



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 673

**ASSINATURA GEOQUÍMICA DO OURO NA PROVÍNCIA
MINERAL DO TAPAJÓS, CRÁTON AMAZÔNICO: O
EXEMPLO DOS DEPÓSITOS SÃO JORGE E SÃO CHICO**

Dissertação apresentada por:

IOLANDA CLARA DO CARMO GOMES

Orientador: Prof. Dr. Claudio Nery Lamarão (UFPA)

Coorientador: Ms. Rafael Guimarães Corrêa Lima (VALE)

**BELÉM - PARÁ
2025**

**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)**

- G633a Gomes, Iolanda Clara do Carmo.
Assinatura geoquímica do ouro na Província Mineral do Tapajós,
Cráton Amazônico: o exemplo dos depósitos São Jorge e São Chico /
Iolanda Clara do Carmo Gomes. — 2025.
xv, 70 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Claudio Nery Lamarão
Coorientador(a): Prof. Me. Rafael Guimarães Corrêa Lima
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de
Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica,
Belém, 2025.
1. Minério de ouro. 2. Química mineral. 3. Elementos traços. 4. PCA.
5. Microscopia eletrônica de varredura. I. Título.

CDD 622.3422



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

**ASSINATURA GEOQUÍMICA DO OURO NA PROVÍNCIA
MINERAL DO TAPAJÓS, CRÁTON AMAZÔNICO: O
EXEMPLO DOS DEPÓSITOS SÃO JORGE E SÃO CHICO**


Dissertação apresentada por


IOLANDA CLARA DO CARMO GOMES

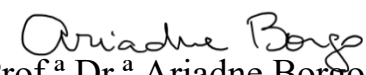
**Como requisito parcial à obtenção de Grau de Mestre em Ciências na Área de
GEOQUÍMICA e Linha de Pesquisa EVOLUÇÃO CRUSTAL E METALOGÊNESE.**

Data da Aprovação: 19 / 06 / 2025

Banca Examinadora:


Prof. Dr. Claudio Nery Lamarão
(Orientador - UFPA)


Prof.ª Dr.ª Cristina Valle Pinto-Coelho
(Membro - UFPR)


Prof.ª Dr.ª Ariadne Borgo
(Membro - UFPR)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais (José Augusto e Selumite) e minha avó (Eulalia) pelo apoio e incentivo incondicional aos meus estudos.

Ao meu orientador, Professor Lamarão e a Geóloga Gisele (minha coorientadora não oficial, mas do meu coração) que desde 2017, quando eu conheci a geologia forense, foram entusiastas comigo e apoiaram e incentivaram o meu desejo de produzir um trabalho nessa nova área. Agradeço pela disponibilidade, compreensão, pelas conversas que sempre me animaram, pelas correções e sugestões e por todo aprendizado pessoal e profissional ao longo desses anos. Dedico esta dissertação a vocês, que apesar dos obstáculos conseguimos trazer a vida, dando os primeiros passos no estudo dessa temática que sou apaixonada.

À Universidade Federal do Pará, ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica e ao Laboratório de Petrografia (LABPETRO) pela infraestrutura e suporte administrativo e acadêmico.

Ao Serviço Geológico do Brasil (SGB – Belém), e em especial ao geólogo Dr. Marcelo Lacerda Vasquez pela cessão das amostras, bem como outras informações que viabilizaram a realização desta pesquisa.

À CAPES(Brasil), pelo apoio financeiro por meio de bolsa de estudos. Código de financiamento 001.

À técnica Ana Paula, pela amizade e risadas que tornaram as longas horas de análises no MEV muito mais leves, e ao Laboratório de Microanálises da UFPA pela infraestrutura e apoio técnico.

À Joelma e ao Bruno, do Laboratório de Laminação, pela disponibilidade e compreensão nas diversas vezes que precisei repolir minhas lâminas e pela confecção de novas.

Ao Rafael Corrêa Lima, meu coorientador, pelo conhecimento, sugestões e correções.

Ao Professor Joel Macambira, por permitir minha participação como ouvinte nas aulas de microscopia de minério da graduação e pela disponibilidade para sanar minhas dúvidas.

Ao Professor Marco Toro, pela disponibilidade, paciência e auxílio no tratamento estatístico dos meus dados.

Aos Professores Carlos Marcello, Bhreno Maramgoanha e Davis Carvalho e ao geólogo Luciano Castro (SBG – Belém) pelas valiosas contribuições nas fases de seminário de apresentação deste mestrado.

Aos meus amigos e colegas da sala 09, 03 e de informática do PPGG, em especial a Wivian, Yury, Sara, Eli e Sarah pelas risadas, fofocas e companheirismo nesses anos de mestrado.

À minha psicóloga Michelle, pelo suporte e acolhimento durante fases essenciais desse trabalho.

À minha gata, Nilo, pelo ronco reconfortante enquanto eu escrevia esta dissertação.

E por fim, a todos que contribuíram direta e/ou indiretamente para a elaboração e conclusão deste trabalho.

“Nas páginas da Terra, o ouro escreve sua história em traços invisíveis, revelando segredos que apenas a geologia ousa decifrar.”

(Comunicação pessoal, 2025)

RESUMO

O ouro é um elemento nativo de grande importância econômica, e a determinação da assinatura geoquímica e isotópica deste minério, explorado e explotado nas principais províncias minerais do Brasil, tem se tornado uma ferramenta valiosa, não só para fins de prospecção mineral, mas também para auxiliar no controle da sua origem e circulação. Este trabalho tem como objetivos caracterizar e comparar a composição química do ouro de dois depósitos, por meio de espectrometria de dispersão de energia acoplada ao microscópio eletrônico de varredura (MEV-EDS) e avaliar a viabilidade na distinção de origem em nível local e regional, além de discutir os fatores que controlam a distribuição de elementos no ouro nativo. Os depósitos São Jorge e São Chico são depósitos de ouro localizados na porção leste da Província Mineral do Tapajós e alinhados ao longo do Lineamento Tocantinzinho (WNW-ESE). A mineralização do depósito São Jorge consiste em uma paragênese formada por ouro + pirita + calcopirita ± esfalerita e, raramente, galena, na qual, o ouro ocorre em duas gerações com composições distintas, contida em veios de quartzo ou de forma disseminada nas rochas mais hidrotermalizadas. O ouro deste depósito tem como principal mineral hospedeiro a pirita, ocorrendo na forma de inclusões com altos teores de Au (84,27 – 91,02%), e preenchendo fraturas em pirita com uma composição mais rica em Ag (7,86 – 15,72%). As diferenças geoquímicas e texturais indicam que houve pelo menos dois eventos distintos de mineralização. Já a mineralização do depósito São Chico consiste em uma paragênese formada por ouro + pirita + galena + esfalerita ± calcopirita, contida em sistemas de veios de quartzo sulfetados e polimetálicos, na qual o ouro ocorre como *electrum*. O ouro deste depósito tem como principal mineral hospedeiro a galena, cujas relações texturais entre esses dois minerais sugerem precipitação simultânea em condições de baixas temperaturas. Além disso, o ouro deste depósito também ocorre associado à calcopirita e esfalerita, cuja relação é também evidenciada em sua composição química, que apresenta maiores teores médios de Cu (0,44%) e Zn (0,42%), respectivamente. A análise de componentes principais (PCA) identificou Ag, Fe e Te como os elementos com maiores potenciais de discriminação do ouro entre esses dois depósitos, haja vista que o ouro do depósito São Jorge apresenta uma assinatura geoquímica com altos teores de Au (73,82 – 91,02%), Fe (0,54 – 6,21%) e Te (0,37 – 3,61%) em comparação com o ouro do depósito São Chico que apresenta uma assinatura com maiores concentrações de Ag (29,82 – 51,42%).

Palavras-chave: minério de ouro; química mineral; elementos traço; PCA; microscopia eletrônica de varredura.

ABSTRACT

Gold has a great economic importance, and the determination of its geochemical and isotopic signatures, exploited in Brazil's main mineral provinces, has become a valuable tool not only for mineral exploration but also for tracing its origin and circulation. The aim of this study is to characterize and compare the chemical composition of gold from two different deposits using scanning electron microscopy paired with energy-dispersive spectrometry (SEM-EDS), to evaluate the viability in differentiating provenance on local and regional scales, and to discuss the factors controlling element distribution in native gold. São Jorge and São Chico are gold deposits located in the eastern portion of Tapajós Mineral Province, aligned along the Tocantinzinho lineament (WNW-ESE). The gold mineralization at São Jorge deposit consists of a paragenesis formed by gold + pyrite + chalcopyrite ± sphalerite and, rarely, galena, which host two generations of gold with distinct chemical compositions. These gold phases occur either in quartz veins and/or in sulfide disseminations in strongly hydrothermally altered host rocks. In this deposit, gold is mainly hosted by pyrite, occurring in the form of inclusions with high Au contents (84.27–91.02 wt%) and filling pyrite fractures with a composition richer in Ag (7.86–15.72 wt%). The geochemical and textural differences indicate at least two distinct mineralizing events. In contrast, the São Chico deposit shows a paragenesis formed by gold + pyrite + galena + sphalerite ± chalcopyrite, in which gold occurs as *electrum* within polymetallic sulfide-bearing quartz vein systems. Here, gold is mainly hosted by galena, and textural relationships between these two minerals suggest simultaneous precipitation under low-temperature conditions. Gold in this deposit also occurs with chalcopyrite and sphalerite, as reflected in its chemical composition, which shows higher average of Cu (0.44 wt%) and Zn (0.42wt%) contents, respectively. Principal component analysis (PCA) identified Ag, Fe, and Te as the elements with the greatest potential for gold discrimination between these two deposits. Gold microparticles from the São Jorge deposit exhibits a geochemical signature with higher contents of Au (73.82–91.02 wt%), Fe (0.54–6.21 wt%), and Te (0.37–3.61 wt%), compared to gold from the São Chico deposit, which displays higher concentrations of Ag (29.82–51.42 wt%).

Keywords: gold ore; mineral chemistry; trace elements; PCA; scanning electron microscopy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo. (A) Mapa de localização dos depósitos estudados. (B) Mapa de localização da área de estudo no estado do Pará. (C) Mapa de localização da área de estudo nos municípios de Itaituba e Novo Progresso. 3
- Figura 2 - Províncias Geocronológicas do Cráton Amazônico, segundo (A) Tassinari & Macambira (1999) e (B) Santos *et al.* (2006), com destaque para localização do Domínio Tapajós. Fonte: Juliani *et al.* (2014). 9
- Figura 3 - Mapa Geológico da área de estudo, adaptado de Vasquez *et al.* (2008 e 2020). (A) Mapa com destaque para os depósitos estudados. (B) Localização da área do projeto da Província Mineral do Tapajós (SBG-CPRM) no Cráton Amazônico. (C) Mapa de localização da área de estudo na área do projeto da Província Mineral do Tapajós (SBG-CPRM). 10
- Figura 4 - Mapa geológico do Projeto São Jorge. Fonte: Brazilian Gold Corporation - BGC (2012) em Rodriguez & Soares (2021). 14
- Figura 5 - Zonas de alteração hidrotermal e mineralização do depósito São Jorge. Fonte: Rodrigues & Soares (2014) modificado por Vasquez *et al.* (2024). 16
- Figura 6 - Alteração hidrotermal do depósito São Jorge. (A) Zona de intensa alteração hidrotermal com feldspato potássico (Kfs), sericita (Ser), quartzo (Qtz) e pirita (Py) com vênulas de clorita (Chl) e pirita. (B) Microtextura de vênula de pirita com sericita e quartzo hidrotermal, substituição de minerais máficos por clorita e epidoto (Ep) e de plagioclásio (Pl) por feldspato potássico hidrotermal. (C) Agregado de pirita euédrica no granito hospedeiro hidrotermalizado. (D) Microtextura de agregados de pirita euédrica com quartzo e sericita, substituição de plagioclásio por feldspato potássico hidrotermal e vênulas de carbonato (Cb). Fotomicrografias (B e D) em luz transmitida e polarizadores cruzados. Fonte: modificado de Vasquez *et al.* (2024). 17
- Figura 7 - Modelo esquemático da mineralização do depósito São Chico. (A) Granito hospedeiro com zona de alteração potássica com feldspato potássico (Kfs), cloritização (Chl) e sericitização (Ser). (B) Zona de sulfetação em veio de quartzo com agregados de pirita (Py) e calcopirita (Ccp), e de galena (Gn) e esfalerita (Sp) envoltas por zona de cloritização e sericitização. (D) Veios de quartzo (Qtz) com sulfetos (Py + Ccp) e envelopes de sericitização e cloritização na bifurcação de falhas. Fonte: Tunningley & Ackroyd (2012) modificado por Vasquez *et al.* (2024). 19

- Figura 8 - Alteração hidrotermal do depósito São Chico. (A) Granito hospedeiro com intensa alteração potássica, constituído de feldspato potássico (Kfs) hidrotermal hematizado, agregados de clorita (Chl), vênulas de sericita (Ser) e pirita (Py) disseminada. (B) Veio de quartzo (Qtz) com adulária (Adl) e galena (Gn) e envelope de sericita na margem. (C) Propilitização de granito com substituição de minerais máficos por epidoto (Ep) e clorita, cortado por ênulas de quartzo tardias com textura em pente. (D) Granito sericitizado cortado por vênula de carbonato (Cb) e com pirita. Fonte: modificado de Vasquez *et al.* (2024).20
- Figura 9 - Aspecto geral dos principais minerais associados ao ouro no depósito São Jorge. (A) Imagem de elétrons retroespalhados. (B) Fotomicrografia em luz refletida e polarizadores paralelos. Carbonato (Cb); Calcopirita (Ccp); Pirita (Py); Quartzo (Qtz); Esfalerita (Sp).21
- Figura 10 - Características morfológicas e texturais da pirita no Depósito São Jorge em imagens de elétrons retroespalhados. (A) Agregado de pirita (Py) com inclusão de calcopirita (Ccp) e fraturas preenchidas por ouro (Au), barita (Brt) e sulfeto de Bi e Pb (Bi + Pb + S). (B) Cristal de pirita com inclusões de monazita (Mnz), rutilo (Rt) e Bi + Pb + S. (C) Cristais de pirita com inclusões de apatita (Ap) e zircão (Zrn), além de fratura preenchida por galena (Gn). (D) Agregado de pirita com intercrescimento/alteração de calcopirita e inclusão de carbonato (Cb). (E) Cristal de pirita com inclusões de calcopirita, esfalerita e magnetita (Mag). (F) Agregado de pirita com fratura preenchida por bismuto nativo (Bi). (G) Cristais de pirita com inclusão de rutilo, K-feldspato (Kfs) e fratura preenchida por galena. (H) Detalhe da galena da fig. G preenchendo fratura em pirita.....23
- Figura 11 - Aspectos morfológicos e texturais dos principais minerais associados ao ouro do Depósito São Jorge em imagens de elétrons retroespalhados. (A) Cristais de pirita (Py), calcopirita (Ccp) e de esfalerita (Sp) com intercrescimento em calcopirita. (B) Cristais de calcopirita com inclusão de pirita. (C) Cristais de calcopirita com minerais de bismuto e bismuto nativo (Bi) associados. (D) Cristal de esfalerita com desmisturas de calcopirita e pirita em veio de quartzo (Qtz) e carbonato (Cb). (E) Cristais de calcopirita com magnetita (Mag), monazita (Mnz) e sulfeto de bismuto, chumbo e prata associados. (F) Cristal de pirita com inclusão de calcopirita e cristal de esfalerita com intercrescimento de sulfeto de bismuto e chumbo, e cristais anédricos de fluorita (Fl).24

Figura 12 - Aspecto geral dos principais minerais associados ao ouro no depósito São Chico.

