



CARACTERIZAÇÃO DE FASES MINERAIS DATÁVEIS ASSOCIADAS A SISTEMAS DE METAIS BASE NO SETOR NORTE DO DOMÍNIO CARAJÁS

Palavras-Chave: depósitos minerais, petrografia, Província Carajás

Autores(as):

Felipe Macareno Antunes de Bem [IG-UNICAMP]

MSc. Kamila Gomes Fernandes (co-orientadora) [IG-UNICAMP]

Prof^(a). Dr^(a). Carolina Penteado Natividade Moreto (orientadora) [IG-UNICAMP]

1. Resumo:

A Província Mineral de Carajás, situada na região norte do Brasil, abriga inúmeros depósitos cupríferos do tipo IOCG de renome global. Naturalmente, essa região tem despertado grande interesse econômico e científico, impulsionando pesquisas significativas na área. Esses estudos têm revelado a diversidade e complexidade notáveis da história geológica e metalogenética da região.

Foram identificadas mineralizações singenéticas relacionadas ao hidrotermalismo exalativo de fundo oceânico em depósitos como Pojuca, Igarapé Bahia, e Tarzan. Além desses, outros quatro depósitos também apresentam indícios preliminares de atividade exalativa na Província Carajás. Na região da Serra Norte, a equipe de exploração da VALE S.A. descreveu preliminarmente mineralizações singenéticas em brechas hialoclásticas, alojadas em unidades vulcânicas do Supergrupo Itacaiúnas, relacionadas aos depósitos de N4WS e GT57, alvos de estudo deste projeto.

O objetivo do presente projeto foi a identificação e caracterização de minerais passíveis de datação por métodos geocronológicos, como zircão e titanita. Para tanto, foi feita uma caracterização petrográfica detalhada em sete amostras. O zircão, que fornece a idade de cristalização da rocha, se encontrava na matriz primária do basalto andesítico, enquanto a titanita, associada ao estágio de cloritização, poderia fornecer a idade de alteração hidrotermal associada à formação dos depósitos.

2. Introdução:

A Província Mineral de Carajás, localizada na região norte do Brasil, é globalmente conhecida por seus inúmeros depósitos, dentre eles, os depósitos do tipo *iron oxide copper-gold* (IOCG) de classe mundial. Esses depósitos estão predominantemente localizados no Domínio Carajás, na porção norte da província, em paralelo as duas zonas de cisalhamento regionais distintas (Canaã dos Carajás e Cinzento), com direção ESE-WNW e E-W (Moreto et al., 2015). De acordo com Melo *et al.*, (2019), dados do tempo da mineralização do tipo IOCG foram restritos a 2559 ± 34 Ma no depósito Alemão. Essa análise propõe a presença de um evento metalogenético do tipo IOCG, por volta de 2,5 Ga, que sobrepõe mineralizações mais antigas do tipo cobre sin-genética-exalativa. Melo *et al.*, (2019) ainda complementa que os dados obtidos também sugerem que a formação inicial de minerais sulfetos dentro do Supergrupo Itacaiúnas pode ter resultado em seqüências ricas em cobre, as quais foram possivelmente remobilizadas, contribuindo para a geração do extenso grupo de

depósitos IOCG em Carajás.

Moreto *et al.*, (2015b), através de análises de espectrometria de massas em monazita e molibênita, comenta sobre múltiplos eventos hidrotermais que ocorreram no Neoarqueano (2,76 e 2,72-2,68 Ga). Apesar da evolução hidrotermal inicial em 2,76 Ga indicar para a migração de fluidos coevais à formação da Bacia de Carajás, Moreto *et al.*, (2015b) demonstra que o principal episódio para a gênese de depósitos IOCG (2,72-2,68 Ga) está relacionada à inversão da bacia, associada ao magmatismo félsico do Neoarqueano (por volta de 2,7 Ga). Esses dados contrapõe a ideia cujos depósitos de IOCG na Faixa do Cobre do Sul e os da Faixa do Cobre do Norte (depósitos de Salobo, com 2,57 Ga, e Igarapé Bahia-Alemão) compartilham uma evolução metalogenética comum.

