*, **15**:803–813

Pinheiro, R.V.L., Holdsworth, R.E., 1997. Reactivation of Archean strike-slip fault systems, Amazon region, Brazil. *Journal of the Geological Society* 154, 99–103.

Pollard P.J., 1983. Magmatic and post magmatic processes in the formation of rocks associated with rare element deposits. *Trans Inst Min Metall* 92: B1–B9.

Réquia, K., Stein, H., Fontboté, L., and Chiaradia, M., 2003, Re-Os and Pb-Pb geochronology of the Archean Salobo iron oxide copper-gold deposit, Carajás mineral province, northern Brazil: *Mineralium Deposita*, v. 38, p.727–738.

Rigon, J.C., Munaro, P., Santos, L.A., Nascimento, J.A.S., and Barreira, C.F., 2000, Alvo 118 copper-gold deposit: Geology and mineralization, Serra dos Carajás, Pará, Brazil [abs.]: International Geological Congress, 31st, Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Geologia, International Union of Geological Sciences, Abstract Volume [CD-ROM].

Silva, G.G.; Lima, M.I.C.; Andrade, A.R.F.; Issler, R.S.; Guimarães, G. 1974. Geologia. Folha SB.22 - Araguaia e parte da SC.22.- Tocantins. DNPM/Radam. v.4, p.1- 72. (Relatório técnico)

Sousa, F.D.S., 2007, Estudo da alteração hidrotermal, com ênfase no metassomatismo sódico, de rochas granitóides e máficas da região de Canaã de Carajás, Província Mineral de Carajás: Unpublished M.Sc. dissertation, Belem, Universidade Federal do Pará, 212 p.

Souza, S.R.B., Macambira, M.J.B., Scheller, J., 1996. Novos dados geocronológicos para os granitos deformados do Rio Itacaiunas (Serra dos Carajás, PA); implicações estratigráficas. V Simpósio de Geologia da Amazônia, pp. 380–383.

Souza, L.H., and Vieira, E.A.P., 2000, Salobo 3 Alpha deposit: Geology and mineralization, *in* Porter, T.M., ed., *Hydrothermal iron-oxide copper-gold and related deposits: A global perspective*: Adelaide, PGC Publishing, v. 1, p. 213–224.

Tallarico, F.H.B., McNaughton, N.J., Groves, D.I., Fletcher, I.R., Figueiredo, B.R., Carvalho, J.B., Rego, J.L., Nunes, A.R., 2004. SHRIMP II U–Pb constraints on the age of the Breves Cu–Au–(W–Bi–Sn) mineralisation: evidence of Paleoproterozoic (1.88 Ga) metallogeny in the Carajás Copper–Gold Belt, Brazil. *Mineralium Deposita* 39, 68–86.

Tallarico, F.H.B., Figueiredo, B.R., Groves, D.I., Kositcin, N., McNaughton, N.J., Fletcher I.R., and Rego J.L., 2005, Geology and SHRIMP U–Pb geochronology of the Igarapé Bahia deposit, Carajás copper-gold belt, Brazil: An Archean (2.57 Ga) example of iron-oxide Cu–Au–(U–REE) mineralization: *Economic Geology*, v. 100, p. 7–28.

Torresi I., Bortholoto D.F.A., Xavier R.P., Monteiro L.V.S, 2011. Hydrothermal alteration, fluid inclusions and stable isotope systematics of the Alvo 118 iron oxide–copper–gold deposit, Carajás Mineral Province (Brazil): implications for ore genesis. *Mineralium Deposita*, 47: 299-323.

Trendall, A.F., Basei, M.A.S., Laeter, J.R., Nelson, D.R., 1998. SHRIMP zircon U–Pb constraints on the age of the Carajás formation, Grão Pará Group, Amazon Craton. *Journal of South American Earth Sciences* 11, 265–277.

Vasquez, M. L., L. T. Rosa-Costa, C. G. Silva, P. F. Ricci, J. O. Barbosa, E. L. Klein, E. S. Lopes, E. B. Macambira, C. L. Chaves, J. M. Carvalho, J. G. Oliveira, G. C. Anjos & H. R. Silva, 2008. Geologia e recursos minerais do estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: Texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará. In: M. L. VASQUEZ & L. T. ROSA-COSTA (Orgs.): Escala 1:1.000.000: 1-329. CPRM, Belém.

Villas, R.N., and Santos, M.D., 2001, Gold deposits of the Carajás mineral province: Deposit types and metallogenesis: *Mineralium Deposita*, v. 36,p. 300–331.

Williams, P.J., Barton, M.D., Johnson, D.A., Fontboté, L., de Haller, A., Mark, G., Oliver, N.H.S., and Marschik, R., 2005, Iron oxide copper-gold deposits: Geology, Space-time distribution, and possible modes of origin: *ECONOMIC GEOLOGY 100TH ANNIVERSARY VOLUME*, p. 371–405.

Xavier R.P., Dreher A.M., Monteiro L.V.S., Araujo C.E.G., Wiedenbeck M., Rhede D. 2006. How was high salinity acquired by brines associated with Precambrian Cu-Au systems of the Carajás Mineral Province (Brazil)? Evidence from boron isotope composition of tourmaline. *In: Pronex/UFPA e SBG/NO, Symposium on magmatism, crustal evolution, and metallogenesis of the Amazonian Craton, Abstracts volume*, p. 34.

Xavier, R.P., Monteiro, L.V.S., Moreto, C.P.N., Pestilho, A.L.S., Melo, G.H.C., Silva, M.A.D., Aires, B., Ribeiro, C., and Silva, F.H.F., 2012, The iron oxide copper-gold systems of the Carajás mineral province, Brazil: Society of Economic Geologists, Special Publication no. 16, p. 433–454.

Xavier, R.P., Wiedenbeck, M., Trumbull, R.B., Dreher, A.M., Monteiro, L.V.S., Rhede, D., Araújo, C.E.G., and Torresi, I., 2008a, Tourmaline B-isotopes fingerprint marine evaporites as the source of high-salinity ore fluids in iron oxide-copper-gold deposits, Carajás mineral province (Brazil): *Geology*, v. 36, p. 743–746