



Petrografia, geoquímica e balanço de massa dos estágios de alteração hidrotermal do depósito cuprífero Hades, extremo sudoeste do Domínio Carajás, Pará

Helena Martinho Coradini; Carolina Penteado Natividade Moreto; Thais Caroline Murer

Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, Brasil

Abstract. O depósito cuprífero Hades (localizado a sudoeste do Domínio Carajás) carece de informações geológicas detalhadas e integradas. Contextualizando-o no quadro geológico-regional, o trabalho caracteriza os tipos de alteração hidrotermal e mineralização de cobre, em termos de petrografia das assembleias minerais e geoquímica de rocha total. O minério hospeda-se preferencialmente em granitoides foliados e hidrotermalizados, subordinadamente rochas vulcânicas félsicas e máficas. Diferenciaram-se dois eventos de mineralização (minério em brecha e minério venular, ambos com calcopirita como principal sulfeto), além de quatro tipos de alteração hidrotermal características do depósito: i) albitização; ii) alteração propilitica, com clorita + epidoto ± calcita; iii) silicificação associada à mineralização de alto teor em brecha, onde o sulfeto principal é calcopirita, subordinadamente com epidoto ± calcita ± pirita; iv) formação de veios e vênulas, com actinolita + epidoto + clorita ± calcita, com halo de alteração com albita, que podem ou não estar mineralizados (calcopirita ± pirita). O minério em brecha é acompanhado por silicificação e propilitização, enquanto o minério venular, ocorre em veios com actinolita grossa, epidoto e halo de albita. Análises litogeoquímicas forneceram informações sobre enriquecimentos e empobrecimentos relativos que resultam de processos hidrotermais de interação fluido-rocha. Cálculos de balanço de massa mostraram expressiva adição de metais pelos fluidos mineralizantes (e.g. Fe, Cu, V, Cr, Zn, Ga, Sr, Y, Nb e Pb). Ademais, confirmaram a mobilidade de elementos considerados como imóveis em sistemas hidrotermais (e.g. Ti, Nb, Zr, Sm e Y), razão que pode ser atribuída à elevada razão fluido-rocha no evento de mineralização. A assinatura geoquímica do minério em brecha pode ser definida por enriquecimento em Cu-Fe-Mg-Ca-P-Zn-Cr-Ni-Co, e baixo conteúdo de Al-K-Na-Ti-Rb-Ba-Sr-Zr-V. A ausência de enriquecimento em Sn-Mo-W mostra que o depósito Hades tem mais similaridade geoquímica com depósitos IOCG neoproterozoicos (e.g., Corpo Sequeirinho, depósito Sossego) da Província Carajás do que com os depósitos cupríferos paleoproterozoicos. Além disso, o enriquecimento em Ni-Cr-Co sugere participação de fluidos hidrotermais que tiveram influência de rochas máfica-ultramáficas.

Palavras-chave: Domínio Carajás, depósito Hades, litogeoquímica

1 Introdução

O Domínio Carajás, localizado ao norte da Província Carajás, é reconhecido pelo potencial metalogenético e registra sobreposição de múltiplos eventos hidrotermais associados a mineralizações cupríferas que ocorreram no Neoproterozoico (2,70 Ga e 2,56 Ga) e no Paleoproterozoico (1,88 Ga), durante reativação regional de zonas de cisalhamento (Moreto *et al.*, 2015a,b; Xavier *et al.*, 2017). Destacam-se dois grupos de depósitos cupríferos de classe mundial, com pervasiva alteração hidrotermal regional: cobre polimetálico e tipo óxido de ferro-cobre-ouro (*iron oxide-copper-gold*, IOCG; Xavier *et al.*, 2017). O depósito cuprífero Hades, no extremo sudoeste do Domínio Carajás (Fig. 1), carece de informações geológicas detalhadas e integradas, inclusive com ausência de dados geoquímicos na

literatura, dificultando a compreensão de sua evolução metalogenética. É necessário contextualizá-lo no quadro geológico-regional.

Para isso, este trabalho caracteriza os estágios de alteração hidrotermal e mineralizações de cobre, utilizando-se de petrografia das assembleias minerais e geoquímica de rocha total. Por meio de petrografia em luz refletida e transmitida, identificaram-se as associações minerais da alteração hidrotermal e da zona mineralizada dos diferentes litotipos. As análises litogeoquímicas apontaram a assinatura geoquímica da mineralização cuprífera e permitiram investigar a mobilidade de metais no sistema. Os resultados, tratados com diagramas e cálculos de balanço de massa, assinalaram quais constituintes foram incorporados e quais foram perdidos com a evolução do sistema hidrotermal, refletindo em mudanças composicionais associadas com as interações fluido-rocha. A partir do método das isóconas de Gresens (1967) – cuja equação foi adaptada e apresentada graficamente por Grant (1986) – elaborou-se um estudo de balanço massa que possibilitou estimativas de enriquecimento e empobrecimento de constituintes químicos associados às zonas de alteração hidrotermal.