Apesar deste esforço, grande parte da história geológica da região, incluindo a definição das idades de evento(s) tectono-metamórfico(s) e mineralizante(s) ainda permanece pouco compreendida (Trunfull *et al.*, 2020), em parte, devido à complexa superposição de eventos hidrotermais (típicos de depósitos IOCG) e reativações de descontinuidades crustais no Arqueano e Paleoproterozóico (Justo *et al.*, 2020).

Neste contexto, visando compreender, interpretar e ordenar os processos ocorridos na região, faz-se necessário uma caracterização petrográfica detalhada, visando identificar e hierarquizar estruturas, texturas e paragênese mineral de zonas de alteração hidrotermal e mineralizadas para futuramente estabelecer uma correlação com dados geocronológicos (i.e., U-Pb) nos depósitos N4WS e GT57.

3. Materiais e Métodos:

3.1. Revisão Bibliográfica:

A revisão bibliográfica foi elaborada ao longo de todo o projeto, tendo o foco em gerar uma ampla base de dados para guiar o estudo. Para tal, de início uma vasta revisão das fontes bibliográficas foi feita para o entendimento sobre o Domínio Carajás, o contexto de formação dos depósitos VHMS (*volcanic hosted massive sulphide*), como se dão as alterações hidrotermais e os estudos geocronológicos, abordados nos sistemas U-Pb. Posteriormente, a revisão tomou um caráter mais centrado em paragêneses minerais, com o foco em titanita e zircão, bem como na aplicação de MEV (microscópio eletrônico de varredura) e estudo de dados.

3.2. Petrografia:

As análises petrográficas foram feitas nos laboratórios do Instituto de Geociências da Universidade de Campinas (IG-Unicamp), através de microscópios ópticos LEICA EP DM de luz transmitida e refletida. No total foram analisadas sete seções delgada-polidas localizadas nos depósitos N4WS (N4WS1410/103, KF161-N4WS1491/153,12, KF194-N4WS1491/535,54) e GT57 (KF118-GT57FD01/68,74, KF100-GT57FD01/116,1, KF117-GT57FD01/257,4, KF81-GT57FD01/302,72). Com o foco em buscar titanita, zircão e outras fases datáveis (e.g. rutilo) para datação U-Pb in situ via LA-ICP-MS, foram selecionadas três seções (KF194, KF100 e KF81) com base nas fases minerais identificadas para etapa de microscópio eletrônico de varredura (MEV).

3.3. Microscópio Eletrônico de Varredura:

Para as análises do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), também foram utilizados os laboratórios do IG-Unicamp. A análises e dados obtidos permitiram a correlação e confirmação das análises ópticas e aprimoramento das interpretações das paragêneses minerais presentes. A utilização do EDS (energy dispersive spectrometer) acoplado ao MEV também possibilitou a obtenção de dados quantitativos das variações em massa de cada elemento por ponto. As seções utilizadas para análise em MEV foram a KF194-N4WS1491/535,54, KF100-GT57FD01/116,1 e KF81-GT57FD01/302,72.

