



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

**TESE DE DOUTORADO Nº 167**

**EVOLUÇÃO SUPERGÊNICA DO DEPÓSITO CUPRÍFERO  
ALVO 118 - PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS**

**Tese apresentada por:**

**PABLO HENRIQUE COSTA DOS SANTOS**

**Orientador: Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa (UFPA)**

---

**BELÉM – PARÁ  
2022**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo autor**

---

- S237e Santos, Pablio Henrique Costa dos.  
Evolução supergênica do depósito cuprífero Alvo 118 -  
Província Mineral de Carajás / Pablio Henrique Costa dos Santos.  
— 2022.  
xviii, 145 f. : il. color.
- Orientador: Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de  
Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e  
Geoquímica, Belém, 2022.
1. Mineralogia. 2. Geoquímica. 3. Intemperismo. 4. Cobre.  
I. Título.



**Universidade Federal do Pará**

**Instituto de Geociências**

**Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica**

**EVOLUÇÃO SUPERGÊNICA DO DEPÓSITO CUPRÍFERO  
ALVO 118 - PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS**


**TESE APRESENTADA POR:**


**PABLO HENRIQUE COSTA DOS SANTOS**

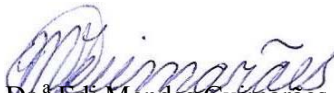
**Como requisito parcial à obtenção de Grau de Doutor em Ciências na Área de GEOQUÍMICA E  
PETROLOGIA, linha de pesquisa MINERALOGIA E GEOQUÍMICA**


**Data de Aprovação: 15 / 12 / 2022**


**Banca Examinadora:**

  
Prof. Marcondes Lima da Costa  
Orientador – UFPA

  
Prof.ª Dr.ª Adriana Maria Coimbra Horbe  
Membro – UnB

  
Prof.ª Dr.ª Edi Mendes Guimarães  
Membro – UnB

  
Prof. Dr. Luiz Carlos Bertolino  
Membro – CETEM

  
Prof. Dr. Rômulo Simões Angélica  
Membro – UFPA

Dedico este trabalho à minha mãe, Vera Lúcia da Costa, pela sua dedicação para sempre me proporcionar o melhor.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa pela orientação e constante esforço em proporcionar a infraestrutura analítica e os recursos financeiros necessários ao desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica pela da infraestrutura laboratorial e recursos financeiros.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelos recursos financeiros (Grants 305015/2016-8 e 442871/2018-0).

Ao apoio da Vale, que permitiu acesso às áreas de exploração, mina-piloto, testemunhos de sondagem, mapas, sessões e dados analíticos, além de disponibilizar funcionários muito atenciosos para nos receber e orientar, como os geólogos Arthur Cardoso, Wolney Rosa e Bruno Assis.

Ao Dr. Clóvis Maurity, que foi o primeiro a encorajar o desenvolvimento desta pesquisa e não mediu esforços para intermediar a cooperação com a Vale.

Ao empenho daqueles que, mesmo diante das restrições da pandemia Covid-19, conseguiram dar prosseguimento às nossas análises: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Desiree Roedink (University of Bergen), Dr. Matthew Locke (Louisiana State University) e Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Mariella Alzamora (Universidade Federal do Rio de Janeiro).

Ao Prof. Dr. Nilson Ferreira pelos ensinamentos em Espectroscopia Mössbauer e pela atenção com que me recebeu na Universidade Federal de Sergipe.

Ao Prof. Cláudio Nery Lamarão e Cleida Freitas pelos direcionamentos e palavras de incentivo nos momentos de dificuldade.

Aos meus colegas de trabalho, técnicos de laboratórios do Instituto de Geociências, sempre disponíveis para atender meus pedidos: Joelma Lobo Bruno Veras (Oficina de Laminação), Gisele Marques e Ana Paula (Laboratório de Microanálises), Natália Oliveira (Laboratório de Análises Químicas), Everaldo Lira (Laboratório de Sedimentologia).