Desta forma, este trabalho visa auxiliar na reconstituição do sistema cuprífero do depósito Hades, integrando-se ao panorama geral que está sendo desenvolvido pelo grupo de pesquisa em metalogênese do Instituto de Geociências (IG).

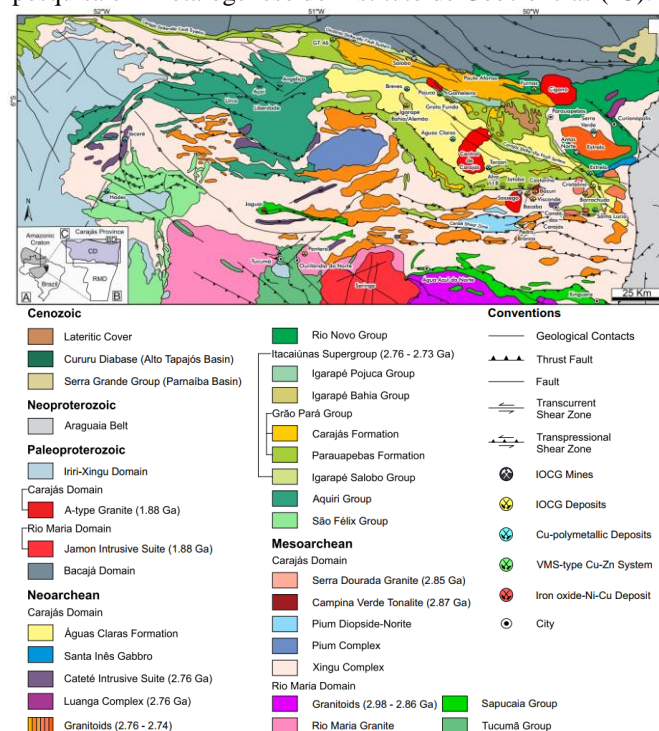


Figura 1. Mapa geológico do Domínio Carajás. Depósito Hades localizado no extremo sudoeste. Modificado de Vasquez *et al.*, 2008.



2 Metodologia

2.1 Amostragem

As amostragens foram a partir de testemunhos de sondagem (HADES DH04, DH07, DH12, DH13) disponibilizados pela VALE S/A. Orientando-se em um incremento de alteração hidrotermal, de incipiente a intensa, foram selecionadas amostras desde a rocha hospedeira granítica mais preservada, abrangendo diferentes estágios e intensidades de alteração e, por fim, contemplando o minério principal. Ao todo, derivaram-se 13 amostras para a petrografia e 15 para as análises geoquímicas de rocha total.

2.2 Descrições petrográficas

Fez-se descrição de 13 lâminas delgada-polidas em luz refletida e transmitida, com identificação das associações minerais dos tipos de alteração hidrotermal e de minério.

2.3 Análises litogeoquímicas

A preparação física das amostras e as análises foram realizadas no Laboratório de Geoquímica do IG. Foi utilizado o método de Fluorescência de Raios X (FRX) na determinação e quantificação dos componentes químicos (15 amostras). Amostras sulfetadas tiveram alguns constituintes elementares analisados por Espectrômetro de Emissão com Plasma Indutivamente Acoplado (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*, Q-ICP-MS), primordialmente elementos traço e elementos terras raras (ETR) de interesse.

2.4 Tratamento dos dados litogeoquímicos e balanço de massa

O software "GCDKit" (Janousek *et al.*, 2016) foi utilizado no tratamento dos dados geoquímicos: confecção de diagramas e aplicação do método gráfico de balanço de massa. Para o cálculo do balanço de massa, utilizou-se o método das isóconas (isocon, onde iso=igual/constante, con=concentração) de Gresens (1967), cuja equação principal foi adaptada para ser apresentada graficamente por Grant (1986). Assim, identificando elementos relativamente imóveis no sistema (estes que definem retas isóconas), investigam-se enriquecimentos e empobrecimentos relativos de constituintes químicos.