(A) e (C) Imagem de elétrons retroespalhados. (B) e (D) Fotomicrografia em luz refletida e polarizadores paralelos. Calcopirita (Ccp); Electrum (Au + Ag); Pirita (Py); Quartzo (Qtz); Esfalerita (Sp).25

Figura 13 - Aspectos morfológicos e texturais dos sulfetos associados ao ouro do Depósito São Chico em imagens de elétrons retroespalhados.

(A) Relação textural entre galena (Gn) e pirita (Py). (B) Galena com intercrescimento de esfalerita (Sp) e inclusão de calcopirita (Ccp). Relação textural entre (C) esfalerita, pirita e quartzo (Qtz), e galena preenchendo fratura em pirita e (D) ouro (Au + Ag), pirita, calcopirita, esfalerita e galena. (E) Cristais de esfalerita com desmisturas de galena, próximo a veio de quartzo e anfibólio (Am). (F) Galena com intercrescimento de calcopirita, e inclusão de esfalerita com intercrescimento de calcopirita em pirita. (G) Calcopirita zonada e com inclusão de galena e pirita. (H) Calcopirita associada a pirita e zircão (Zrn) em rocha alterada.27

Figura 14 - Formas de ocorrência do ouro no depósito São Jorge em imagens de elétrons retroespalhados.

(A) Inclusões de ouro (Au) em cristal euédrico de pirita (Py). (B) Agregado de pirita com inclusão de ouro, associado a veio de carbonato (Cb) e barita (Brt). (C) Quartzo (Qtz) com inclusões de ouro e monazita (Mnz) e pirita associada. (D) Ouro livre com bordas corroídas associado a veio de carbonato e barita. (E) Agregado de pirita com fratura preenchida por ouro. (F) Fratura em pirita preenchida por ouro e barita. (G) Electrum (Au + Ag) incluído em cristal de calcopirita (Ccp) e associado espacialmente a galena (Gn) e pirita. (H) Pirita com bolhas de teluretos (Te) de ouro e/ou prata e/ou bismuto (Bi), e inclusão de galena.29

Figura 15 - Formas de ocorrência do ouro no depósito São Chico em imagens de elétrons retroespalhados.

(A) partículas de electrum (Au +Ag) ocorrendo de forma livre em quartzo (Qtz) e na borda de pirita (Py) assim como a galena (Gn). (B) Fratura em pirita preenchida por galena e electrum. (C) Partícula de electrum incluída em pirita. (D) Esfalerita (Sp) com inclusões de electrum, galena e pirita, além de desmisturas de calcopirita (Ccp). (E) Pirita com inclusão de electrum associada a calcopirita. (F) Pirita com inclusão de electrum associada a esfalerita. (G) Pirita com inclusões de esfalerita e com cavidade preenchida por calcopirita com inclusão de electrum. (H) Fratura em pirita preenchida por galena, electrum e esfalerita.31

Figura 16 - Resultado da análise de componentes principais. (A) Círculo de correlação no gráfico de projeção das variáveis. (B) Gráfico da projeção das amostras no plano-fator (1 x 2).37

Figura 17 - Gráfico dos componentes principais (PCA).	39
Figura 18 - (A) diagrama binário Ag vs Fe+Te. (B) diagrama ternário Ag vs Au/10 vs Fe+Te, com destaque para as três fases de ouro discriminadas no depósito São Jorge: I - ouro como inclusões e II - ouro em fraturas.....	39

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
EPÍGRAFE	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	ix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.1.1 Área de estudo (localização e acesso)	2
1.1.2 Justificativa	3
1.1.3 Objetivos	4
1.1.3.1 Objetivos gerais	4
1.1.3.2 Objetivos específicos.....	4
1.2 MATERIAIS E MÉTODOS	4
1.2.1 Pesquisa bibliográfica	4
1.2.2 Seleção e tratamento das amostras	5
1.2.3 Análise petrográfica	5
1.2.4 Análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV)	5
1.2.5 Pré-tratamento de dados	6
1.2.6 Análise de componentes principais (PCA)	7
2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	8
2.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO DO DOMÍNIO TAPAJÓS NO CRÁTON AMAZÔNICO	8
2.2 PROVÍNCIA MINERAL DO TAPAJÓS (PMT)	9
2.2.1 Unidades litoestratigráficas	9
2.2.1.1 Associações do embasamento.....	9
2.2.1.2 Vulcano-plutonismo paleoproterozoico.....	10

2.2.2 Depósitos auríferos	12
2.2.3 Depósito São Jorge (não está no sumário).....	14
2.2.2 Depósito São Chico	18
3 RESULTADOS	21
3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS DE OURO E DEMAIS MINERAIS ASSOCIADOS	21
3.1.1 Depósito São Jorge	21
3.1.2 Depósito São Chico	25
3.2 QUÍMICA MINERAL E DISTRIBUIÇÃO DO OURO	28
3.2.1 Depósito São Jorge	28
3.2.2 Depósito São Chico	30
3.3 QUÍMICA MINERAL DOS SULFETOS	33
3.3.1 Depósito São Jorge	33
3.3.2 Depósito São Chico	35
3.4 ESTATÍSTICA MULTIVARIADA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO OURO.....	37
4 DISCUSSÃO	40
4.1 ASSINATURA GEOQUÍMICA DO OURO EM DEPÓSITOS DA PMT	40
4.1.1 Relação da composição do ouro com a assembleia mineral	41
4.1.2 Relação da composição do ouro com a textura	42
4.2 PERCEPÇÕES SOBRE O PROCESSO DE MINERALIZAÇÃO DO OURO	43
5 CONCLUSÕES	45
REFERÊNCIAS	46
APÊNDICE A	50
APÊNDICE B	52
APÊNDICE C	54
APÊNDICE D	55
APÊNDICE E	56

APÊNDICE F	57
APÊNDICE G	58
APÊNDICE H	59
APÊNDICE I	60
APÊNDICE J	61
APÊNDICE K	62
APÊNDICE L	63
APÊNDICE M	64
APÊNDICE N	65
APÊNDICE O	66
APÊNDICE P	67
APÊNDICE Q	68
APÊNDICE R	69
APÊNDICE S	70

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O ouro (Au) é um elemento-traço raro, de abundância média na crosta terrestre de 0,004 ppm que quando em concentrações anômalas, constitui depósitos minerais (Enzweiler & Duarte 2007, Klein & Dutrow 2012). O ouro nativo pode ser considerado como: ouro visível, ocorrendo como partículas inclusas em outros minerais, preenchendo fraturas ou livre; e ouro invisível, formando micro/nano inclusões, soluções sólidas ou incorporados na estrutura cristalina de sulfetos, principalmente (Cook & Chryssoulis 1990). Apesar do ouro nativo ser relativamente puro, geralmente contém algum teor de prata (Ag) e pode conter uma grande variedade de outros elementos traços em sua composição, tais como, mercúrio (Hg), paládio (Pd), bismuto (Bi), chumbo (Pb), cobre (Cu), antimônio (Sb), enxofre (S), níquel (Ni) e elementos terras raras (ETR) (Boyle 1979).

A depender do ambiente e do processo de geração, assim como das variações geológicas locais, cada depósito mineral primário ou grupo de depósitos terá uma associação de elementos químicos própria, cuja combinação resultará na sua assinatura geoquímica (Jost *et al.* 2007). No âmbito da exploração mineral, o conhecimento e a compreensão da assinatura geoquímica de um depósito visam auxiliar a identificação de possíveis elementos-alvo ou elementos farejadores do minério de interesse durante a fase de prospecção geoquímica, como por exemplo o arsênio¹ (As) e telúrio² (Te) nos depósitos auríferos (Jost *et al.* 2007).

A possibilidade do uso da assinatura geoquímica do ouro primário para distinguir tipos de depósitos tem tido resultados satisfatórios, por meio de determinação quantitativa de elementos maiores e menores por Microsonda Eletrônica e de elementos traços por ICP-MS (Pochon *et al.* 2021). Em modelos de discriminação definidos por análise discriminante por mínimos quadrados parciais (PLS-DA), Liu *et al.* (2021) identificaram Zn, Ni, Sb, Pb e Te como os elementos com maior potencial discriminante para depósitos orogênicos, epitermais e de sulfetos maciços hospedados em rochas vulcânicas (VMS). Enquanto Liu & Beaudoin (2021) demonstraram a aplicabilidade de modelos de classificação *Random Forest* como preditivo de indicação da fonte de partículas de ouro em teste cego com 94,3% de precisão. Além disso, sugeriram as seguintes assembleias de elementos traços nas partículas de ouro: Hg, Bi, Sb, Cu,

¹ Na forma de arsenopirita, compondo a paragênese dos minerais de ganga.

² Na forma de teluretos.

Pb, Te, S, Ag, Pd (ouro epitermal); Pb, Hg, Cu e Sb (ouro orogênico); Sb, Pd, S, Hg e Ag (ouro VMS); Pb, Hg, Sb e Ag (ouro pórfito).

Por ser um mineral de importância econômica, o conhecimento da assinatura geoquímica e isotópica do ouro tem se tornado uma ferramenta valiosa não só para fins de prospecção mineral, mas também para auxiliar no controle da sua origem e circulação. Ou seja, como ferramenta na resolução de questões legais, que podem estar relacionadas à extração desse minério em áreas irregulares e/ou de conflito, com populações indígenas por exemplo.

Internacionalmente há uma grande gama de trabalhos com essa temática, tais como, Watling *et al.* (1994) que utilizaram o LA-ICP-MS como técnica para determinar a “impressão digital” do ouro do oeste da Austrália e da África do Sul, tendo como propósito conseguir identificar o país de origem; e Roberts *et al.* (2016) que demonstraram o potencial do Pb como elemento discriminante de ouro legal e ilegal produzido na África do Sul, por meio de análises em IPC-OES. Além dos estudos relevantes de Dixon & Merkle (2019), Dixon & Schouwstra (2017), Ketchaya *et al.* (2022), Pochon *et al.* (2021), entre outros.

Recentemente, pesquisadores brasileiros têm desenvolvido estudos similares (e.g., Castro *et al.* 2025, Fabricio-Silva *et al.* 2025), com o intuito de determinar as assinaturas geoquímicas e isotópicas do ouro explorado em diversas localidades das principais regiões auríferas do país, inclusive com incentivo e financiamento concedido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) através do edital Programa de Cooperação Acadêmica em Segurança Pública e Ciências Forenses (PROCAD-SPCF).

Considerando a importância desta abordagem, este trabalho visa a determinação da assinatura geoquímica do ouro primário (partículas presentes na rocha) de dois depósitos auríferos importantes da Província Mineral do Tapajós (PMT), São Jorge e São Chico, por Microscopia Eletrônica de Varredura, definindo os elementos associados ao ouro de cada depósito estudado. Dessa forma, além de contribuir com o conhecimento geológico acerca de depósitos auríferos da PMT, os dados gerados nessa pesquisa também poderão dar suporte a questões relacionadas à rastreabilidade e origem deste minério.

1.1.1 Área de estudo (localização e acesso)

A Província Mineral do Tapajós (PMT) está localizada na porção sudoeste do estado do Pará e engloba principalmente os municípios de Itaituba e Novo Progresso. Os depósitos São Jorge e São Chico, foco desta pesquisa, estão localizados, respectivamente na porção leste e centro-

leste da província, a cerca de 80km a noroeste da cidade de Novo Progresso. Ambos os depósitos têm como via de acesso principal a rodovia Cuiabá-Santarém (BR-163) e a vicinal Transgarimpeira. A figura 1 ilustra o mapa de localização dos depósitos estudados.