4. RESULTADOS:

4.1. Análises Laboratoriais:

4.1.1. Descrição das amostras

As sete seções consistem em uma zona de alteração hidrotermal que se desenvolveu sob rocha vulcânica de composição basalto andesítica. As amostras do depósitos N4WS (N4WS1410/103, KF161-N4WS1491/153,12 e KF194-N4WS1491/535,54) são compostas aproximadamente por plagioclásio (30-35%), augita (10-25%) e clorita Mg (23%-35%) como primários. Os secundários são quartzo, sericita, biotita, ilmenita, olivina, esfalerita, calcopirita e saponita. Já os minerais acessórios incluem clorita Fe, magnetita, epidoto, rutilo e titanita. A matriz é muito alterada por clorita Mg e, por vezes, epidoto, biotita e augita. Os fenocristais de plagioclásio sofrem de saussuritização e encontram-se parcialmente alterados à sericita. Os poucos litoclastos de basalto andesítico mais preservados apresentam feições primárias de cristalização preservadas, tais como fenocristais de plagioclásio, já os litoclastos de basaltos mais alterados apresentam, por vezes, apenas suas bordas bem marcadas com seu interior completamente substituído por clorita Mg, clorita Fe e epidoto. A saponita se apresenta em poucos grãos pequenos, normalmente juntos a ilmenita (e.g. Fig. C e C1). A esfalerita, evidente nas amostras N4WS e KF161, ocorre junto à clorita, além da presença de microvênulas de quartzo cortando a seção N4WS.

Por sua vez, do depósito GT57, a seção KF118-GT57FD01/68,74 é composta por plagioclásio (20%) como mineral primário. A clorita Mg, saponita, quartzo e calcopirita como mineral secundário e os acessórios clorita

Fe, epidoto e rutilo. Os litoclastos de basaltos mais alterados apresentam apenas suas bordas bem marcadas com seu interior completamente substituído por saponita, clorita Mg e epidoto e, por vezes, ainda com fenocristais de plagioclásio moderadamente preservados. Nas amostras KF117-GT57FD01/257,4, KF81-GT57FD01/302,72 apresentam-se plagioclásio (30-35%) como mineral primário e a calcita, clorita Mg, magnetita, calcopirita, biotita, quartzo, saponita, zeólita e esfalerita como secundários. Já os acessórios são a esfalerita, ankerita e epidoto. A matriz completamente alterada é composta por clorita Mg e biotita. A zona é cortada por vênulas de ankerita e microvênulas de calcita e clorita. Na amostra KF117, se fazem presentes diversas amígdalas completamente preenchidas por calcitas e com a presença de bordas de clorita (e.g. Fig. B e B1) e em KF81 amígdalas variavelmente preenchidas por clorita Mg, esfalerita, calcita, pirrotita e esmectita, às vezes vidro e com halos de zeólita (e.g. Fig. A e A1). A esfalerita ocorre com zeólita preenchendo as amígdalas, bem como a saponita apresenta-se como cristais fibrorradiados circundando litoclastos de basalto em setores intensamente alterados.

Por fim, a lâmina KF100-GT57FD01/116,1 é composta por plagioclásio (10-15%) como mineral primário e rodocrosita, clorita Mg, clorita Fe, calcita, saponita, calcopirita e zeólita como secundários. Já os minerais acessórios são esfalerita, sericita, epidoto e quartzo. A matriz se apresenta totalmente alterada, sendo composta por rodocrosita, calcita, clorita Mg, clorita Fe e epidoto. A zona é cortada por microvênulas de quartzo e calcita. Os litoclastos de basalto andesítico mais preservados apresentam feições primárias de cristalização preservadas, tais como fenocristais de plagioclásio e amígdalas. Os fenocristais de plagioclásio encontram-se parcialmente alterados a sericita e as amígdalas ocorrem variavelmente preenchidas por zeólita, clorita Mg, rodocrosita, calcita e esfalerita. Os litoclastos de basaltos mais alterados