3 Resultados e Discussões

3.1 Caracterização das amostras

Diferenciaram-se quatro tipos de alteração que compõem o sistema hidrotermal do depósito Hades, descritas seguindo uma possível evolução temporal: **i)** albitização, por vezes com preservação da textura ígnea original da rocha granítica hospedeira. As zonas de substituição apresentam cor rósea e são caracterizadas pela substituição dos feldspatos ígneos em cristais subédricos de albita hidrotermal; **ii)** alteração propílica, com clorita + epidoto ± calcita, comumente sob a forma de *fronts* de alteração, ou como vênulas e veios, conferindo cor verde escura a preta para a rocha; **iii)** silicificação associada à mineralização de alto teor em brecha, em que o sulfeto principal é calcopirita, subordinadamente com epidoto ± calcita ± pirita; **iv)** formação de veios e vênulas, com actinolita + epidoto + clorita ± calcita, com halo de alteração com albita, que podem estar ou não mineralizados (calcopirita ± pirita).

Portanto, há dois eventos de mineralização, ambos com calcopirita como o principal mineral de minério e pirita subordinadamente: **a)** minério em brecha (I), envelopado por silicificação e propilitização, relacionada à deformação dúctil; **b)** minério venular (II), ocorrendo em veios e vênulas com actinolita grossa, epidoto e halo de albita, relacionada à deformação rúptil. Ou seja, a mineralização em brecha com quartzo (mineralização I) precede a mineralização como veios e vênulas com actinolita, epidoto e albita (mineralização II). As principais características macro e microscópicas dos litotipos estudados são apresentadas nas Figuras 2 a 6.

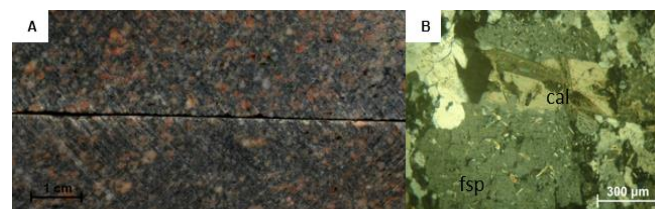


Figura 2. Granito hospedeiro mais preservado, com albitização incipiente, conferindo cor rósea à amostra. Fotomicrografia em luz transmitida (B), destacando cristais de fsp alterados para ep e cal. (Cal: calcita. Ep: epidoto. Fsp: feldspato ígneo).

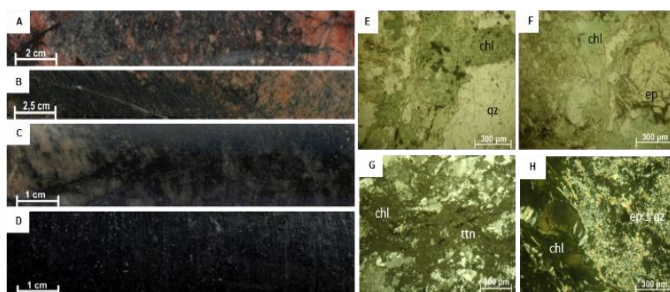


Figura 3. Progressivos estágios de alteração propílica (chl ± ep ± cal), desde a amostra menos alterada (A) até a propilitização muito intensa (D), conferindo cor verde escura a preta à rocha e obliterando o protólito ígneo. Fotomicrografias em luz transmitida (E-H). (Chl: clorita. Ep: epidoto. Qz: quartzo. Ttn: titanita).

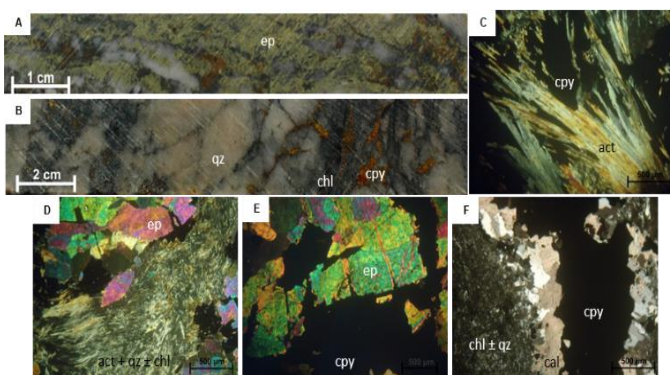


Figura 4. Litotipos representativos de intensa silicificação, moderadas propilitização e sulfetação. Fotomicrografias em luz transmitida (C a F). Destaque para paragenese de ep granular + act acicular + chl + qz + cal + cpy. (Qz: quartzo. Act: actinolita. Ep: epidoto. Chl: clorita. Cal: calcita. Cpy: calcopirita).