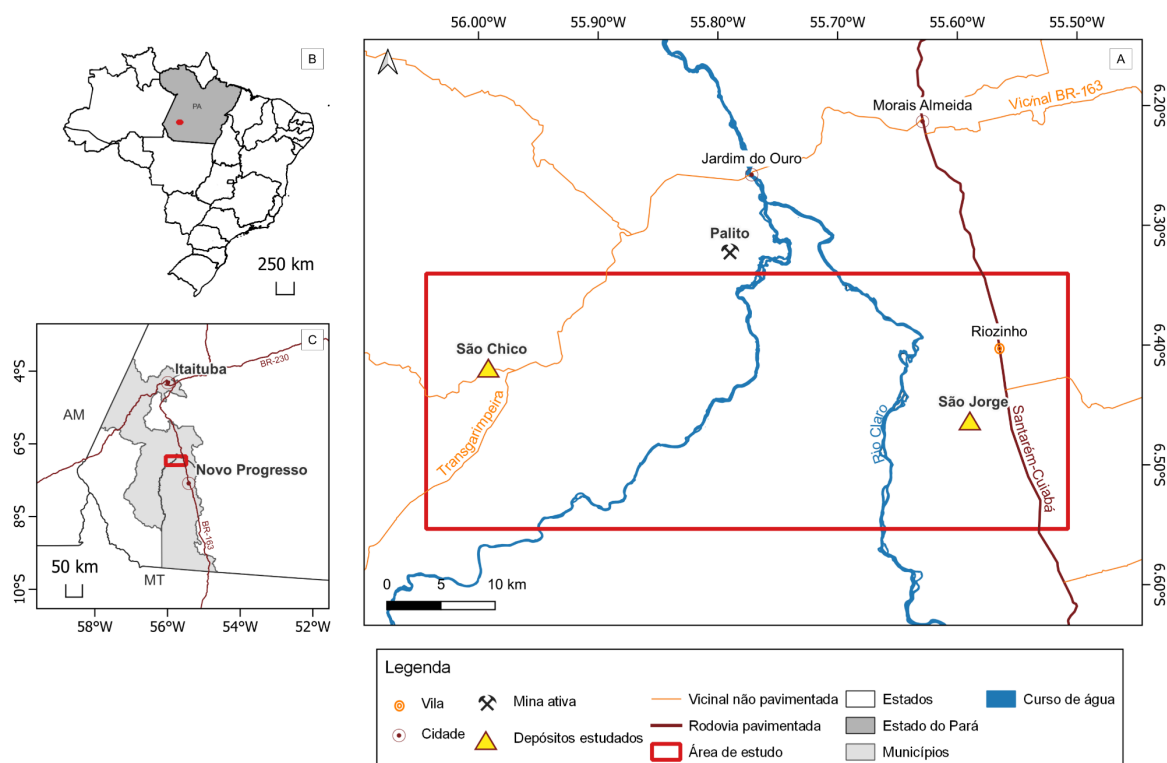


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo. (A) Mapa de localização dos depósitos estudados. (B) Mapa de localização da área de estudo no estado do Pará. (C) Mapa de localização da área de estudo nos municípios de Itaituba e Novo Progresso.

1.1.2 Justificativa

Segundo dados do Anuário Mineral Brasileiro – ANM (2023), o ouro é a segunda substância metálica que mais contribuiu no valor da produção mineral comercializada no ano de 2021, gerando mais de R\$ 408 milhões de reais em CFEM³ arrecadados. A exploração deste minério no Pará, o coloca como um dos cinco principais estados produtores dessa commodity no País (ANM 2023).

Considerando que a PMT é historicamente conhecida pela sua grande vocação metalogenética, com uma expressiva concentração de garimpos de ouro, sendo estimado que já foram lavrados mais de 750t de ouro⁴ (Juliani *et al.* 2014), e que a região de Itaituba (ANM

³ Compensação Financeira pela Exploração Mineral.

⁴ Segundo dados não oficiais.

2023) é uma das principais produtoras de ouro do país, é relevante desenvolver estudos que possam determinar a assinatura geoquímica do ouro da região. Além disso, a demanda de rastreabilidade do ouro também é crescente devido à proliferação dos garimpos ilegais, que introduzem na economia brasileira e mundial ouro extraído de forma irregular, como reportado por Barbieri & Geiser (2021). Logo, este trabalho é gerido pelo seguinte questionamento científico: É possível determinar uma assinatura geoquímica para o ouro de cada depósito, e usá-la como forma de rastreamento de proveniência⁵ ?

1.1.3 Objetivos

1.1.3.1 Objetivos gerais

Determinar e comparar a assinatura geoquímica do ouro primário dos depósitos estudados e avaliar a eficácia do uso destas assinaturas na rastreabilidade o ouro em nível local e regional.

1.1.3.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar a composição química do ouro primário e definir assinaturas geoquímicas específicas para cada depósito;
- b) Analisar os fatores mineralógicos e geoquímicos que controlam a distribuição de elementos principais e traços no ouro nativo e minerais associados;
- c) Avaliar a aplicabilidade de técnicas não destrutivas (MEV-EDS) na identificação da assinatura geoquímica do ouro;
- d) Verificar a capacidade dessas assinaturas diferenciarem a proveniência geológica do ouro em escala local e regional;

1.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, os seguintes procedimentos metodológicos foram realizados:

1.2.1 Pesquisa bibliográfica

Etapa que consistiu em amplo levantamento bibliográfico e compilação do conhecimento científico existente sobre a geologia da Província Tapajós e dos depósitos auríferos estudados, assim como de trabalhos relacionados a assinatura geoquímica do ouro e sulfetos.

⁵ Identificador do local de onde foi extraído.

1.2.2 Seleção e tratamento das amostras

Para o estudo do Depósito São Jorge foram selecionadas 11 lâminas polidas representativas da associação mineral 4 de Borges *et al.* (2009), sendo essas provenientes de testemunhos de sondagem dos furos FSJ-02, FSJ-04 e FSJ-06 e pertencentes ao acervo do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (IG-UFPA).

Enquanto para o estudo do Depósito São Chico, foram confeccionadas 5 lâminas polidas, provenientes dos furos de sondagem 4335-MR-R-90 e 4335-LC-R-02A, referentes aos veios mineralizados, cedidas pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB – Belém).

1.2.3 Análise petrográfica

Os estudos petrográficos em microscópio de luz transmitida e refletida visaram o reconhecimento das fases de minerais associadas ao ouro e suas relações texturais, além da compilação e complementação das descrições petrográficas de trabalhos anteriores, dos quais essas amostras são provenientes.

As análises de microscopia de minérios e fotografias foram realizadas no Laboratório de petrografia (LABPETRO) do IG-UFPA, em microscópio modelo Leica DM 2700 e câmera modelo Leica MC 170 HD.

1.2.4 Análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As lâminas que apresentaram partículas de ouro foram selecionadas para análises qualitativas e semiquantitativas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) por espectrometria de dispersão de energia (EDS) no Laboratório de Microanálises (LAMICRO) do IG-UFPA. Uma rotina de análises foi criada com o total de 15 elementos: S, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Pd, Ag, Sb, Te, Pt, Au, Hg, Pb e Bi. Foram também analisados os sulfetos (pirita, calcopirita, galena e esfalerita) que acompanham o ouro.

Alguns dos critérios para escolha do MEV-EDS foram (Reed 2005, Gomes 2015): (1) É uma técnica analítica não destrutiva, cuja preparação das amostras é simples, possibilitando o estudo da morfologia dos cristais em escala microscópica; (2) As imagens de elétrons retroespalhados (ERE⁶) permitem a identificação de diferentes fases minerais e da homogeneidade (variação composicional) dentro do grão, por meio da variação de brilho (vista em tons de cinza), que seriam dificilmente observadas somente com a petrografia básica; (3) O sistema EDS

⁶ Em inglês, Backscattered electron (BSE) imaging.

(Espectrômetro de Raio-X de Energia Dispersiva) é bastante eficaz em análises qualitativas e semiquantitativas, devido a sua capacidade de registrar espectros completos rapidamente (os principais elementos e suas concentrações relativas são aparentes em apenas alguns segundos); (4) Apesar de possuir um limite de detecção alto (0,1%), a exatidão do sistema EDS é comparável ao do sistema WDS para concentrações $\leq 1\%$, quando padrões apropriados são utilizados; para elementos traço, análises de EDS são inferiores às de WDS e inaplicáveis para concentrações menores que 0,1% (Çubukçu *et al.* 2008, Lavrent'ev *et al.* 2015); (5) As análises semiquantitativas podem ser feitas sem padrões, utilizando os dados do Software que já estão acoplados ao sistema EDS, permitindo identificação rápida das fases minerais.

Para as imagens de elétrons retroespalhados (ERE), o equipamento utilizado foi um MEV Zeiss modelo LEO-1430. As condições de operação foram: corrente do feixe de elétrons = $90\mu\text{A}$, voltagem de aceleração constante = 20kV , distância de trabalho variável entre 15mm e 16mm. Já para as análises de EDS, o equipamento utilizado foi um MEV Zeiss modelo LEO-1430 com EDS IXRF modelo Sirius-SD acoplado. As condições de operação foram: corrente do feixe de elétrons = $90\mu\text{A}$, voltagem de aceleração constante = 20kV , distância de trabalho variável entre 15mm e 16mm, tempo de contagem para análise dos elementos = 30s. As lâminas polidas foram metalizadas em carbono antes das análises em MEV, e foram analisados ao menos dois *spots* em diferentes posições, para verificar a homogeneidade dentro dos grãos, tendo o cuidado de evitar inclusões e ou ficar próximo das bordas.

1.2.5 Pré-tratamento de dados

Anteriormente as análises estatísticas, seguindo os procedimentos indicados por Frenzel (2023), os dados foram pré-tratados com o objetivo de eliminar possíveis distorções no resultado estatístico, como por exemplo, concentrações afetadas pela interferência de composição de nano-inclusões ou do mineral hospedeiro (efeito de borda), valores abaixo do limite de detecção, entre outros.

Sendo assim, nas análises de partículas de ouro, foram eliminados os dados que continham: (1) valores de enxofre (S) acima do limite de detecção em conjunto com outros elementos com valores acima de 5% e (2) análises que continham elementos com menos de 60% do total de análises com valores acima do limite de detecção (0,1%), com exceção da platina (Pt) e antimônio (Sb), que contém 34,2% e 36,8%, respectivamente, de valores válidos. A Pt e Sb foram mantidos pois a presença e ausência deles nos depósitos estudados indicou uma boa forma de discriminação antes mesmo das análises estatísticas mais aprofundadas.

No ouro, para corrigir dados com valores abaixo do limite de detecção e valores sem contagem, que poderiam causar erros na análise estatística devido a limitação dos softwares em lidar com valores iguais a zero, primeiramente foi feita uma média dos pontos analisados para se obter a composição média da partícula; em seguida, os valores que continuavam zero foram substituídos pelo método de substituição por 0,5 vezes o limite de detecção. Como todas as análises estavam na mesma unidade (porcentagem), os dados não precisaram ser normalizados.

Na análise dos sulfetos, os dados também foram tratados como valores médios por partícula de cada mineral. Somente foram eliminados os dados que continham valores anômalos que poderiam indicar um efeito de borda.

Os dados obtidos foram primeiramente tratados em planilhas Excel e no *software* STATISTICA 7 por meio de métodos estatísticos descritivos, de modo a identificar os elementos químicos que mais influenciam na discriminação do ouro e dos sulfetos dos depósitos estudados, sendo esse resultado visualizado por meio de diagramas feitos pelo *software* GCDKIT.

1.2.6 Análise de componentes principais (PCA)

A análise de componentes principais (PCA) é um método estatístico multivariado utilizado para lidar com conjunto de dados analíticos multidimensionais. Ou seja, é usado para destacar tendências mais relevantes em um conjunto amostral sem a necessidade de supervisão externa (Frenzel 2023). A PCA ajuda a reduzir a complexidade de dados com o mínimo de perda de informação, permitindo identificar padrões e associações, classificar amostras, e facilitar a visualização em duas ou três dimensões dos dados amostrais e a sua interpretação (Greenacre *et al.* 2022).

A PCA utiliza o cálculo da matriz de covariância para identificar quais variáveis variam em conjunto e, a partir disso, os autovalores e autovetores são extraídos. Os autovalores indicam o quanto a variância está associada a cada componente, enquanto os autovetores determinam a direção dos eixos dos componentes. Os componentes principais que geralmente explicam a maior parte da variância dos dados são os primeiros, com maiores autovalores. Com esses dados é possível identificar grupos de variáveis associadas que tem maior potencial de discriminação em um grupo de amostras (Frenzel 2023, Greenacre *et al.* 2022).

2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO DO DOMÍNIO TAPAJÓS NO CRÁTON AMAZÔNICO

O Cráton Amazônico (CA), composto pelos escudos Brasil Central e das Guianas – separados pelas bacias sedimentares Amazonas e Solimões, está inserido no contexto Plataforma Sul-Americana e abrange uma área de aproximadamente 4.500.000km². Localizado na porção norte da América do sul, majoritariamente no território brasileiro, estende-se ao norte para Guiana Francesa, Guiana, Suriname, Venezuela e Colômbia, e a sudoeste para a Bolívia.

Vários modelos para compartimentação tectônica do Cráton Amazônico foram propostos ao longo dos anos, porém atualmente destacam-se as de Santos *et al.* (2006, 2008) e Tassinari & Macambira (2004) que baseados em dados geocronológico são bastante similares, porém com algumas divergências em relação os limites de cada província (Figura 2).

A Província Mineral do Tapajós, localizada na porção Centro-Sul do Cráton Amazônico (Figura 3B), integra a Província Ventuari-Tapajós (1,95 – 1,80 Ga) segundo Tassinari & Macambira (1999, 2004) e a Província Tapajós-Parima (2,10 – 1,87 Ga) no contexto do Domínio Tapajós (Figura 2) segundo a classificação de Santos *et al.* (2000, 2001, 2006).

O Domínio Tapajós, de idade paleoproterozoica, faz contato a leste com o domínio Iriri-Xingu (Província Amazônia Central), e nas porções Sul e Norte é recoberto pelas bacias sedimentares fanerozoicas do Alto Tapajós e do Amazonas, respectivamente. Um dos modelos evolutivos propostos para o domínio é que ele tenha se formado a partir de um arco magmático durante o Orosiriano (Orogênese Cuiú-Cuiú) sucedido por eventos magmáticos pós-colisionais transcorrentes e extensionais que se estendem até aproximadamente 1,88 Ga (Vasquez *et al.* 2008, Juliani *et al.* 2014).