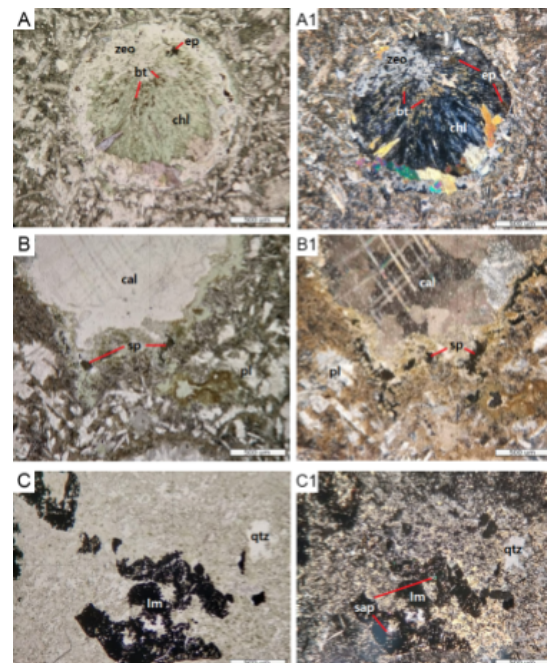


Figura 1: Lâminas analisadas (KF81 - A;A1, KF117 - B,B1; KF194 - C,C1). A-C são imagens em luz natural, enquanto A1-C1 são imagens em luz polarizada. A e A1) Representação de textura amigdaloidal, demonstrando em seu centro clorita Mg alterando biotita e nas bordas zeólita com epidotos. B e B1) Calcita envolta por clorita e com presença de grãos menores de esfalerita. C e C1). Grande grão alterado de ilmenita, com a presença de pequenos grãos de saponita evidenciados em cores de alta birrefringência em C.

apresentam, por vezes, apenas suas bordas bem marcadas com seu interior completamente substituído por saponita, clorita Mg e epidoto, por vezes, ainda com fenocristais de plagioclásio moderadamente preservados.

4.1.2. Alteração Hidrotermal:

Nas análises foram identificadas três tipos de alteração hidrotermal: sericitização (distal à zona mineralizada), cloritização (proximal à zona mineralizada) e carbonática (zona mineralizada), representadas na tabela 1.

A sericitização consiste em sericita-zeólita-esfalerita-saponita e é marcada pela substituição parcial de fenocristais de plagioclásio por sericita. Ela foi identificada em todas as lâminas, com evidência na KF81 e KF100, onde os fenocristais de plagioclásio encontram-se parcialmente alterados em sericita, a esfalerita ocorre com zeólita preenchendo amígdalas e a saponita apresenta-se como cristais fibrorradiados circundando litoclastos de basalto em setores intensamente alterados. A cloritização consiste em clorita-apatita-epidoto-titanita-ilmenita-turmalina onde os litoclastos de basaltos mais alterados apresentam apenas suas bordas bem marcadas com seu interior completamente substituído por clinoclóro e chamosita e epidoto. É evidenciada na lâmina KF161, onde os litoclastos de basaltos mais alterados apresentam apenas suas bordas bem marcadas com seu interior completamente substituído por clorita Mg e epidoto, por vezes, ainda com fenocristais de plagioclásio moderadamente preservados. Já a alteração carbonática é marcada por matriz completamente alterada a rodocrosita, calcita e ankerita, expressa principalmente pela lâmina KF100, onde a matriz se apresenta totalmente alterada, sendo composta por rodocrosita, calcita, clorita Mg, clorita Fe e epidoto e a zona mineralizada é cortada por microvênulas de quartzo e calcita.

4.1.3. Análise de dados do MEV

Dentre as lâminas, três seções (KF194, KF100 e KF81) foram selecionadas com base nas fases minerais identificadas para etapa de microscópio eletrônico de varredura (MEV), com foco na localização de cristais maiores que 25µm em quantidade estatística (~30 cristais) para datação U-Pb in situ via LA-ICP-MS.

Em MEV, foram identificados titanita e zircão como minerais potenciais para datação U-Pb tanto da alteração hidrotermal, quanto da idade

Tabela 1: Tabela paragenética dos minerais vistos nas sete amostras descritas, evidenciando os três tipos de alteração encontrados.