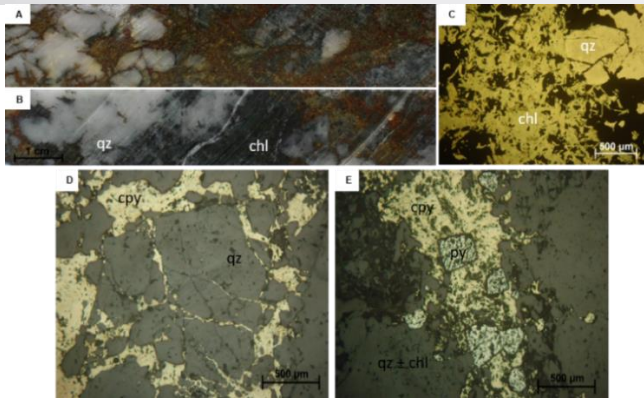


Figura 5. Minério em brecha envolvido por silicificação e propilitização. Fotomicrografias em luz transmitida (C) e refletida (D e E). Infiltrações de cpy em qz (D) e cristais idiomórficos de py (E). (Chl: clorita. Cpy: calcopirita. Py: pirita. Qz: quartzo).

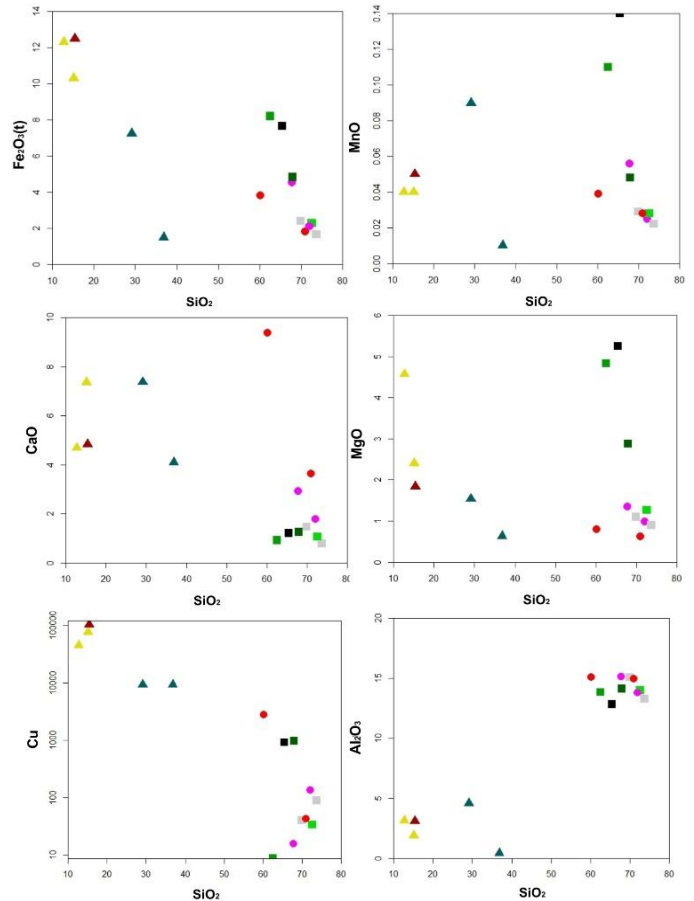


Figura 7. Diagramas de Harker relacionando óxidos maiores e elementos em função da sílica (óxidos plotados em % em peso e elementos em ppm).

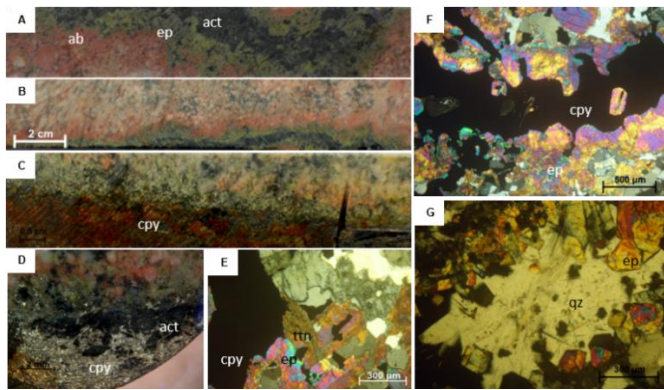


Figura 6. Litotipos representativos da mineralização em veios e vênulas de act-ep-cpy, com halo de ab. E, F e G: Fotomicrografias em luz transmitida. Destaque para ep granular e cristais aciculares de act inclusos em qz recristalizado e cpy maciça. (Ab: albita. Act: actinolita. Cpy: calcopirita. Ep: epidoto. Qz: quartzo. Ttn: titanita.).