O Arco Cuiú-Cuiú é representado pelas rochas do embasamento do Grupo Jacareacanga e do Complexos Cuiú-Cuiú. Enquanto os eventos magmáticos que sucederam este arco foram agrupados em (Juliani *et al.* 2014): (1) Evento Vulcano-Plutonismo do Paleoproterozoico, composto por rochas das suítes intrusivas Creporizão, Tropas, Parauarí, Ingarana e Maloquinha, assim como do Grupo Iriri; (2) Coberturas sedimentares proterozoicas e fanerozoicas, representadas pelas formações Abacaxis e Sequeiro; e (3) Magmatismo tholeítico do Proterozoico e Fanerozoico, que consiste em rochas da Suíte Intrusiva Cachoeira Seca, assim como dos diabásios Crepori, Piranha e Cururu.

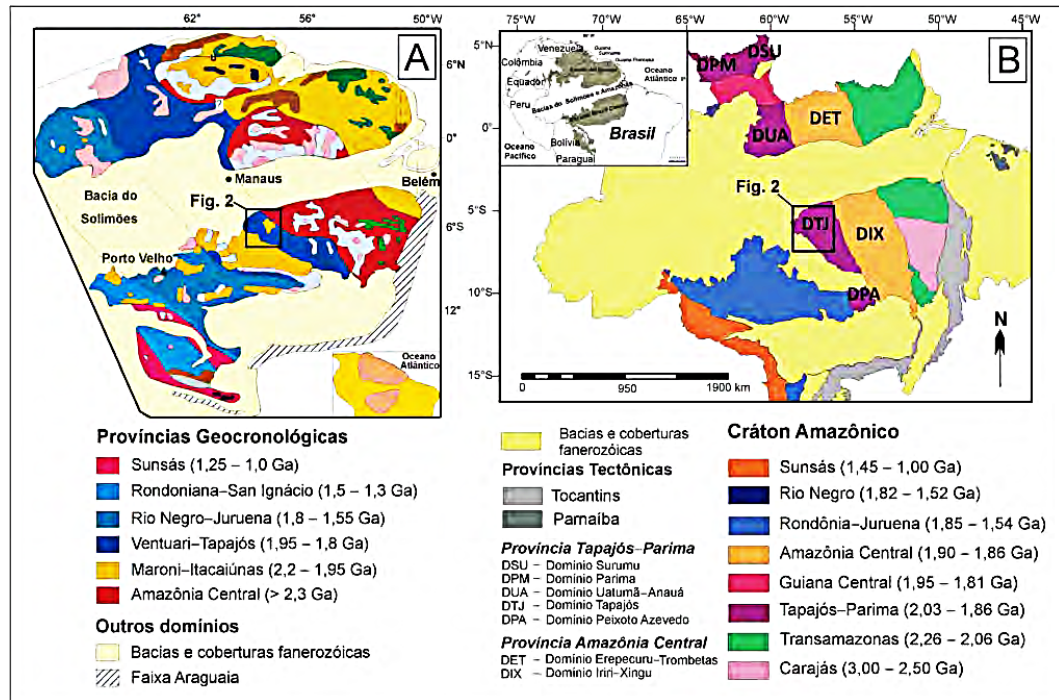


Figura 2 - Provincias Geocronológicas do Cráton Amazônico, segundo (A) Tassinari & Macambira (1999) e (B) Santos *et al.* (2006), com destaque para localização do Domínio Tapajós. Fonte: Juliani *et al.* (2014).

2.2 PROVÍNCIA MINERAL DO TAPAJÓS (PMT)

2.2.1 Unidades litoestratigráficas

Para um estudo mais objetivo, foram sintetizadas somente as unidades litoestratigráficas que estão relacionadas ao contexto geológico local dos depósitos estudados (Figura 3) segundo Vasquez *et al.* (2017, 2024).

2.2.1.1 Associações do embasamento

Complexo Cuiú-Cuiú

É composto predominantemente por ortogneisses, migmatitos e granitoides com feições de deformação dúctil e metamorfismo de alto grau, e, localmente, granitoides com feições e texturas ígneas preservadas (como exemplo os batólitos aflorantes na porção leste da PMT). A variação espacial da maturidade geoquímica dos granitoides de assinatura calcioalcalina refletem as condições de posicionamento dos corpos ígneos (profundidade e temperatura) e a distância da zona de subducção do Arco Magmático Cuiú-Cuiú, no qual os granitoides com textura ígnea preservadas e com rochas vulcânicas associadas foram posicionados em uma crosta mais rasa e mais distante; enquanto os granitoides ductilmente deformados foram posicionados mais próximos da zona.

As datações U-Pb e Pb-Pb em zircão das rochas desse complexo indicam uma idade paleoproterozoica, além de uma mistura com componente crustal arqueano na componente de acreção juvenil paleoproterozoica do arco, refletindo as características de um arco magmático de margem continental.

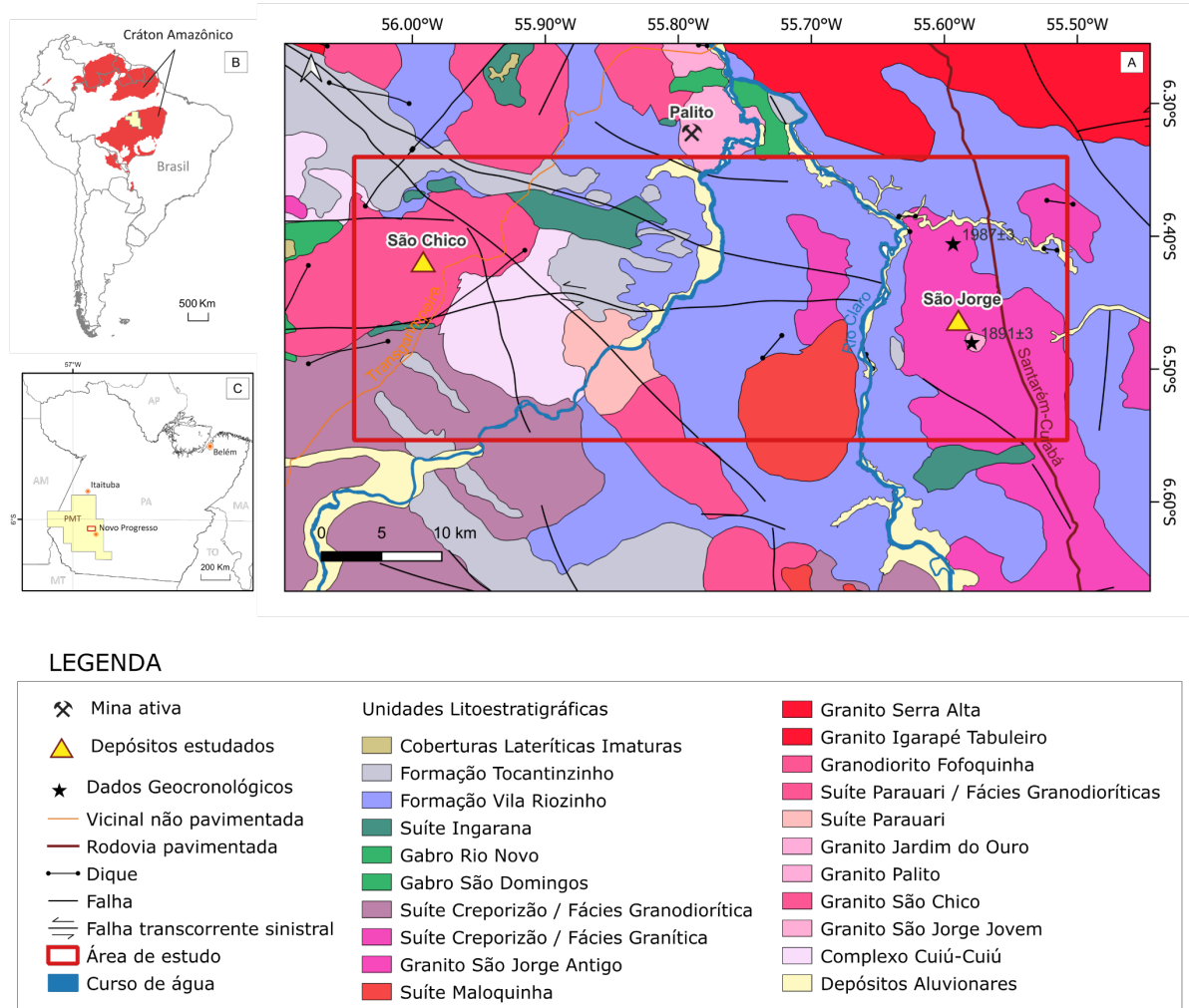


Figura 3 - Mapa Geológico da área de estudo, adaptado de Vasquez *et al.* (2008 e 2020). (A) Mapa com destaque para os depósitos estudados. (B) Localização da área do projeto da Província Mineral do Tapajós (SBG-CPRM) no Cráton Amazônico. (C) Mapa de localização da área de estudo na área do projeto da Província Mineral do Tapajós (SBG-CPRM).

2.2.1.2 Vulcano-plutonismo paleoproterozoico

Formação Vila Riozinho

Identificada por Lamarão *et al.* (2002), consiste em corpos vulcânicos localizados na porção leste da PMT, com cerca de 2000 Ma, com assinatura calcioalcalina de alto K a shoshonítica. São compostos por ignimbritos latíticos (com microtextura de fluxo piroclástico), quartzos latíticos, dacíticos e riolíticos, além de derrames de lavas andesítica, dacíticas e quartzos traquíticas.

Formação Tocantinzinho

Consiste em depósitos vulcanoclásticos formados por erupção explosiva freatomagmática, fluxo do tipo *surge* e de suspensão e queda, que afloram no leste da PMT como cristas e *cuestas* de orientação NW-SE, sobre os granitoides da Suíte Creporizão e do Complexo Cuiú-Cuiú e das rochas vulcânicas da Formação Vila Riozinho, além de bordejarem batólitos de granitoides da Suíte Parauari e serem intrudidos por granitos da Suíte Maloquinha. Tem sua litologia composta principalmente por tufos, além de ignimbritos, grauvasas líticas maciças e brechas. As rochas dessa unidade podem apresentar idades entre 1863 e 2160 Ma.

Suíte Creporizão

Consiste em batólitos de granitos e granodioritos, de idades entre 1989 e 1955 Ma, orientados segundo as zonas de cisalhamento de direção NW-SE.

O Granito São Jorge Antigo (GSJA), denominado por Lamarão *et al.* (2002), apresenta assinatura calcioalcalina de alto K e compõe a fácies granítica da Suíte Creporizão, aflorando na porção leste da PMT como um batólito de orientação NNW-SSE. É composto por monzogranitos, sienogranitos, granodioritos e quartzo sienitos, monzonitos e monzodiorito. Os monzogranitos inequigranulares e quartzo monzonitos pórfiros forneceram idades Pb-Pb em zircão entre 1981 e 1987 Ma.

O GSJA intruiu as rochas vulcânicas da Formação Vila Riozinho (ca. 2000 Ma) e foi intrudido pelo Granito São Jorge Jovem (ca. 1890 Ma). Segundo Lamarão *et al.* (2002) as assinaturas geoquímicas do GSJA e da Formação Vila Riozinho podem refletir um estágio maduro de acreção de um arco magmático de 2010 a 1970 Ma, em uma margem continental.

Suíte Parauari

Consiste em corpos graníticos e granodioríticos com uma ampla variedade composicional, que, em sua maioria, hospedam depósitos de ouro e apresentam idades entre 1897 e 1880 Ma.

O Granito São Jorge Jovem (GSJJ), denominado por Lamarão *et al.* (2002), é a intrusão granítica que hospeda a mineralização de ouro do Depósito São Jorge. Aflora como uma pequena intrusão no GSJA na porção leste da PMT, sendo composta por monzogranitos e quartzo monzonitos, inequigranulares médios, com biotita e hornblenda magnesianas. Apresenta assinatura calcioalcalina de alto K, com altos teores de Sr e Ba, além de idade Pb-Pb em zircão de 1891 Ma em monzogranito.

Borges *et al.* (2009) identificaram a presença de saussuritização pós-magmática, cloritização e propilitização, seguidas de sulfetação, sericitização, carbonatação e silicificação nos granitoides dessa unidade. Segundo Vasquez *et al.* (2017), alguns autores correlacionam o GSJJ com granitoides da Suíte Tropas e da Suíte Parauarí, porém diferenças geoquímicas não sustentam essas correlações.

O Granito São Chico aflora no centro da PMT como um batólito de orientação E-W que hospeda a mineralização dos depósitos São Chico e São Domingos, e que intrudiu granitoides da Suíte Creporizão e do Complexo Cuiú-Cuiú e foi intrudido por gabros da Suíte Ingarana. É composto de granodioritos, monzogranitos e quartzo monzonitos inequigranulares e equigranulares, ricos em biotita e anfibólios. Vasquez *et al.* (2017) apresentaram idades modelos Pb-Pb em galena de 1885 a 1886 Ma para a mineralização e indicaram que essas idades são próximas a da cristalização do granito hospedeiro.

Suíte Ingarana

Consiste em corpos gabroicos que afloram como platôs com coberturas lateríticas, com orientação E-W e localmente NNW-SSE, que intrudiram os granitos da Suíte Parauarí e as rochas vulcânicas ácidas da Formação Salustiano, a respectivamente, leste e oeste da PMT.

Suíte Maloquinha

Consiste em corpos graníticos que afloram como plútons e batólitos orientados preferencialmente segundo NW-SE e subordinadamente WNW-ESSE, NE-SW e N-S, que intrudiram as rochas da PMT com idades acima de 1880 Ma. Datações em evaporação e Pb e U-Pb em zircão apresentaram idades entre 1882 e 1864 Ma (Klein & Vasquez 2000, Santos *et al.* 2000, Lamarão *et al.* 2002, Semblano *et al.* 2016).

2.2.2 Depósitos auríferos

A Província Mineral do Tapajós (PMT), localizada na porção sudoeste do estado do Pará (Figura 3C), possui dois distritos auríferos individualizados: Cuiú-Cuiú e Jardim do Ouro, além de conter vários outros depósitos sem um distrito definido como os depósitos São Jorge, Tocantinzinho, Coringa, Castelo dos Sonhos, Ouro Roxo, Botica e Chapéu do Sol (Rizzotto 2022).