Mineral	Abreviação Mineral	Contexto Geológico	Primário	Alteração Sericitica	Alteração Cloritica	Alteração Carbonática (Estádio de Mineralização)
Augita	aug	Basalto Andesítico	X			
Plagioclásio	pl	Basalto Andesítico	X			
Vidro	gl	Basalto Andesítico	X			
Quartzo (silic/jaspe)	qtz	Formação Ferrífera Bandada	X			
Calcita I	mag	Formação Ferrífera Bandada	X			
Magnetita I	mag	Formação Ferrífera Bandada	X			
Magnetita II	cal	Formação Ferrífera Bandada Brechada	X			
Calcopirita I	ccp	Folhelhos Negros/Formação Ferrífera Bandada	X			
Clorita I	chl	Folhelhos Negros	X			
Sericita/lilita	ser	Zona Distal		-----		
Zeólita	zeo	Zona Distal		-----		
Esfalerita I	sp	Zona Distal		-----		
Saponita	sap	Zona Distal		-----		
Clorita II	chl	Zona Proximal			-----	
Apatita	ap	Zona Proximal			-----	
Epidoto	ep	Zona Proximal			-----	
Titanita	ttm	Zona Proximal			-----	
Ilmenita I	ilm	Zona Proximal			-----	
Rodocrosita	rds	Zona Mineralizada				-----
Calcita II	cal	Zona Mineralizada				-----
Ankerita	ank	Zona Mineralizada				-----
Magnetita III	mag	Zona Mineralizada				-----
Pirrotita	po	Zona Mineralizada				-----
Calcopirita II	csp	Zona Mineralizada				-----
Esfalerita II	sp	Zona Mineralizada				-----

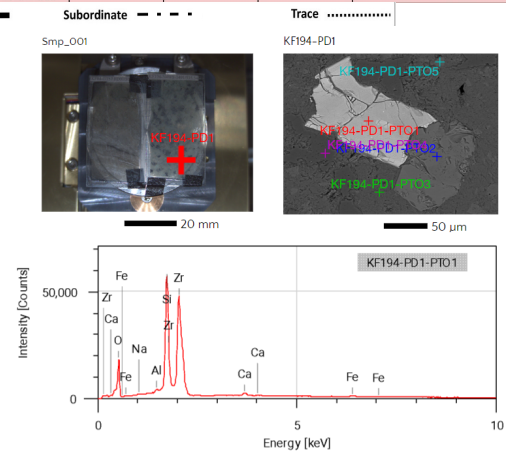


Figura 2: Fotos representativas dos pontos analisados pelo MEV da lâmina KF194, com um possível zircão. O gráfico do EDS (energy dispersive spectrometer) do ponto 1 demonstra os dados obtidos.

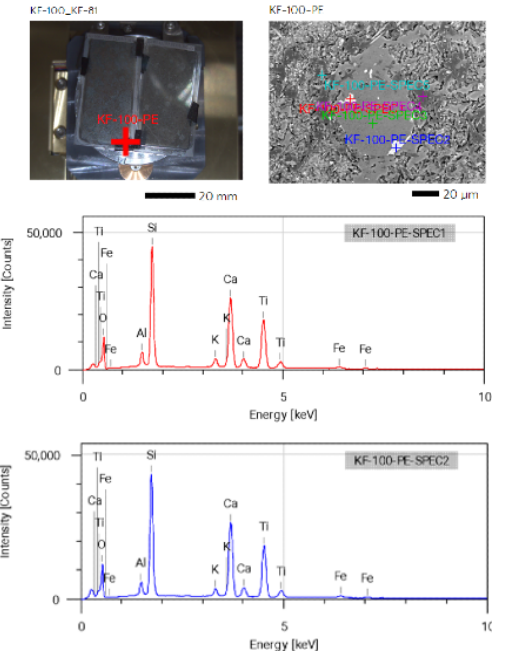


Figura 3: Fotos representativas dos pontos analisados pelo MEV da lâmina KF100, com possíveis titanitas. O gráfico do EDS (energy dispersive spectrometer) dos pontos 1 e 2 demonstra os dados obtidos.

de cristalização da rocha encaixante. O zircão, com dimensões de até 20µm, ocorre na matriz de basalto andesítico, evidenciado na figura 2. A titanita, associada ao estágio de cloritização, possui dimensões de aproximadamente 15µm e se associa a clorita e a calcita presentes nas amígdalas, como mostrado na figura 3. Contudo, a ausência desses minerais em tamanho analisável e quantidade estatística impede a datação de ambos eventos nas amostras selecionadas pelo método LA-ICP-MS.