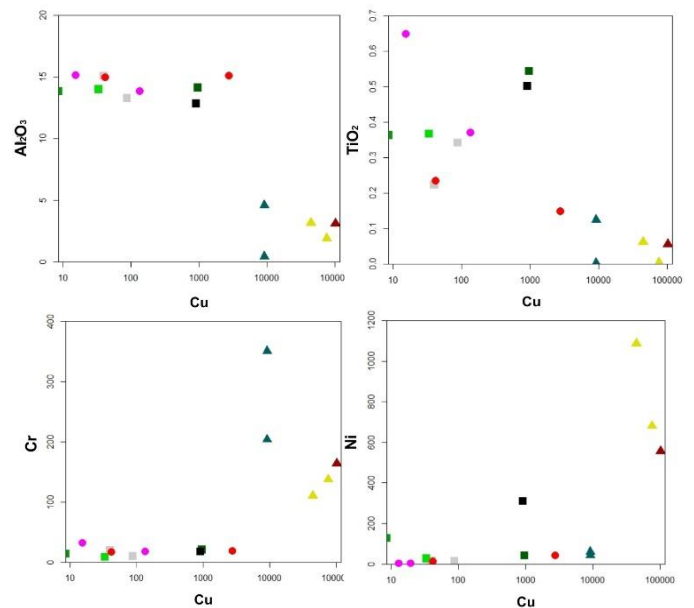


Figura 8. Diagramas binários relacionando o conteúdo de cobre em função de outros constituintes (óxidos plotados em % em peso e elementos em ppm).

3.2 Litogeoquímica e Balanço de Massa

Análises litogeoquímicas (Figs. 7 e 8) revelaram uma pequena tendência de incremento no conteúdo de Fe_2O_3 , MnO e MgO conforme há avanço nos estágios de propilitização (amostras de DHE a DHE5), refletindo a incorporação de clorita como o principal mineral ferromagnésiano da alteração hidrotermal. Os maiores teores de Fe_2O_3 encontram-se nas amostras com avançada propilitização e nas mineralizadas, destacando-se as amostras do tipo brecha e em veio sulfetado, devido à abundante calcopirita como principal mineral de minério. Estágios de alteração com relativos enriquecimentos em CaO refletem a incorporação de minerais hidrotermais de composição cálcica, principalmente nos veios, tais como epidoto, actinolita e subordinadamente calcita. Não foi possível observar um comportamento progressivo do granito menos alterado para amostras propilitizadas, havendo ausência de *trends* específicos.

Simbologia adotada nos diagramas geoquímicos.

- Granitos menos alterado (com albitização incipiente)
 - ▲ Minério em brecha (com silicificação e propilitização)
 - ▲ Amostras sulfetadas e silificadas
 - Veios de act + ep + chl ± cal ± ab
 - ▲ Veio mineralizado de act + ep + chl ± cal ± ab, com cpy ± py
- Estágios de propilitização:
- Amostra DHE1
 - Amostra DHE2
 - Amostra DHE3
 - Amostra DHE4
 - Amostra DHE5

Quanto ao padrão de distribuição dos ETR (Fig. 9), percebe-se que o minério em veio é relativamente empobrecido em ETR leves e pesados, comparado com as amostras propilitizadas. Tais amostras propilitizadas mostram notável enriquecimento em ETR leves. Entre as amostras



mineralizadas, o minério em veio é mais empobrecido em ETR pesados em relação às demais.

Conforme a distribuição de elementos traços (Fig. 10), nota-se que o minério em brecha é empobrecido em Rb, Ba, U, Nb, Sr e Zr em relação ao minério em veio e apresentando assinatura fortemente negativa para Ba, Nb, Ta, Zr e Ti. Por este diagrama, a assinatura geoquímica do minério em veio é mais próxima daquela do granito menos alterado, enquanto a distribuição do minério em brecha tende a acompanhar aquela das amostras sulfetadas e silicificadas.

