



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

---

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 629**

**VETORIZAÇÃO GEOQUÍMICA, CARACTERIZAÇÃO E  
MODELAMENTO 3D DE ALTERAÇÕES HIDROTERMAIS  
EM SISTEMAS CUPRO-AURÍFEROS: EXEMPLO DO  
COMPLEXO SOSSEGO (PA), PROVÍNCIA MINERAL DE  
CARAJÁS**

**Dissertação apresentada por:**

**ANTÔNIO FABRÍCIO FRANCO DOS SANTOS  
Orientador: Prof. Carlos Marcello Dias Fernandes (UFPA)**

---

**BELÉM-PARÁ  
2023**

**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(a) autor(a)**

---

S237v Santos, Antonio Fabricio Franco dos.

Vetorização geoquímica, caracterização e modelamento 3D de alterações hidrotermais em sistemas cupro-auríferos: exemplo do Complexo Sossego (PA), Província Mineral de Carajás/ Antônio Fabricio Franco dos Santos. — 2023.

xviii, 125 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Carlos Marcello Dias Fernandes

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2023.

1. Depósitos do tipo IOCG. 2. Unidades litogeoquímicas. 3. Beneficiamento de minério. 4. Arqueano. 5. Cráton Amazônico. I. Título.

CDD 622.1015195

---



Universidade Federal do Pará  
Instituto de Geociências  
Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

**VETORIZAÇÃO GEOQUÍMICA, CARACTERIZAÇÃO E  
MODELAMENTO 3D DE ALTERAÇÕES HIDROTÉRMICAS  
EM SISTEMAS CUPRO-AURÍFEROS: EXEMPLO DO  
COMPLEXO SOSSEGO (PA), PROVÍNCIA MINERAL DE  
CARAJÁS**

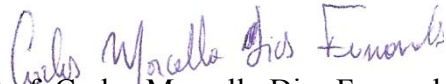
Dissertação apresentada por


**ANTÔNIO FABRÍCIO FRANCO DOS SANTOS**

Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de  
GEOQUÍMICA e Linha de pesquisa EVOLUÇÃO CRUSTAL E METALOGÊNESE

Data de Aprovação: 18 / 04 / 2023

Banca Examinadora:

  
Prof. Carlos Marcello Dias Fernandes  
Orientador – UFPA

  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lena Virgínia Soares Monteiro  
Membro – USP

  
Prof. Dr. Marco Antonio Galarza Toro  
Membro – UFPA

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, Ogum (São Jorge Guerreiro) e os espíritos de Luz que estão ao meu lado;

Meus Familiares, em especial a minha mãe Maria Luiza que sempre batalhou e incentivou para eu poder seguir nas lutas da vida e a minha esposa Belisa Barros que me acompanha, compreende e apoia nas jornadas diárias;

Aos meus filhos Antonio Pedro e Maria Flor, onde busco forças e razões para prosseguir;

Aos meus avós (em memória);

À empresa VALE S/A e aos gestores Cassio Diedrich e Marcos Alvim nos quais permitiram e proporcionaram a realização desse trabalho;

Aos colegas de trabalho Sandro Freitas, Benevides Aires, Petterson Barbosa, Rafael Sposito, Sormane Fogo e Valter Oliveira pelos apoios, ajudas e discussões geológicas;

Agradecer a Universidade Federal do Pará, ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) e ao professor Carlos Marcello Dias Fernandes por aceitar me supervisionar e orientar no desenvolvimento do projeto;

A todos que contribuíram de forma indireta para obtenção desse título.