5. Conclusões:

A revisão bibliográfica permitiu refinar e aprofundar o entendimento dos conceitos das alterações presentes nos depósitos VHMS, das técnicas de datação, bem como entender as alterações e paragêneses dos minerais que foram vistos em lâminas. Já as análises petrográficas e em MEV permitiram detalhar as associações minerais relacionadas aos diferentes estágios de sua formação, bem como suas principais características ópticas e viabilidade para estudos de datação pelo método U-Pb LA-ICP-MS.

- Se faz presente três tipos de alteração hidrotermal sob basalto andesítico, a saber: i) sericitização (distal a zona mineralizada), ii) cloritização (proximal a zona mineralizada) e iii) carbonática (zona mineralizada). A sericitização consiste em sericita-zeólita-esfalerita-saponita. A cloritização consiste em clorita-apatita-epidoto-titanita-ilmenita-turmalina e a alteração carbonática consiste em rodocrosita-calcita-ankerita.
- A observação de uma quantidade pequena de grãos de tamanho reduzido de titanita nas amostras pode sugerir que o sistema não alcançou temperaturas tão elevadas, típicas desses ambientes de formação.
- Não foram encontrados uma quantidade estatística de zircão e titanita em lâmina, além de nenhum dos pontos analisados das amostras revelar-se de tamanho adequado para a datação U-Pb por LA-ICP-MS, uma vez que todos tinham tamanho inferior a 25 µm.

6. Agradecimentos:

Agradecimentos ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica- PIBIC e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq. Os autores agradecem à companhia Vale S.A. pelo contínuo apoio logístico e financiamento deste projeto de Iniciação Científica (118284/2022-3) vinculado ao projeto de doutorado CAPES (88887.481382/2020-00), o qual é desenvolvido pela MSc. Kamila Gomes Fernandes sob orientação da Prof^a Dr^a Carolina Penteado Natividade Moreto.

7. Referências Bibliográficas

- Justo A.P., Dantas E.L., Bau M., Silva F.H.F., Santos R.V., Schorscher J.H.D. 2020. Paleobasinal to band-scale REE + Y distribution in iron formations from Carajás, Amazon Craton, Brazil, *Ore Geology Reviews*, Volume 127, 103750, ISSN 0169-1368.
- Melo G.H.C., Monteiro L.V.S., Xavier P.R., Moreto C.P.N., Arquaz R.M., Silva M.A.D. 2019. Evolution of the Igarapé Bahia Cu-Au deposit, Carajás Province (Brazil): Early syngenetic chalcopyrite overprinted by IOCG mineralization, *Ore Geology Reviews*, Volume 111, 102993, ISSN 0169-1368.
- Moreto, C.P.N., Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Creaser, R.A., Dufrane, S.A., Tassinari, C. C. G., Sato, K., Kemp, A. I. S., Amaral, W. S. (2015a). Neoproterozoic and Paleoproterozoic Iron Oxide-Copper-Gold Events at the Sossego Deposit, Carajás Province, Brazil: Re-Os and U-Pb Geochronological Evidence. *Economic Geology*; 110 (3): 809–835.
- Moreto, C.P.N., Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Creaser, R.A., Dufrane, S.A., Melo, G.H.C., Delinardo da Silva, M.A., Tassinari, C.C.G., and Sato, K., (2015 b). Timing of multiple hydrothermal events in the iron oxide-copper-gold deposits of the Southern Copper Belt, Carajás province, Brazil: *Mineralium Deposita*, v. 50, p. 517–546, doi: 10.1007/s00126-014-0549-9.
- Trunfull E.F., Hagemann G.S., Xavier R.P., Moreto C.P.N. 2020. Critical assessment of geochronological data from the Carajás Mineral Province, Brazil: Implications for metallogeny and tectonic evolution, *Ore Geology Reviews*, Volume 121, 103556, ISSN 0169-1368.