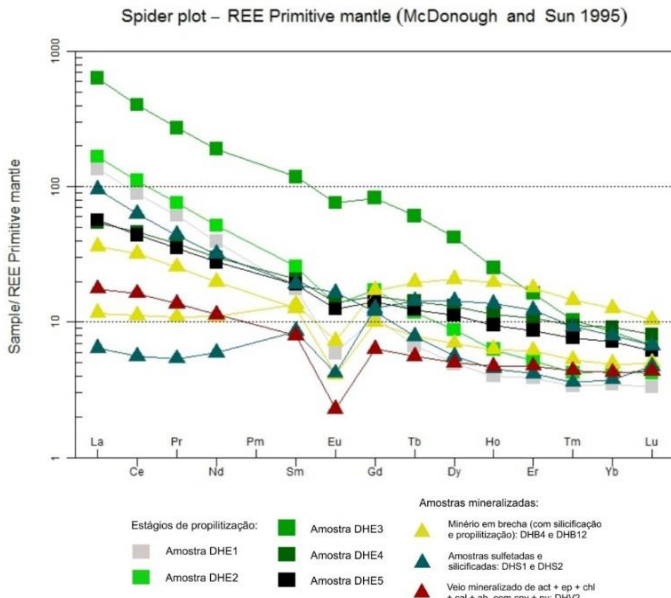


Figura 9. Padrão de distribuição dos ETR nas amostras mineralizadas e nas representativas da alteração propilitica.

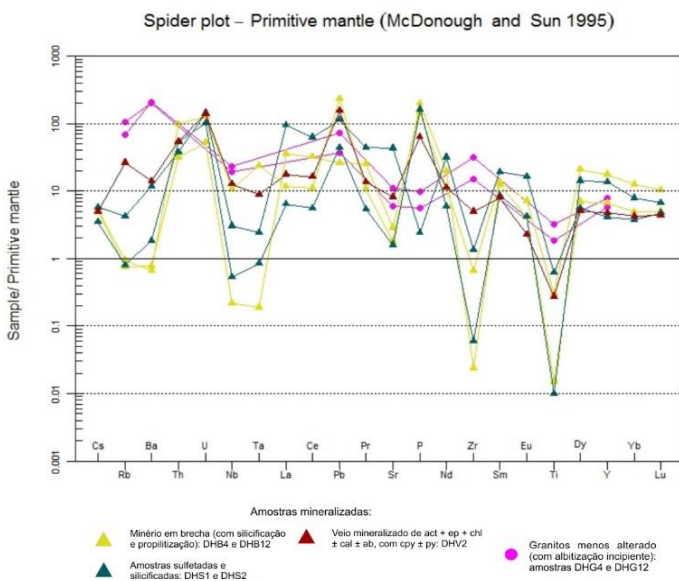


Figura 10. Distribuição dos elementos traços nas amostras de granito menos alterado e nas mineralizadas.

O método de balanço de massa foi aplicado comparando-se pares do tipo “rocha menos alterada” vs “rocha mais alterada”. Concentrações de elementos e de óxidos foram plotados em diagramas de isóconas, com os principais enriquecimentos (ganhos) e empobrecimentos (perdas) estimados. Os gráficos (Fig. 12) apresentam a

concentração dos elementos na rocha considerada mais hidrotermalizada (ordenada) em função das concentrações na rocha considerada menos hidrotermalizada (abscissa). Pelos cálculos e diagramas, concluiu-se que a expressiva adição de metais pelos fluidos mineralizantes (*e.g.* Fe₂O₃, Cu, V, Cr, Zn, Ga, Sr, Y, Nb e Pb) denota elevada razão fluido-rocha no evento hidrotermal de mineralização, nos quais as características dos fluidos hidrotermais foram preponderantes em relação às características da rocha inicial. Confirmou-se certa mobilidade de elementos considerados como imóveis em sistemas hidrotermais (*e.g.* Ti, Nb, Zr, Sm, Y) razão que também pode ser atribuída à elevada razão fluido-rocha nos eventos de mineralização.

Nos cálculos que comparam amostras graníticas com amostras mineralizadas, empobrecimentos em K₂O, Na₂O e CaO podem ser atribuídos à quebra dos feldspatos ígneos pelo fluido hidrotermal. De forma geral, as isóconas que comparam amostras mineralizadas com não mineralizadas (exemplo da Fig. 12B) mostraram concentração dos pontos próximo à origem, não permitindo uma boa visualização quanto à distribuição dos elementos no gráfico. Isso ocorreu devido ao expressivo enriquecimento em Cu, resultante de elevada razão fluido-rocha nos eventos hidrotermal responsáveis pela mineralização. Desta forma, não necessariamente as amostras mineralizadas (veios e brechas) representam um produto final decorrente diretamente da alteração do granito, após os progressivos estágios de alteração propilitica. Ou seja, não é possível afirmar que os minérios venular e em brecha são decorrentes de uma alteração progressiva a partir do protólito granítico, mas sim formado a partir da precipitação direta dos minerais a partir do fluido hidrotermal (*i.e.*, *infill*).