## RESUMO

O Complexo cupro-aurífero Sossego está localizado na porção sul da Província Mineral de Carajás, ao longo de uma zona de cisalhamento regional WNW-ESSE. O mesmo está dividido nos setores Pista, Sequeirinho/Baiano e Curral/Sossego. As principais litologias hospedeiras que ocorrem no complexo são granitoides, metavulcânicas félsicas, ultramáficas e intrusivas máficas. Esse trabalho envolveu a aplicação de técnicas estatísticas multivariadas para as definições de unidades geoquímicas e possíveis vetores químicos nos quais essas informações foram transformadas em modelos 3D com intuito de auxiliar nas interpretações geológicas, guias exploratórios e geometalurgia do complexo em relação às mineralizações. No geral, o uso das técnicas revelou boas correlações entre os dados químicos e as unidades geoquímicas propostas, que permitiram definir de forma coerente as unidades, principais elementos químicos e prováveis paragêneses minerais hidrotermais dos depósitos. Foram realizadas análises individualizadas e correlação de elementos selecionados em diagramas de probabilidade, histogramas, binários, ternários e Bloxplot, objetivando a identificação de características geoquímicas e suas relações com as associações mineralógicas. No setor Pista ocorrem ao menos cinco unidades geoquímicas (sódica, sódico-sílica, potássico-clorítica, magnésiana e feldspática potássica), onde se destacam as unidades com elevados conteúdos de sódio e sílica para zonas mais proximais ao minério. Os vetores geoquímicos nesse setor que predominam e podem ser consideradas como farejadores ou contaminantes com relação às zonas mineralizadas são As, Al, Ag, Hf, Sr, Te, Zr, Mo, Na, Pb, S, La, W e U, associados diretamente às unidades geoquímicas sódica-sílica e sódica. Os diagramas ternários demonstraram um possível indicador da paragênese, que compreende um vetor de uma fase inicial sódica evoluindo para potássica. No setor Sequeirinho/Baiano ocorrem nove unidades geoquímicas (sódica, sódico-sílica, sódico-férrica, sódico-cálcica, cálcico-férrica, férrica, magnésiana, potássico-clorítica e feldspática potássica) e é possível observar claramente as paragêneses geoquímicas que vão das porções mais distais até as proximais a mineralização. Nas porções distais dominam elevados conteúdos de sódio, passando gradativamente para valores medianos de sódio e cálcio, chegando a elevados conteúdos de ferro, cálcio e magnésio nas zonas proximais à mineralização, mostrando que as principais unidades geoquímicas associadas às mineralizações cupríferas de alto teor são cálcico-férrica e férrica. Os elementos Ag, As, Bi, Ca, Cd, Co, Fe, Ga, Ge, In, Ni, P, Pb, S, Se, Te e V (Mg, Mn, Re, Sb, Sn, Th e U secundários) foram considerados como principais vetores e estão diretamente associadas às mineralizações e

unidades cálcica-férrica e férrica. Os diagramas ternários do setor sugerem dois prováveis Trends de evoluções das alterações hidrotermais, ambos de estágios iniciais sódicos, porém um vetor indicando a evolução para um estágio sódico-férrico e outro vetor para um estágio sódico-cálcico e, posteriormente, cálcico-férrico. No setor Sossego/Curral existem sete unidades geoquímicas (sódica, sódico-sílica, sódico-potássica, potássica, clorítica, férrica e cálcica). Esse setor revelou complexas correlações entre o zonamento hidrotermal e as unidades geoquímicas, em função de suas feições geológicas (brechas, veios, vênulas e disseminações posteriores). Os gráficos demonstraram que as unidades geoquímicas que mais apresentam afinidade com zonas mineralizadas são clorítica, cálcica e férrica (zonas de brechas e/ou vênulas). Na unidade clorítica os vetores químicos que se destacam são Ag, Be, Bi, Ca, Ce, Cu, La, Mn, Mo, Ni, P e S (K, Al, Mg e Fe secundários). A unidade geoquímica férrica ocorre principalmente associada às zonas clorítica e cálcica, porém se diferencia pelos elevados teores de ferro (>15 % Fe) e seus principais vetores geoquímicos são As, Cd, Ce, Co, Fe, Ga, Ge, In, La, Re, S, Sb, Se, Sn, Te, U e Y (Ag, Be, Ca, Cs, Li, Mg, Mn, Mo e V secundários). A unidade cálcica corresponde a intervalos ricos principalmente em calcita, actinolita e epídoto de brechas e vênulas que seccionam as rochas cloritizadas e suas principais vetores geoquímicos são Al, Ca, Cr, Mn, Sc, Sr, V e Zn (Ag, As, Cd, Co, Fe, Ga, In, S, Se e Sr secundários). O provável vetor paragenético aponta para um estágio inicialmente sódico, evoluindo gradualmente para um estágio potássico e seguindo para uma evolução para estágio clorítico. Os modelamentos 3D implícitos implicaram na materialização espacial das unidades e vetores geoquímicos obtidos por meio dos resultados estatísticos desenvolvidos, demonstrando visualmente melhores entendimentos geológicos dos fluxos hidrotermais, suas prováveis paragêneses químicas/mineralógicas e correlações com as mineralizações. Esse trabalho irá contribuir futuramente para os entendimentos litológico, estrutural e geoquímico aplicados operacionalmente no Complexo Sossego, além de proporcionar dados para estudos geometalúrgicos. Esse trabalho pode beneficiar as operações das minas com a reduções direta e indireta dos custos, incremento de segurança, previsibilidade e melhores performances operacionais dos processos de beneficiamento do minério.

**Palavras-chave:** depósitos do tipo *IOCG*; unidades litogeoquímicas; beneficiamento de minério; Arqueano; Cráton Amazônico.