Segundo levantamento do DNPM (2004) as mineralizações auríferas primárias estão distribuídas principalmente nas rochas do Complexo Cuiú-Cuiú, dos grupos Jacareacanga e Iriri, além das rochas das Suíte Intrusiva Creporizão, Parauarí, Ingarana e Maloquinha.

Os depósitos auríferos da PMT são classificados segundo as seguintes classes (compilado de Juliani *et al.* 2014):

a- **Depósitos Epitermais:** Depósitos filonianos e disseminados de alta e baixa sulfetação, a exemplo os depósitos V3 (Botica) e V6 (Chapéu do Sol) respectivamente, hospedados em rochas vulcânicas e vulcanoclásticas do Grupo Iriri, assim como restritamente em riolitos pórfiros. Sendo geneticamente vinculados aos estágios finais do magmatismo Parauarí.

b- **Depósitos Pórfiros:** A exemplo da mina do Palito, hospedada em granodioritos das suítes Parauarí e Fofquinha, e o depósito Batalha, do tipo pórfiro profundo, que tem como rocha hospedeira o granito homônimo, sendo intrusivo em granitoides da suíte Parauarí.

c- **Depósitos relacionados a intrusões graníticas:** Depósitos epizonais filonianos e disseminados do tipo *Stockwork*, nos quais os alojamentos e mineralizações das rochas associadas foram possivelmente controlados pelo Lineamento Tocantinzinho - estrutura regional de direção NW/SE. A exemplo do depósito Tocantinzinho.

d- **Depósitos Orogênicos:** Depósitos mesozonais subdivididos (Santos *et al.* 2001) em: (a) veios em zonas de cisalhamento e (b) veios em estruturas rúptil-dúctil, hospedados em rochas do Grupo Jacareacanga e do Complexo Cuiú-Cuiú, a exemplo dos depósitos Maués, Ouro Roxo e Patinhas.

O mais recente informe de recursos minerais do Serviço Geológico do Brasil (Vasquez *et al.* 2024) divide as ocorrências de ouro na PMT em três categorias principais: (A) Sistema magmático-hidrotermal, subdivido em depósitos epitermais de alta e baixa sulfetação, epitermais de sulfetação intermediária, tipo pórfiros, hospedados em corpos gabroicos e diques de andesito, e hospedados em corpos graníticos; (B) Orogênico, subdivido em orogênico hospedado em turbiditos e hospedados em granitoides; e (C) Paleoplacer.

Os depósitos São Jorge e São Chico, localizados na porção leste da PMT (Figura 3C) foram classificados por Vasquez *et al.* (2024) como ouro hospedado em corpos graníticos dentro de um sistema magmático-hidrotermal. Os fluidos mineralizantes desses depósitos apresentam padrões semelhantes, tais quais, fluidos aquosos com salinidade baixa a moderada e que mostram uma trajetória de exsolução de CO₂ por magma ácido a imiscibilidade de CO₂ (Vasquez *et al.* 2024).

2.2.3 Depósito São Jorge

O depósito São Jorge (Figuras 3A e 4), localizado na porção leste da PMT a cerca de 70km a norte da cidade de Novo Progresso, possui reservas indicadas⁷ em 20,3t de Au contidas em 14,4Mt de minério com teor médio de 1,54g/t de ouro.

Lamarão *et al.* (2002) sugerem como rocha hospedeira o granito São Jorge Jovem com idade de 1891 ± 3 Ma (evaporação de Pb em zircão).

O granito São Jorge, consiste predominantemente em anfibólio-biotita monzogranitos e granitos pórfiros associados (Lamarão *et al.* 2002), é um plúton localizado na região de Vila Riozinho. É formado pelos granitos São Jorge Jovem (GSJJ) e São Jorge Antigo (GSJA), relacionados a granitoides das suítes Parauari e Creporizão, respectivamente. Já os granitos pórfiros (Lamarão *et al.* 2008) que estão associados ao GSJA, apresentam partículas de ouro e indicam uma certa contribuição à mineralização da região.

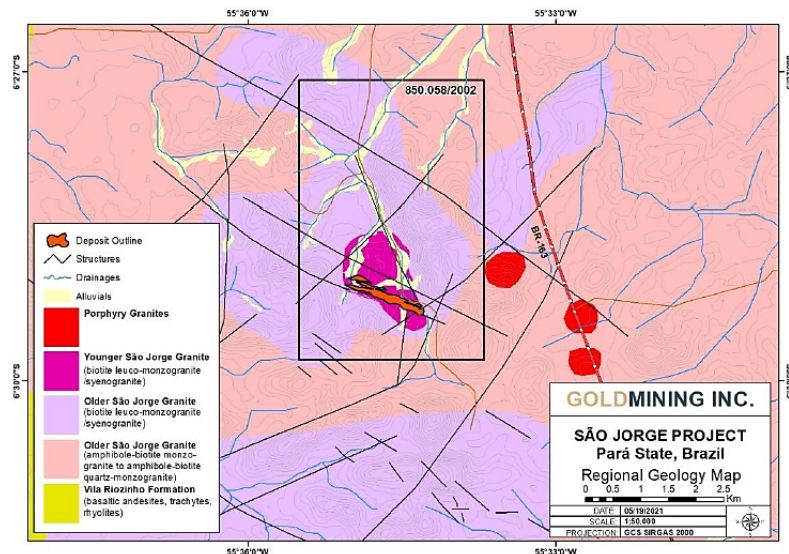


Figura 4 - Mapa geológico do Projeto São Jorge. Fonte: Brazilian Gold Corporation - BGC (2012) em Rodriguez & Soares (2021).

Petrografia, alteração hidrotermal e inclusões fluidas

A mineralização do depósito é representada por ouro associado a sulfetos (pirita + calcopirita ± esfalerita e raramente galena) contido em veios de quartzo em padrão tipo filoniano ou de forma disseminada nas rochas mais hidrotermalizadas (Sotero *et al.* 2015), e é relacionada a uma alteração hidrotermal que afetou os corpos graníticos.

⁷ Rodriguez & Soares (2021)

Borges *et al.* (2009) definiram quatro associações minerais na área do depósito que refletem estágios progressivos de alteração hidrotermal. A associação 1 representa o estágio magmático com rochas preservadas e sem mineralização, constituída mineralogicamente por anfibólio, biotita, plagioclásio, feldspato potássico e quartzo. A associação 2 representa uma alteração pós-magmática precoce com substituição de anfibólio por clorita + carbonatos + óxidos de Fe e Ti e titanita \pm biotita \pm epidoto, com plagioclásio intensamente saussuritizado, e sem mineralização significativa. A associação 3 representa um estágio de alteração propilítica, na qual há substituição total do anfibólio, plagioclásio descalcificado e substituído por mica branca e carbonatos, biotita alterando para clorita, e a titanita, magnetita e ilmenita com evidências de corrosão e/ou substituição por minerais opacos, nesse estágio há um início da mineralização aurífera com pirita, calcopirita e esfalerita. Por fim, a associação 4 corresponde a zona do granito São Jorge Jovem mais intensamente hidrotermalizada (estágio de intensa alteração sericítica e predominância de mica branca, carbonato e pirita), sendo a associação na qual se concentra a mineralização com altos teores de ouro em sulfetos, além de apresentar feições texturais e mineralógicas originais da rocha completamente obliteradas.

Sotero *et al.* (2015) em estudos baseados na catodoluminescência de quartzo, definiram quatro gerações de quartzo e cinco estágios evolutivos para este mineral, assim como as suas relações com as associações minerais de Borges *et al.* (2009): O estágio 1 corresponde a associação mineral 1 com Qz1 de origem magmática; o estágio 2 é caracterizado pelo início do fraturamento e dissolução do Qz1, marcando uma transição entre a associação mineral 1 e 2 de Borges *et al.* (2009); o estágio 3 corresponde ao início da precipitação do Qz2, que corresponde a associação mineral 3; o estágio 4 é caracterizado por precipitação de Qz2 em fraturas de sulfetos e deformação dútil em Qz1 e Qz2 gerando um aspecto brechoide, além de marcar a transição entre a associação mineral 3 e 4; o estágio 5 é exclusivo da associação mineral 4, sendo marcado por cristais neoformados com inclusões de partículas de ouro. Além disso, esses autores foram os primeiros a identificar partículas de ouro com composições distintas, na qual o ouro associado a pirita (Au1) apresentava maiores teores de prata, enquanto o ouro associado ao Qz4 continha maiores teores de telúrio.

As Figuras 5 e 6 ilustram a espacialização das zonas de alteração hidrotermal do depósito São Jorge, assim como os aspectos mineralógicos e texturais das rochas hospedeiras da mineralização de ouro.

Em relação às condições de formação, o geotermômetro e as isócoras da clorita sugerem temperaturas de cerca de 300°C para as associações 3 e 4 (Borges *et al.* 2009) e de 280 a 350°C com pressões entre 1,35 e 3,6Kb para a mineralização (Borges 2010).

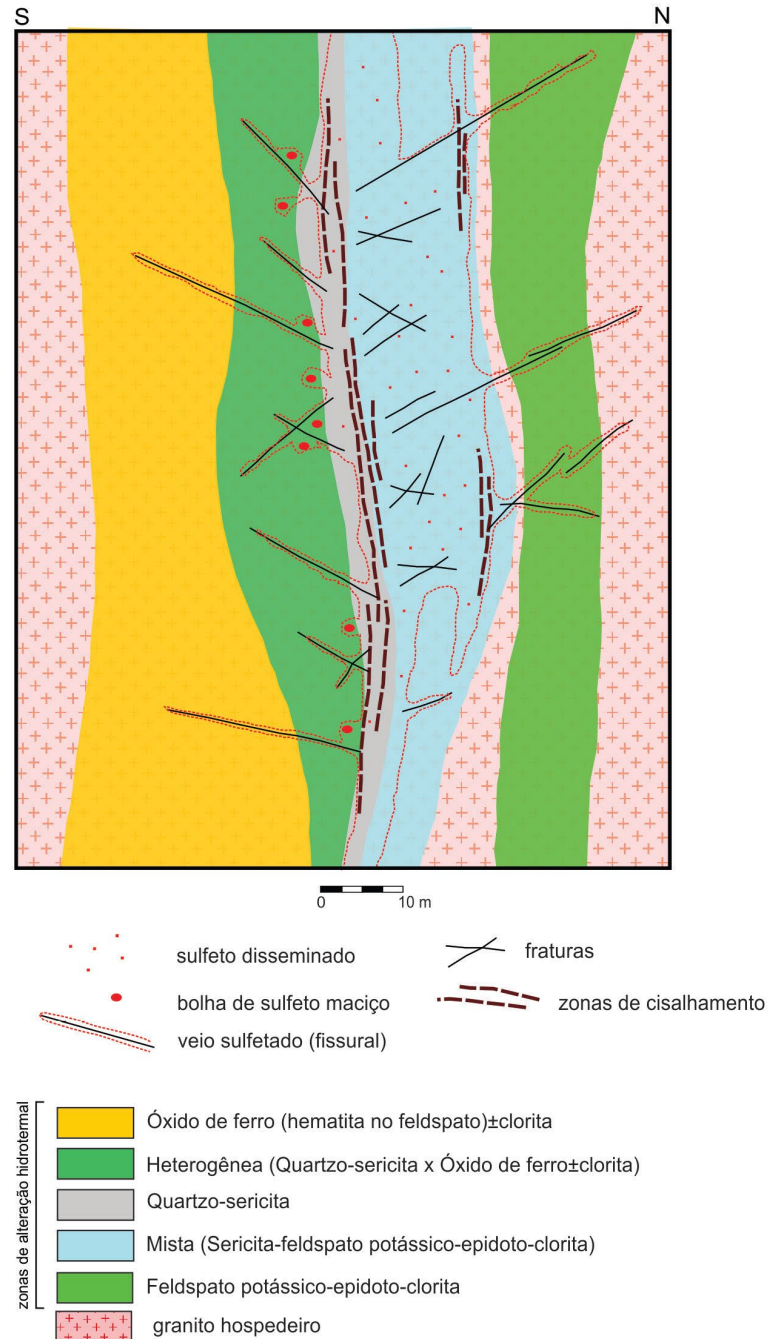


Figura 5 - Zonas de alteração hidrotermal e mineralização do depósito São Jorge. Fonte: Rodrigues & Soares (2014) modificado por Vasquez *et al.* (2024).