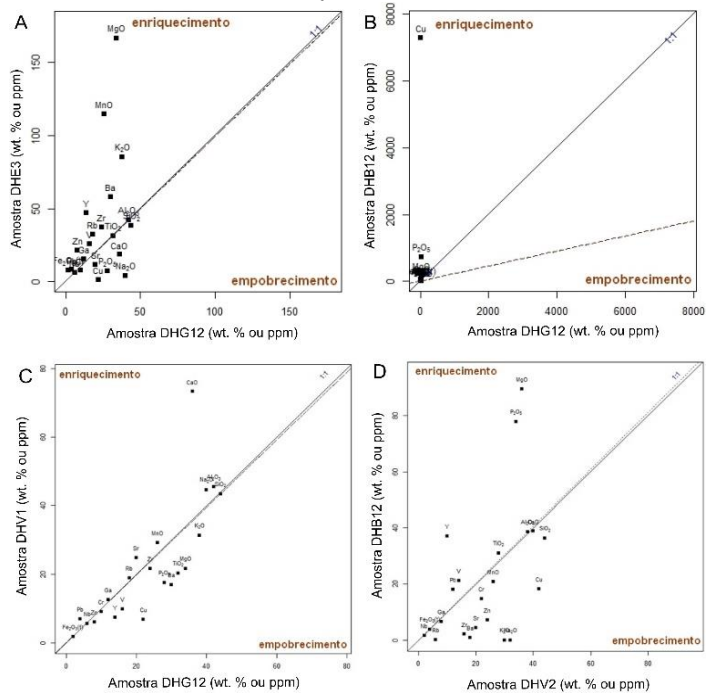


Figura 12. Diagramas de balanço de massa entre pares de amostras consideradas comparativamente entre si como menos alterada e mais alterada. Constituintes acima da reta isócona representam enriquecimento e abaixo dela empobrecimento. Óxidos plotados em % em peso e elementos em ppm. (A) DHG12 vs DHE3, granito menos alterado e propilitização intensa (B) DHG12 vs DHB12, granito menos alterado e minério em brecha (C) DHG12 vs DHV1, granito menos alterado e veio não mineralizado (D) DHV2 vs



DHB12, veio mineralizado e minério em brecha.

Por fim, a assinatura geoquímica do minério de alto teor pode ser definida por enriquecimento em Cu-Fe-Mg-Ca-P-Zn-Cr-Ni-Co, e baixo conteúdo de Al-K-Na-Ti-Rb-Ba-Sr-Zr-V. O enriquecimento em Ni-Cr-Co sugere participação de fluidos hidrotermais que tiveram influência de rochas máfica ultramáficas. Relatórios internos da Vale S.A. descrevem a presença no depósito Hades de rochas ultramáficas correlacionadas à Suíte Cateté, caracterizadas por piroxenitos e talco xistos, que fornecem anomalia positiva em Ni-Co-Cr em análises radiométricas. Reforça-se a hipótese de que o fluido hidrotermal responsável pela mineralização em brecha também teve contribuição de metais a partir de fontes máfica-ultramáficas regionalmente existentes na Província Carajás.

3.3 Breve comparação da assinatura geoquímica do minério do Hades com outros depósitos cupríferos de Carajás

Pode-se fazer uma comparação com outros depósitos cupríferos existentes na Província Carajás, especialmente dois do tipo IOCG (o corpo neoarqueano Sequeirinho e o corpo paleoproterozoico Sossego, ambos do depósito Sossego) e dois do tipo Cu-Au polimetálico (depósitos paleoproterozoicos Breves e Estrela).

Os dados litogeoquímicos disponíveis na literatura (Botelho *et al.*, Lindenmayer *et al.*, 2005; Carvalho, 2009) evidenciam que, no geral, todos os depósitos analisados possuem enriquecimento em Cu-Ni-Cr-Co quando espacial e geneticamente relacionados com rochas máfica-ultramáficas. Comparando a idade dos depósitos e o comportamento geoquímico, é possível estabelecer uma relação entre eles. Os depósitos paleoproterozoicos (Sossego, Breves e Estrela), apresentam enriquecimento em Sn, e os teores de U e Nb são mais elevados. Desta forma, a ausência de enriquecimento em Sn-Mo-W levanta a hipótese de que o depósito Hades tem mais similaridade geoquímica com depósitos IOCG neoarqueanos (*e.g.*, Corpo Sequeirinho, depósito Sossego) da Província Carajás do que com os depósitos cupríferos IOCG e Cu-Au polimetálicos paleoproterozoicos.