Aos integrantes do Grupo de Mineralogia e Geoquímica Aplicada (GMGA), em especial Dr.<sup>a</sup> Glayce Jholy, pelo companheirismo nas atividades cotidianas do Mugeo e Lamiga.

Aos amigos que acompanharam de perto minha caminhada acadêmica: Lívia Beatriz, Ailton Brito, Priscilla Gozzi, Leonardo Negrão, Quezia Alencar, Aline Silva, Roseane Norat,

Darilena Porfírio, Lynette Bhabha, Fernanda Sobrinho, Socorro Progene, Daiveson Abreu, Bruno Apolo, Suyanne Flávia.

Ao companheirismo da minha esposa, Rayara Silva, que foi minha grande incentivadora em todos os momentos.

Aos meus pais, Vera Costa e José Santos, pelo esforço em me proporcionar uma boa educação e estarem sempre disponíveis para me ajudar no que for preciso.

## RESUMO

A Província Mineral de Carajás abriga um dos maiores cinturões cupríferos do mundo, em que as mineralizações hipogênicas sulfetadas foram parcialmente transformados em gossans e estes lateritizados e/ou truncados durante a evolução da paisagem. Estas coberturas representam fonte de informações para a exploração mineral e, em alguns casos, podem ser lavradas juntamente com as mineralizações hipogênicas parentais. Os platôs da Superfície Sul-americana hospedam gossans completos e lateritizados, enquanto as áreas denudadas no entorno, típicas da Superfície Velhas, exibem gossans incompletos ou imaturos, tendo como um exemplar deste último o depósito Alvo 118. Neste corpo, a mineralização hipogênica foi convertida em um gossan imaturo localizado em profundidade, enquanto as rochas hospedeiras foram intemperizados próximo à superfície, formando um saprólito mineralizado. O gossan é formado por uma zona de oxidação, que inclui goethita, malaquita, pseudomalaquita, cuprita, tenorita, cobre nativo, ramsbeckita, crisocola e libethenita; com relictos de uma zona de sulfeto secundário, representada por calcocita. Estes minerais estão distribuídos em zonas de domínio da goethita, malaquita, cuprita e libethenita, com evolução independente, em que suas sucessões minerais refletem a transição das soluções mineralizantes de condições ácidas para levemente alcalinas e aumento no potencial de oxirredução. Este ambiente foi estabelecido a partir da interação das soluções ácidas, derivadas da dissolução da calcopirita, com os minerais de ganga (calcita e apatita) e das rochas hospedeiras, granodioritos e, secundariamente, clorititos, que atuaram no tamponamento do sistema, favorecendo a formação de novos minerais carreadores do cobre. As fortes correlações do CuO com Ag, Te, Pb, Se, Bi, Au, In, Y, U e Sn na mineralização hipogênica refletem as inclusões de petzita, altaíta, galena, cassiterita e estannita na calcopirita. No gossan, Ag, Te, Pb, Se e Bi permaneceram associados e foram incorporados aos minerais de cobre neoformados. Por outro lado, Au, In, Y, U e Sn exibem maior afinidade com os oxi-hidróxidos de ferro, assim como, Zn, As, Be, Ga, Mo e Ni. Os valores de  $\delta^{65}\text{Cu}$  reforçam que o gossan investigado é imaturo e não foi intensamente afetado por processos de lixiviação. As principais fases minerais identificadas no saprólito são caulinita (dominante), associada com clorita, esmectita e vermiculita, além de quartzo e oxihidróxidos de ferro. No saprólito, os oxi-hidróxidos de ferro apresentam forte correlação com Ga, Sc, Sn, V, Mn, Co e Cr, em parte derivados do intemperismo das rochas parentais. Adicionalmente, dados de espectroscopia Mössbauer apontam importante papel da ferridrita e goethita como incorporadores de cobre no saprólito. Não há evidências da incorporação de sua pelos argilominerais. Os valores de  $\delta^{56}\text{Fe}$  indicam pouca contribuição da mineralização primária para