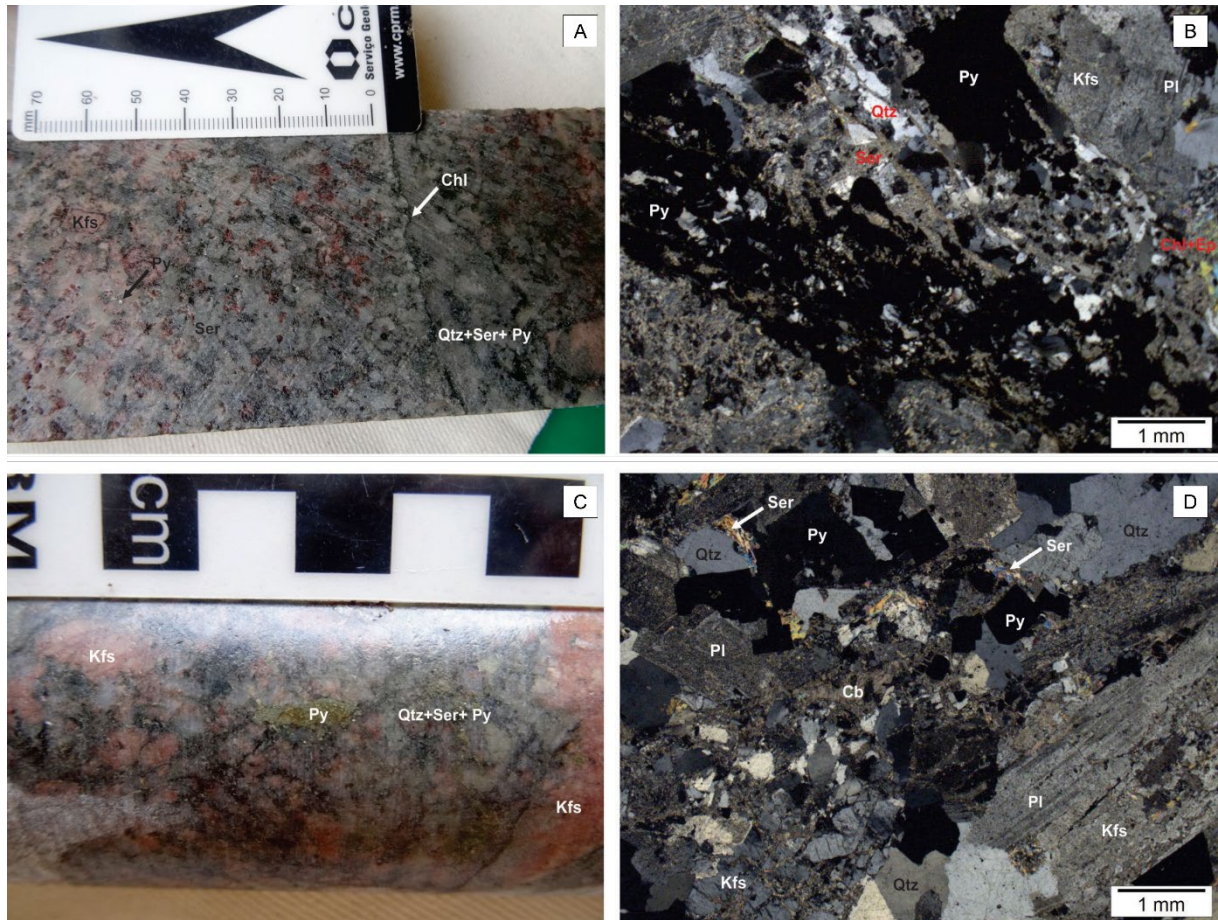


Figura 6 - Alteração hidrotermal do depósito São Jorge. (A) Zona de intensa alteração hidrotermal com feldspato potássico (Kfs), sericita (Ser), quartzo (Qtz) e pirita (Py) com vênulas de clorita (Chl) e pirita. (B) Microtextura de vênula de pirita com sericita e quartzo hidrotermal, substituição de minerais máficos por clorita e epidoto (Ep) e de plagioclásio (Pl) por feldspato potássico hidrotermal. (C) Agregado de pirita euédrica no granito hospedeiro hidrotermalizado. (D) Microtextura de agregados de pirita euédrica com quartzo e sericita, substituição de plagioclásio por feldspato potássico hidrotermal e vênulas de carbonato (Cb). Fotomicrografias (B e D) em luz transmitida e polarizadores cruzados. Fonte: modificado de Vasquez *et al.* (2024).

Borges (2010) também identificou três tipos de fluidos hidrotermais com base em estudos de inclusões fluidas em quartzo: (i) sistema $H_2O-NaCl-KCl$ (água meteórica), fluido aquoso de baixa a média salinidade; (ii) sistema $H_2O-NaCl-CaCl_2-MgCl_2$ (origem magmática), fluido aquoso de média salinidade com temperatura de homogeneização entre 120 e 230°C; (iii) fluido aquocarbônico de salinidade baixa a média com temperatura de homogeneização entre 260 e 350°C (origem magmática ou metamórfica).

Com base nesses resultados, Borges (2010) sugeriu dois mecanismos principais para precipitação do ouro em duas gerações distintas, na qual foram transportados como $Au(HS)_2^-$ e $HAu(HS)_2^0$. O mecanismo (1) foi por oxidação, com aumento da fO_2 e formação de magnetita, caracterizando a primeira geração de ouro. O mecanismo (2) foi responsável pela segunda e principal geração de ouro, na qual houve uma mistura dos três tipos de fluidos acompanhados de alteração sericítica e sulfetação, com redução da fS_2 .

2.2.2 Depósito São Chico

O Depósito São Chico (Figura 3A), localizado na porção centro-leste da PMT, é uma mina satélite da mina do Palito, distante a cerca de 30km a sudoeste desta. Possui reservas indicadas⁸ de 548t de Au com teor médio de 4,55g/t de ouro.

A mineralização consiste em um sistema de veios de quartzo sulfetados e polimetálicos com orientação WNW-ESE e em brechas encaixadas em rochas do Granito São Chico (Suíte Parauarí) e vulcânicas subordinadas (Corrêa Lima *et al.* 2023, Vasquez *et al.* 2024). O Granito São Chico é o principal hospedeiro da mineralização, sendo composto principalmente por hornblenda granodiorito, hornblenda monzogranito e biotita sienogranitos (Corrêa Lima *et al.* 2023).

Segundo Corrêa Lima *et al.* (2017), há dois principais tipos de veios ocorrendo no depósito: (i) Polimetálico, composto por pirita e galena, com esfalerita e calcopirita subordinada; (ii) Rico em pirita, associado a calcopirita substituída por covelita e calcocita, além da presença de bismutinita. Vasquez *et al.* (2017) identificaram idades modelos entre 1885 e 1886 Ma para as zonas mineralizadas (Pb-Pb em galena).

Petrografia, alteração hidrotermal e inclusões fluidas

A mineralização do depósito é representada por ouro (*electrum*) associado a galena + pirita + esfalerita ± calcopirita.

Corrêa Lima *et al.* (2023) reconheceram três principais tipos de alteração hidrotermal que afetam a área do depósito: (i) Alteração potássica, pervasiva e constituída de feldspato potássico, clorita e pirita (sem ouro associado), obliterando parcialmente a textura primária das rochas graníticas; (ii) Alteração sericítica-clorítica, formando halos em torno dos veios de quartzo e constituída por mica branca, pirita, quartzo, esfalerita e clorita com calcita, rutilo e ilmenita subordinados. Estando sobreposto às zonas de alteração (i); (iii) Alteração propilítica, composta por clorita, epidoto e rutilo com titanita subordinada. Afeta os granitoides de modo pervasivo nas porções distais as zonas mineralizadas.

Corrêa Lima *et al.* (2023) também identificaram vênulas tardias de calcita com quartzo e epidoto associado que cortam as zonas de alteração e os veios de quartzo, além de, veios de quartzo com texturas indicativas de formação em níveis rasos e com a presença de adulária,

⁸ Serabi Gold plc Annual Report (2021).

sendo a última, segundo os autores, sugestiva de que os veios mineralizados foram formados por processos de ebulição (*boiling*).

As Figuras 7 e 8 ilustram a espacialização das zonas de alteração hidrotermal e veios do depósito São Chico, assim como os aspectos mineralógico e texturais das rochas hospedeiras e do veio mineralizado.

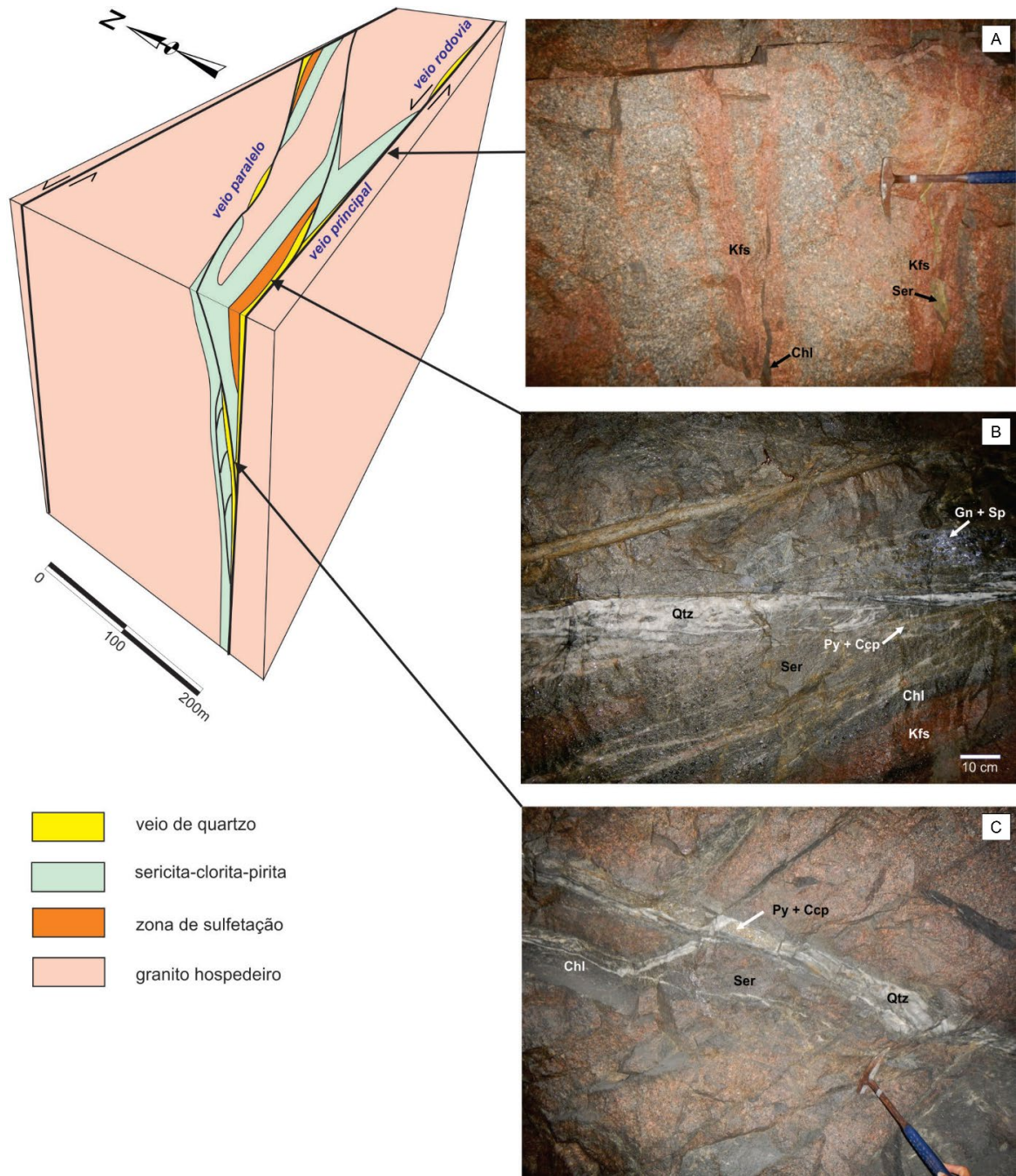


Figura 7 - Modelo esquemático da mineralização do depósito São Chico. (A) Granito hospedeiro com zona de alteração potássica com feldspato potássico (Kfs), cloritização (Chl) e sericitização (Ser). (B) Zona de sulfetação em veio de quartzo com agregados de pirita (Py) e calcopirita (Ccp), e de galena (Gn) e esfalerita (Sp) envoltas por zona de cloritização e sericitização. (D) Veios de quartzo (Qtz) com sulfetos (Py + Ccp) e envelopes de sericitização e cloritização na bifurcação de falhas. Fonte: Tunningley & Ackroyd (2012) modificado por Vasquez *et al.* (2024).

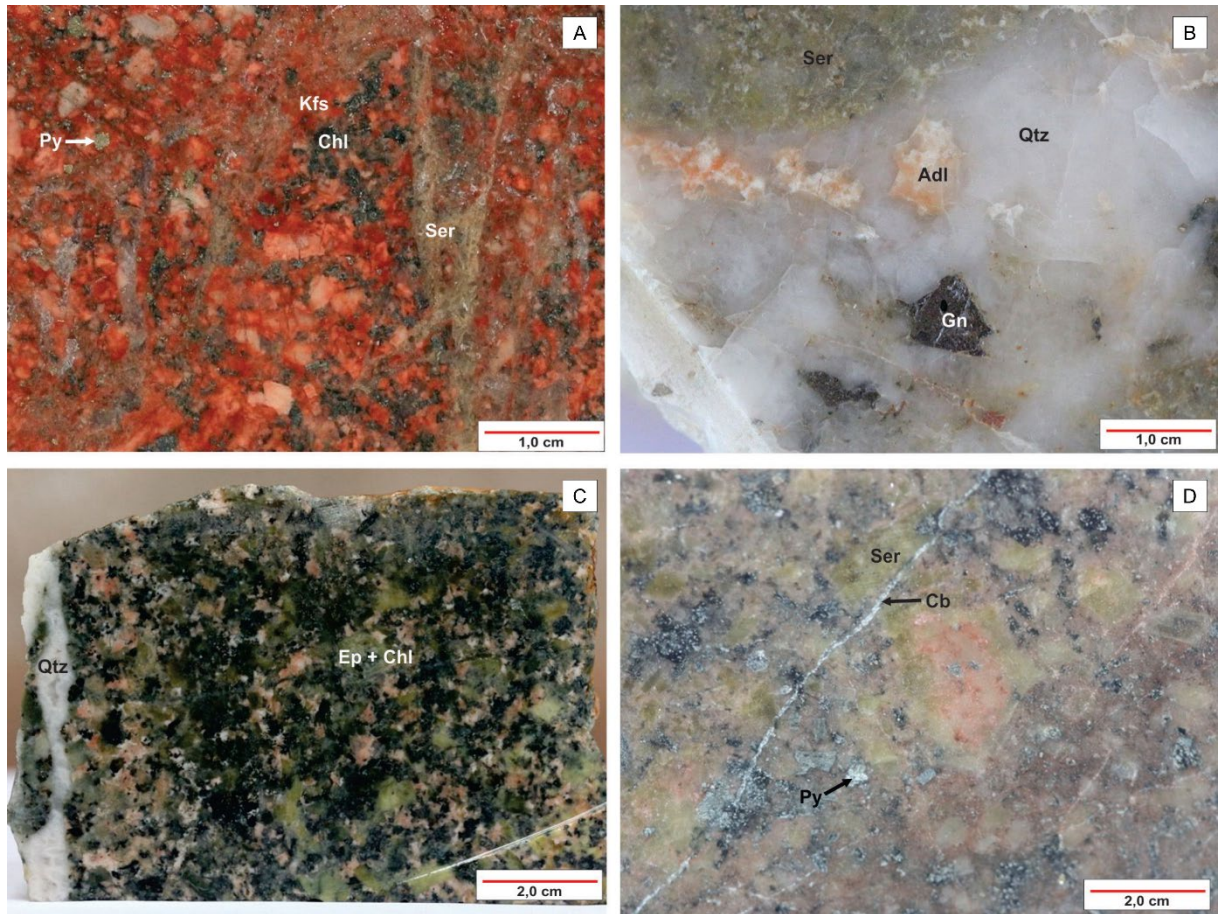


Figura 8 - Alteração hidrotermal do depósito São Chico. (A) Granito hospedeiro com intensa alteração potássica, constituído de feldspato potássico (Kfs) hidrotermal hematitizado, agregados de clorita (Chl), vênulas de sericita (Ser) e pirita (Py) disseminada. (B) Veio de quartzo (Qtz) com adularia (Adl) e galena (Gn) e envelope de sericita na margem. (C) Propilitização de granito com substituição de minerais máficos por epidoto (Ep) e clorita, cortado por ênulas de quartzo tardias com textura em pente. (D) Granito sericitizado cortado por vênula de carbonato (Cb) e com pirita. Fonte: modificado de Vasquez *et al.* (2024).