4 Considerações Finais

Esse trabalho permitiu caracterizar os tipos de alteração hidrotermal no sistema cuprífero do Depósito Hades, identificando as associações minerais correspondentes aos estágios de alteração hidrotermal e mineralização. A pesquisa investigou os processos de interação fluido-rocha responsáveis por empobrecimentos e enriquecimentos relativos de elementos no sistema hidrotermal. Foi possível determinar a assinatura do minério de alto teor, estudar mobilidade de elementos e correlacionar diferentes associações minerais às mudanças relativas na composição química das zonas de alteração hidrotermal.

Nas análises geoquímicas, não foi possível observar um comportamento progressivo do granito menos alterado para amostras propilitizadas, havendo ausência de *trends* específicos. Desta forma, não se pode afirmar que o minério é decorrente de uma alteração progressiva a partir do protólito granítico. Quanto ao balanço de massa, todos os cálculos realizados considerando amostras mineralizadas resultaram em expressiva adição de metais pelo fluido mineralizante, principalmente Fe₂O₃, Cu, V, Cr, Zn, Ga, Sr, Y, Nb e Pb.

Considera-se que os resultados desse trabalho, ao serem integrados com os estudos que vem sendo desenvolvidos pelo grupo de pesquisa, podem fornecer informações significativas para a compreensão da evolução geológica do depósito Hades, inclusive fornecendo subsídios na reconstituição do sistema cuprífero.

Agradecimentos

À orientadora Carolina e à co-orientadora Thais pela atenção e pelo apoio. À companhia Vale S/A pelo fornecimento das amostras. Às agências de fomento pelas bolsas de pesquisa: CNPq (bolsa de iniciação científica 119256/2018-5) e FAPESP (projeto 2016/13162-7). Ao Instituto de Geociências pelo suporte de infraestrutura.

Referências Bibliográficas

- Carvalho E.R. (2009) **Caracterização geológica e gênese das mineralizações de Óxido de Fe-Cu-Au e metais associados na Província Mineral de Carajás: Estudo de Caso do Depósito de Sossego**. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas.
- Botelho, N.F., Moura, M.A., Teixeira, L.M., Cunha, L.M., Olivo, G.R., Santana, M.U. **Caracterização geológica e metalogenética do Depósito de Cu (Au, W, Mo, Sn) Breves, Carajás**. 2005. Caracterização de Depósitos Minerais em Distritos Mineiros da Amazônia. Cap. VI. Brasília: DNPM-CT/Mineral-ADIMB.
- Grant J.A. (1986) **The Isocon Diagram: A simple solution to Gresens' Equation for metasomatic alteration**. *Economic Geology*, v 81, p. 1976 - 1982.
- Gresens R.L. (1967). **Composition-volume relationships of metasomatism**. *Chemical Geology*, v.2, p. 47 – 55.
- Janousek, Vojtech; Farrow, Colin; Erban, Vojtech (2006). **Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit)**. *Journal of Petrology* 47(6): 1255-1259. doi: 10.1093/petrology/egl013
- Lindenmayer, Z.G., Fleck, A., Gomes, C.H., Santos, A.B.S., Caron, R., Paula, F.C., Laux, J.H., Pimentel, M.M., Sardinha, A.S. **Caracterização geológica do Alvo Estrela (Cu-Au), Serra dos Carajás, Pará**. 2005. Caracterização de Depósitos Minerais em Distritos Mineiros da Amazônia. Cap. IV. Brasília: DNPM-CT/Mineral-ADIMB.
- 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*, v 110, p. 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., Sato K. (2015b) **Timing of multiple hydrothermal events in the iron oxide-copper-gold deposits of the Southern Copper Belt, Carajás Province, Brazil**. *Mineralium Deposita*. v 50, n. 5, p. 517-546.
- Vasquez M.L., Rosa-Costa L.T. (2008) **Texto Explicativo do Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Pará, escala 1:1.000.000**. Programa Geologia do Brasil (PGB), Integração, Atualização e Difusão de Dados da Geologia do Brasil, Mapas Geológicos Estaduais. Belém: CPRM-Serviço Geológico do Brasil, Superintendência Regional de Belém.
- Xavier R.P.; Moreto C.P.N.; Melo G.H.C.; Toledo P.; Hunger R.; Delinardo M.; Faustini J.; Lopes A.; Monteiro, L.V.S.; Previato, M.; Jesus, S.S.G.P.; Huhn, S.B. (2017) **Geology and Metallogeny of Neoproterozoic and Paleoproterozoic Copper Systems of the Carajás Domain, Amazonian Craton, Brazil**. *Anais do 14th SGA Biennial Meeting, Quebec, Canada*.