## ABSTRACT

The copper-gold Sossego Complex, Pista, Sequeirinho/Baiano, and Curral/Sossego sectors, is in the southern portion of the Carajás Mineral Province, along with a WNW-ESSE regional shear zone. The main host lithologies that take place at the Complex are granitoids, felsic metavolcanic rocks, and mafic to ultramafic intrusive rocks. This work involved the application of multivariate statistical techniques to define geochemical units and vectors to help with geological interpretation, exploratory guides, and geometallurgy of the Complex concerning the mineralization. Overall, the use of those techniques revealed a good correlation between elemental data and the geochemical units proposed, which allowed coherently defining of the units, major elements, and probable hydrothermal mineralogical paragenesis for the deposits. Individual analyses and elemental correlation of chosen elements in probability diagrams, histograms, binary, ternary, and boxplots were carried out and aimed at identifying the geochemical features and their relation to the mineralogical association. At the Pista sector, at least five geochemical units occur (sodic, sodic-silica, potassic-chloritic, magnesian, and potassic feldspathic), where are highlighted the units with a higher concentration of sodium and silica for zones closer to the orebody. Geochemical vectors that predominate over this sector and that can be considered as trackers or contaminants about the ore zones are As, Al, Ag, Hf, Sr, Te, Zr, Mo, Na, Pb, S, La, W, and U, directly associated with sodic-silica and sodic geochemical units. Ternary diagrams have shown an indicator of paragenesis, which comprises a vector from an initial phase of sodic evolving to potassic. At Sequeirinho/Baiano sector, occur nine geochemical units (sodic, sodic-silica, sodic-ferric, sodic-calcic, calcic-ferric, ferric, magnesian, potassic-chloritic, and potassic feldspathic) in which the paragenesis is observed from the distal to the proximal zones concerning the orebody. Over distal zones, higher sodium concentration is observed, evolving to medium concentration of sodium and calcium, achieving high iron, calcium, and magnesium content nearby the mineralization, showing that the geochemical units related to the copper mineralization of high-grade are calcic-ferric and ferric. Elements such as Ag, As, Bi, Cd, Co, Fe, Ga, Ge, In, Ni, P, Pb, S, Se, Te, and V (secondary Ca, Mg, Mn, Re, Sb, Sn, Th, and U) were the main vectors directly associated with mineralization and calcic-ferric to ferric units. Ternary diagrams of this sector suggest two probable paragenesis vectors, both from initial stages of the sodic unit, although, one of them showed an evolution towards sodic-ferric and the other to a sodic-calcic stage and evolving to calcic-ferric unit afterward. In the Sossego/Curral sector occur seven geochemical units (sodic, sodic-silica,

sodic-potassic, potassic, chloritic, ferric, and calcic). This sector has revealed a complex correlation between hydrothermal zoning and geochemical units because of its geological features (breccias, veins, veinlets, and late dissemination). The graphics show that geochemical units that display an affinity with mineralized zones are chloritic, calcic, and ferric (breccia and vein zones). Over the chloritic unit, the highlighted elemental vectors are Ag, Be, Bi, Ca, Ce, Cu, La, Mn, Mo, Ni, P, and S (secondary K, Al, Mg, and Fe). Ferric geochemical unit happens mainly associated with chloritic and calcic zones, although it is not similar due to high iron concentration (>15% Fe), and the main geochemical vectors are As, Cd, Ce, Co, Fe, Ga, Ge, In, La, Re, S, Sb, Se, Sn, Te, U, and Y (secondary Ag, Be, Ca, Cs, Li, Mg, Mn, Mo, and V). The calcic unit corresponds to calcite, actinolite, and epidote-rich intervals in breccias and veinlets that cut chloritic rocks. Its main geochemical vectors are Al, Ca, Cr, Mn, Sc, Sr, V, and Zn (secondary Ag, As, Cd, Co, Fe, Ga, In, S, Se, and Sr). The probable paragenesis vector points to an initial sodic stage, evolving to a potassic stage followed by chloritic. Spatial materialization of the units and geochemical vector was made by 3D modeling obtained by statistical results that were developed, displaying a better visual geological understanding of hydrothermal flow, probable chemical/mineralogical paragenesis, and correlation with mineralization. This work will contribute in the future to the understanding of lithology, structural, and geochemistry of the Sossego Complex, besides provisioning geometallurgical data. This work can benefit open pit operations with direct or indirect reduction of cost, safety increment, and better operational performance of the ore processing.

**Keywords:** IOCG type deposits; lithogeochemical units; ore beneficiation; Archean; Amazonian Craton.