os conteúdos de Fe do saprólito, que é mais influenciado pelo intemperismo da clorita. A associação  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Hf, Zr, Th,  $\text{TiO}_2$ , Ce, La, Ba, Sr representa a assinatura geoquímica das rochas hospedeiras, que influenciam a composição química dos três tipos de mineralização. Por outro lado, os principais elementos rastreadores da mineralização hipogênica são a associação In, Y, Te, Pb, Bi, Se. O conhecimento detalhado do fracionamento mineral e geoquímico supergênico torna o depósito Alvo 118 um referencial para a investigação de gossans imaturos e saprólitos mineralizados em áreas denudadas da Província Mineral de Carajás ou em terrenos equivalentes.

**Palavras-chave:** mineralogia, geoquímica, intemperismo, cobre.



## ABSTRACT

The Carajás Mineral Province is home to one of the most extensive cupriferous belts in the world, where hypogene mineralizations were partially transformed into gossans, later lateritized and/or truncated during landscape evolution. These covers represent an information source for mineral exploration and, in some cases, can be mined together with parental hypogene mineralizations. The plateaus of the South American Surface host complete and lateritized gossans, while the surrounding denuded areas, typical of the Velhas Surface, exhibit incomplete or immature gossans, with the Alvo 118 deposit as an example. In this orebody, the hypogene mineralization was converted into an immature gossan located at depth, while the host rocks were weathered near the surface, forming a mineralized saprolite. The gossan comprises an oxidation zone, which includes goethite, malachite, pseudomalachite, cuprite, tenorite, native copper, ramsbeckite, chrysocolla, and libethenite, with relics of a secondary sulfide zone, represented by chalcocite. These minerals are distributed in the goethite, malachite, cuprite, and libethenite zones, with their mineral successions reflecting the transition of mineralizing solutions from acidic to slightly alkaline conditions and an increase in oxidation potential. This environment was established from the interaction of acid solutions, derived from chalcopyrite dissolution, with the gangue minerals (calcite and apatite) and the host rocks, granodiorites and, secondarily, chloritites, which acted in buffering the system, favoring the formation of new copper-bearing minerals. The strong correlations of CuO with Ag, Te, Pb, Se, Bi, Au, In, Y, U, and Sn in the hypogene mineralization reflect the inclusions of petzite, altaite, galena, uraninite, cassiterite, and stannite in chalcopyrite. In the gossan, Ag, Te, Pb, Se, and Bi remained associated and were incorporated into neofomed copper minerals. On the other hand, Au, In, Y, U, and Sn exhibit greater affinity with iron oxyhydroxides, as well as Zn, As, Be, Ga, Mo and Ni. The  $\delta^{65}\text{Cu}$  values reinforce that the investigated gossan is immature and was not intensely affected by leaching processes. The main mineral phases identified in the saprolite are kaolinite (predominant), associated with chlorite, smectite, vermiculite, quartz, and iron oxyhydroxides. Iron oxyhydroxides are strongly correlated with Ga, Sc, Sn, V, Mn, Co, and Cr, partly derived from the weathering of parent rocks. Additionally, Mössbauer spectroscopy data point to the important role of ferrihydrite and goethite as copper-bearing phases. There is no evidence of copper incorporation by clay minerals. The  $\delta^{56}\text{Fe}$  values indicate a little contribution of primary mineralization to the Fe content of the saprolite, which is more influenced by chlorite weathering. The association  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Hf, Zr, Th,  $\text{TiO}_2$ , Ce, La, Ba, and Sr represents the geochemical signature of the host rocks, which influence the chemical

composition of the three types of mineralization. On the other hand, the association In, Y, Te, Pb, Bi, and Se comprise the main pathfinder elements of the hypogene mineralization. Detailed knowledge of the supergene mineral and geochemical fractionation makes the Alvo 118 deposit a reference guide for investigating immature gossans and mineralized saprolites in denuded areas of the Carajás Mineral Province or equivalent terrains.

**Keywords:** mineralogy, geochemistry, weathering, copper.