Dados de estudos preliminares de inclusões fluidas e microtermometria de cristais de quartzo dos veios de quartzo sulfetado identificaram dois tipos de inclusões fluidas: (i) sistema H₂O-Sais, dividido em (a) inclusão aquosa bifásica com salinidades baixas a moderadas e temperatura de homogeneização entre 256 e 403°C e (b) inclusão aquosa monofásica; (ii) sistema H₂O-Sais-Sólido, inclusão aquosa trifásica (Corrêa Lima *et al.* 2017, 2023). Os autores indicam evidências da coexistência de inclusões fluidas ricas em líquido e vapor (CO₂) que sugerem a imiscibilidade de líquidos, na qual as inclusões tardias podem estar associadas a fluidos meteóricos.

3 RESULTADOS

A geologia, alteração e mineralização das rochas encaixantes e hospedeiras foram descritos em trabalhos prévios como Lamarão *et al.* 2002 e 2008, Borges *et al.* 2009, Borges 2010, Sotero *et al.* 2015 (Depósito São Jorge) e Corrêa Lima *et al.* 2017 e 2023, Vasquez *et al.* 2017 e 2024 (Depósito São Chico), porém uma análise morfológica e composicional do ouro, que é o foco desta pesquisa, foi pouco discutida.

O estudo petrográfico de amostras hidrotermalizadas dos depósitos objetivou a compreensão da relação entre a mineralização de ouro e os minerais associados.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS DE OURO E DEMAIS MINERAIS ASSOCIADOS

3.1.1 Depósito São Jorge

Os sulfetos associados ao ouro consistem em pirita + calcopirita ± esfalerita e raramente galena (Figura 9).

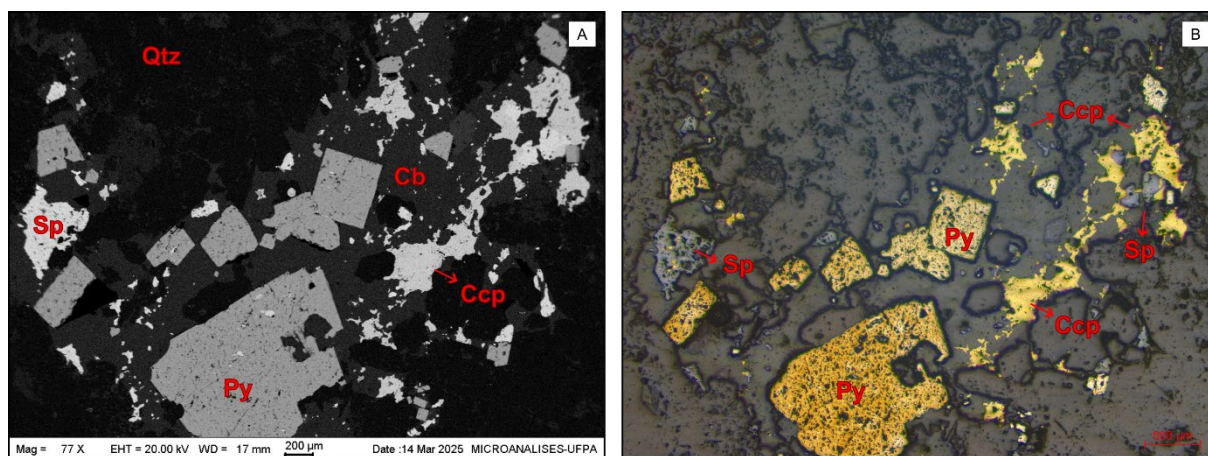


Figura 9 - Aspecto geral dos principais minerais associados ao ouro no depósito São Jorge. (A) Imagem de elétrons retroespalhados. (B) Fotomicrografia em luz refletida e polarizadores paralelos. Carbonato (Cb); Calcopirita (Ccp); Pirita (Py); Quartzo (Qtz); Esfalerita (Sp).

A **pirita** é o principal sulfeto associado ao ouro e o mais abundante no depósito, com inclusões de ouro, calcopirita, galena, barita, rutilo, monazita, zircão, apatita, teluretos, sulfetos de Bi e Pb, e bismuto nativo (Figura 10). Ocorre de duas formas: (1) cristais euédricos a subédricos dispersos na rocha ou alinhados formando pequenos veios, de tamanhos variando de 20 a 1500 μm; (2) Agregados de cristais subédricos a anédricos formando veios monominerálicos com espessura milimétrica a decimétrica. Sendo a última a forma dominante. Os cristais e agregados de pirita são bastante porosos e fracamente a moderadamente fraturados. O ouro ocorre principalmente preenchendo fraturas ou como inclusões nos grandes agregados

de pirita, podendo estar espacialmente associado a barita, galena, bismuto nativo e sulfeto de bismuto.

A **calcopirita** (Figuras 11A-E) está presente principalmente como partículas de forma irregular, variando 50 a 800 μm , dispersas na rocha, podendo apresentar intercrescimento com pirita, esfalerita, monazita e minerais de bismuto e galena, além de inclusões de pirita. Ocorre também como finas inclusões alongadas e arredondadas em pirita. Localmente pode estar associada ao *electrum*, mas de forma geral não está associada diretamente com a mineralização de ouro.

A **esfalerita** (Figuras 11A, D e F) ocorre como partículas de forma irregular com tamanho variando entre cerca de 50 a 1000 μm , apresenta desmisturas de calcopirita na forma de grãos subarredondados e localmente intercrescimento com esse mineral. Pode ocorrer também como inclusões alongadas em pirita e associadas a sulfeto de bismuto e chumbo, além de inclusões de magnetita.

Tanto a calcopirita quanto a esfalerita ocorrem com mais frequência e em maiores tamanhos quando o ouro está incluído em grãos de quartzo, quando o ouro está preenchendo fraturas ou incluído em pirita a ocorrência desses dois minerais é mais restrita.

A **galena** (Figuras 10 G-H) é o mineral menos abundante e ocorre como finos cristais anédricos, de tamanhos até 20 μm , preenchendo fraturas ou incluídos em pirita, localmente pode estar associado a minerais de bismuto, calcopirita, *electrum* e ouro.

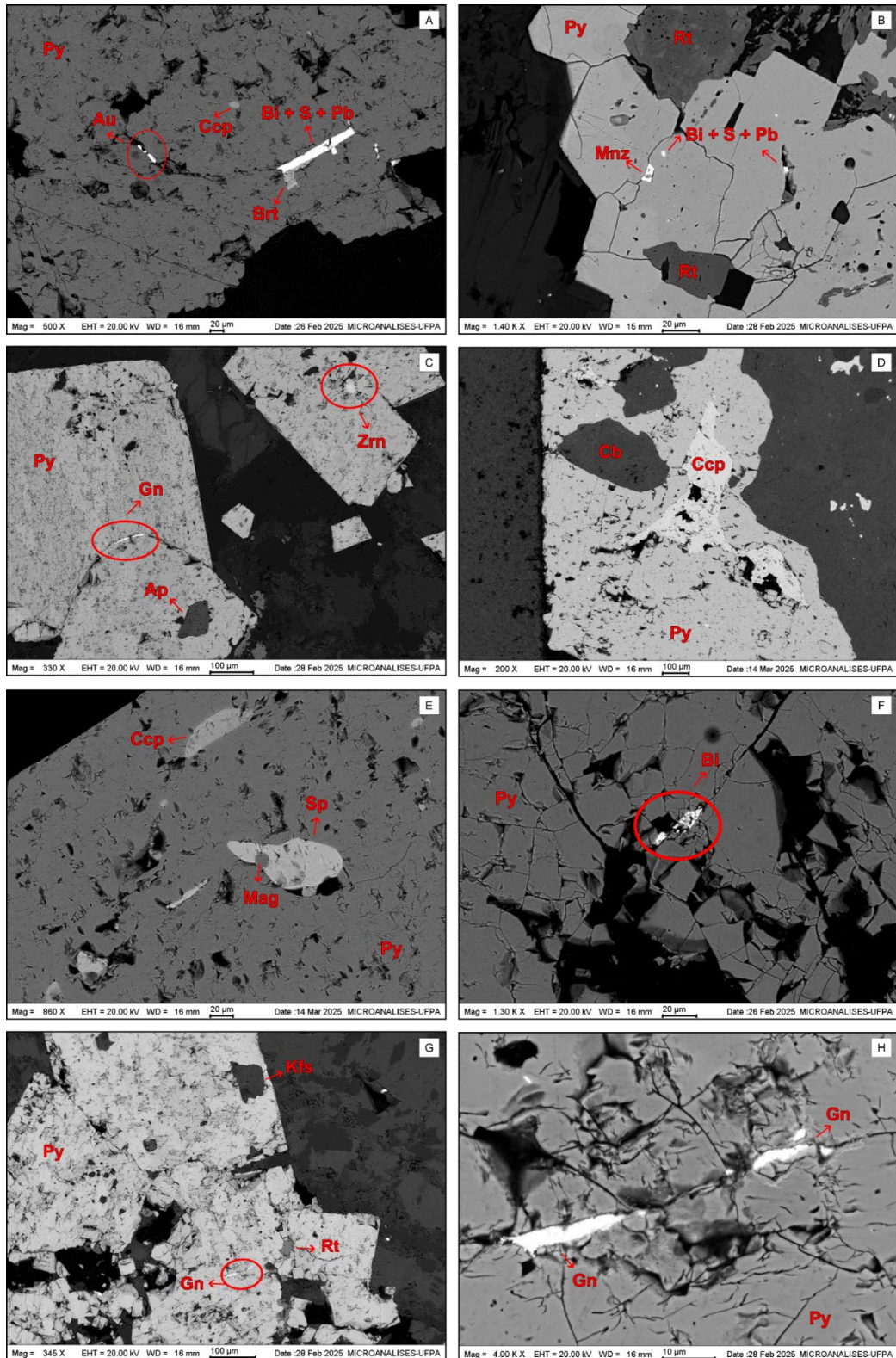


Figura 10 - Características morfológicas e texturais da pirita no Depósito São Jorge em imagens de elétrons retroespalhados. (A) Agregado de pirita (Py) com inclusão de calcopirita (Ccp) e fraturas preenchidas por ouro (Au), barita (Brt) e sulfeto de Bi e Pb (Bi + Pb + S). (B) Cristal de pirita com inclusões de monazita (Mnz), rutilo (Rt) e Bi + Pb + S. (C) Cristais de pirita com inclusões de apatita (Ap) e zircão (Zrn), além de fratura preenchida por galena (Gn). (D) Agregado de pirita com intercrescimento/alteração de calcopirita e inclusão de carbonato (Cb). (E) Cristal de pirita com inclusões de calcopirita, esfalerita e magnetita (Mag). (F) Agregado de pirita com fratura preenchida por bismuto nativo (Bi). (G) Cristais de pirita com inclusão de rutilo, K-feldspato (Kfs) e fratura preenchida por galena. (H) Detalhe da galena da fig. G preenchendo fratura em pirita.

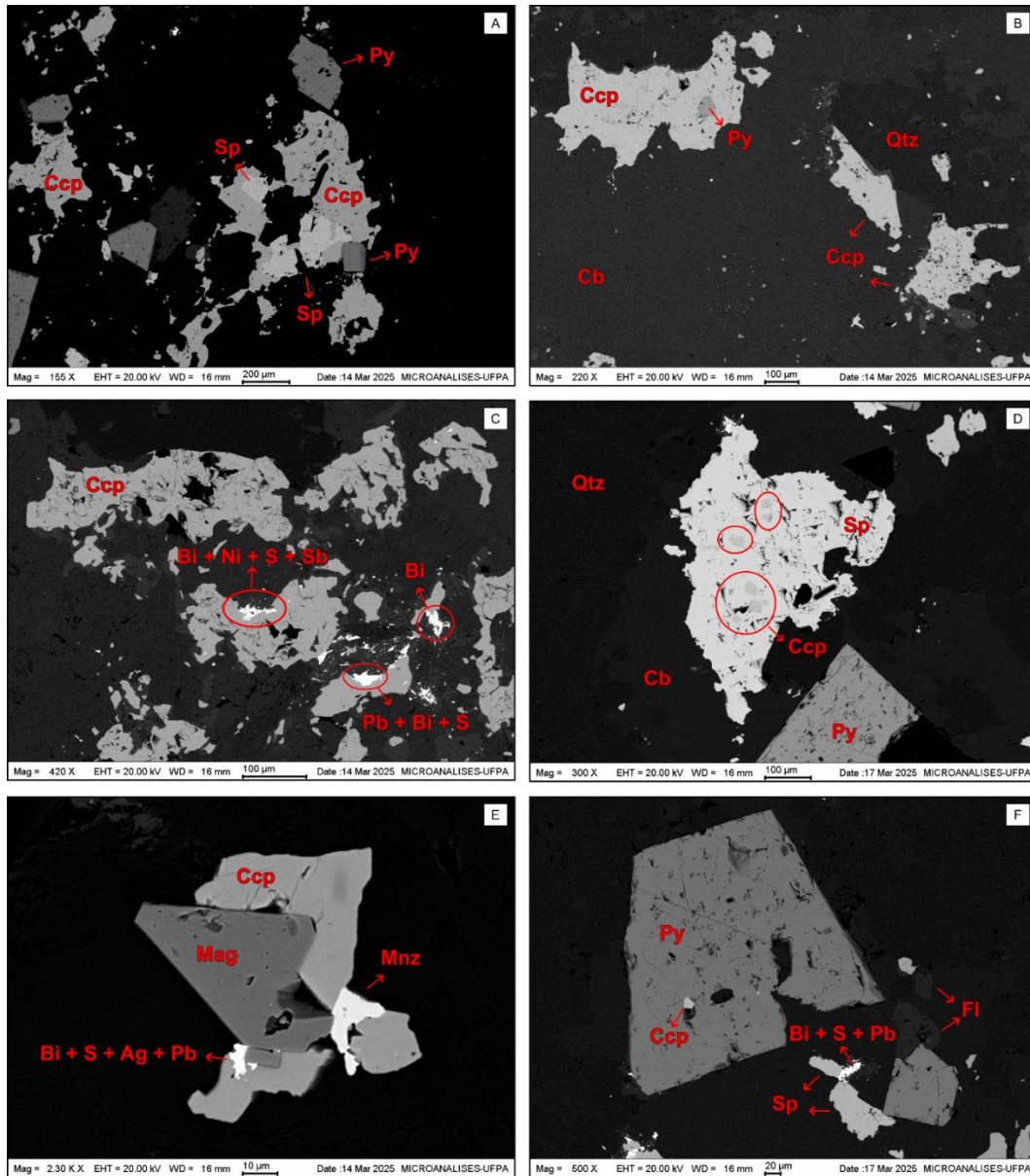


Figura 11 - Aspectos morfológicos e texturais dos principais minerais associados ao ouro do Depósito São Jorge em imagens de elétrons retroespalhados. (A) Cristais de pirita (Py), calcopirita (Ccp) e de esfalerita (Sp) com intercrescimento em calcopirita. (B) Cristais de calcopirita com inclusão de pirita. (C) Cristais de calcopirita com minerais de bismuto e bismuto nativo (Bi) associados. (D) Cristal de esfalerita com desmisturas de calcopirita e pirita em veio de quartzo (Qtz) e carbonato (Cb). (E) Cristais de calcopirita com magnetita (Mag), monazita (Mnz) e sulfeto de bismuto, chumbo e prata associados. (F) Cristal de pirita com inclusão de calcopirita e cristal de esfalerita com intercrescimento de sulfeto de bismuto e chumbo, e cristais anédricos de fluorita (Fl).

3.1.2 Depósito São Chico

Os sulfetos associados ao ouro consistem em pirita + galena + esfalerita ± calcopirita (Figura 12).

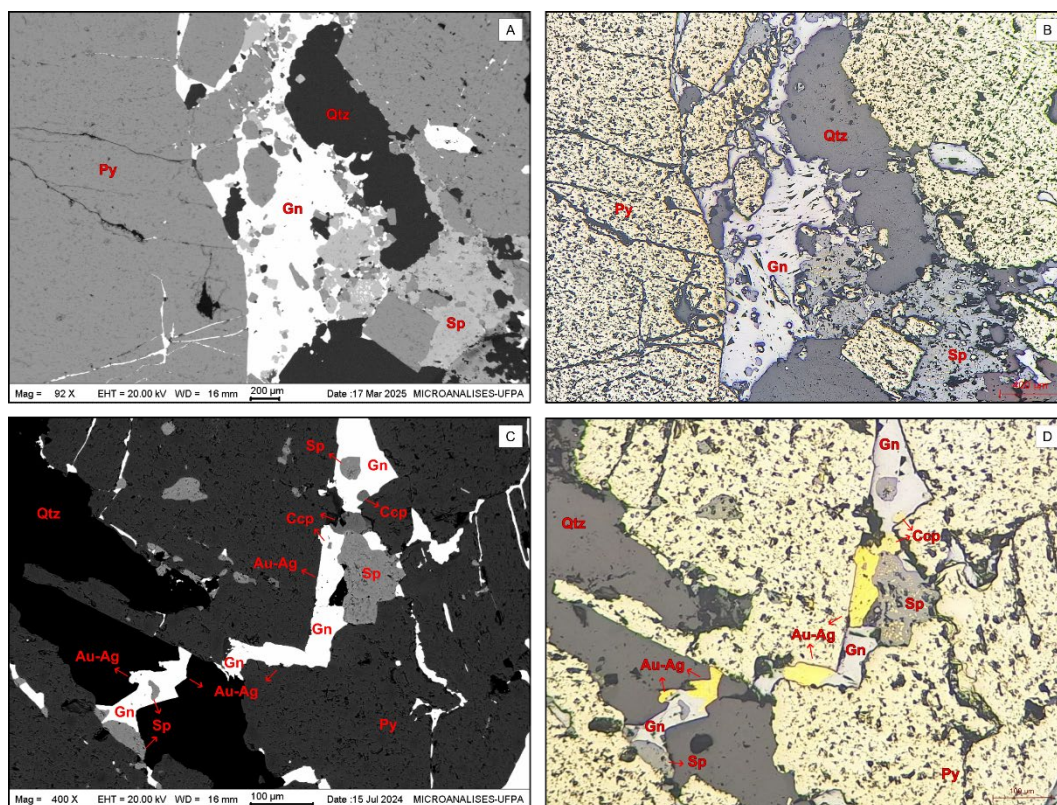


Figura 12 - Aspecto geral dos principais minerais associados ao ouro no depósito São Chico. (A) e (C) Imagem de elétrons retroespalhados. (B) e (D) Fotomicrografia em luz refletida e polarizadores paralelos. Calcopirita (Ccp); *Electrum* (Au + Ag); Pirita (Py); Quartzo (Qtz); Esfalerita (Sp).

A **pirita** (Figuras 12 e 13) é o sulfeto mais abundante, ocorrendo como agregados centimétricos, subédricos a anédricos, podendo conter inclusões ou preenchimento de fraturas por galena, ouro, esfalerita, quartzo e calcopirita. Nas porções hidrotermalizadas da rocha, pode ocorrer como grãos anédricos de tamanhos menores que 100µm com intercrescimento na calcopirita.

A **galena** (Figuras 12 e 13A-G) é o segundo mineral mais abundante e o principal associado ao ouro; ocorre em forma livre ou preenchendo fraturas e cavidades em pirita e em quartzo, além de conter inclusões de pirita, calcopirita, esfalerita e ouro. Quando preenchendo fraturas pode formar associações com ouro e/ou esfalerita e de forma mais restrita com calcopirita. Também pode ocorrer como intercrescimento em esfalerita ou de forma isolada como inclusões em calcopirita.

A **esfalerita** (Figuras 12 e 13B-F) ocorre como cristais anédricos livres que frequentemente apresentam desmisturas de calcopirita em formas alongadas e orientadas paralelamente às direções cristalográficas (maclas) ou como corpos ovais sem orientação. Também ocorre com intercrescimento de galena e/ou ouro preenchendo fraturas ou como inclusão em pirita. Localmente apresenta inclusões de ouro, galena e pirita.

A **calcopirita** (Figuras 12C-D e 13D, F-H) tem uma ocorrência mais restrita, na forma de inclusões nos minerais supracitados. Pode ocorrer também com intercrescimento/associada ao ouro e/ou galena preenchendo fraturas ou inclusões em pirita, além de como desmisturas em esfalerita. Nas porções do veio próximo a rocha hidrotermalizada forma agregados de cristais subédricos a anédricos, de tamanhos até aproximadamente 600 μ m, dispersos ou com intercrescimento com pirita.

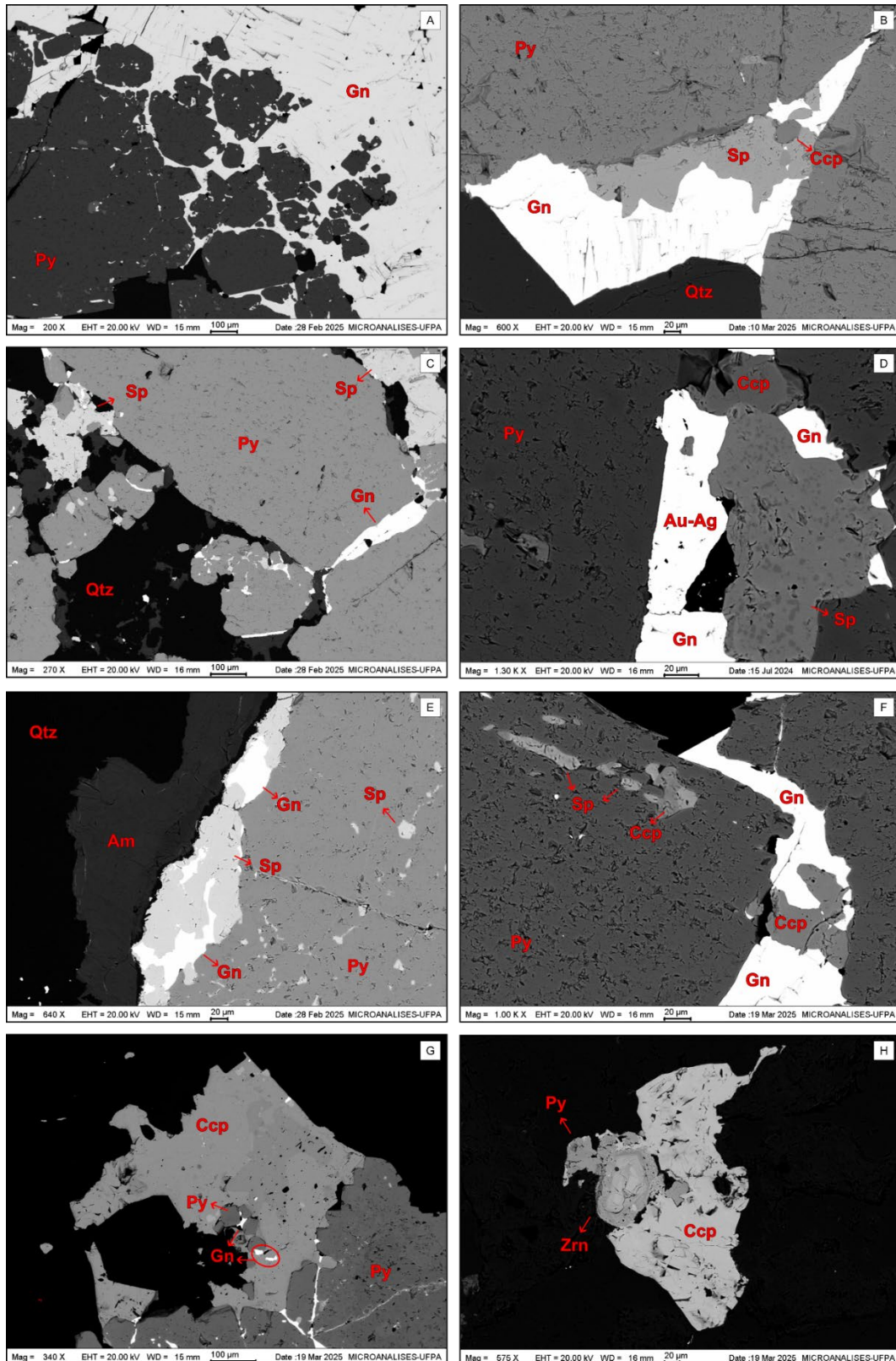


Figura 13 - Aspectos morfológicos e texturais dos sulfetos associados ao ouro do Depósito São Chico em imagens de elétrons retroespalhados. (A) Relação textural entre galena (Gn) e pirita (Py). (B) Galena com intercrescimento de esfalerita (Sp) e inclusão de calcopirita (Ccp). Relação textural entre (C) esfalerita, pirita e quartzo (Qtz), e galena preenchendo fratura em pirita e (D) ouro (Au + Ag), pirita, calcopirita, esfalerita e galena. (E) Cristais de esfalerita com desmisturas de galena, próximo a veio de quartzo e anfíbólio (Am). (F) Galena com intercrescimento de calcopirita, e inclusão de esfalerita com intercrescimento de calcopirita em pirita. (G) Calcopirita zonada e com inclusão de galena e pirita. (H) Calcopirita associada a pirita e zircão (Zrn) em rocha alterada.

3.2 QUÍMICA MINERAL E DISTRIBUIÇÃO DO OURO

Quinze elementos (Tabela 1 e APÊNDICE A) foram analisados nas partículas de ouro dos depósitos estudados, por MEV-EDS no Laboratório de Microanálises do IG-UFGA, para caracterização morfológica e composicional, cujos resultados serão discutidos a seguir.

3.2.1 Depósito São Jorge

Há duas principais gerações distintas de ouro nativo agrupadas segundo seu modo de ocorrência: (1) na forma de inclusões em pirita (Figuras 14A e B) e quartzo (Figura 14C), e na forma livre (Figura 14D); (2) preenchendo fraturas (Figuras 14E e F) ou cavidades em pirita.

O ouro 1 (Tabela 1) é caracterizado por baixos conteúdos de Ag (Bdl.⁹ - 4,00%) e alto Fe (0,69 - 6,21%), Te (0,45 - 3,61%), Sb (0,22 - 2,01%) e Cu (0,23 - 1,14%). As partículas têm formatos diversos, mas com predominância nas formas arredondadas e subarredondadas; os tamanhos variam de < 5µm a 40µm, com pureza¹⁰ média de ouro de 986. As inclusões de ouro ocorrem mais expressivamente em pirita, enquanto as inclusões em quartzo ocorrem de forma mais restrita e em tamanhos menores que 10µm.

O ouro 2 (Tabela 1) é caracterizado por altos conteúdos de Ag (7,86 - 15,72%) e baixo Fe (0,54 - 4,40%), Te (0,37 - 0,92%), Sb (Bdl. - 0,33%) e Cu (0,15 - 0,51%). As partículas são majoritariamente em formato alongado e poligonal, com tamanhos variando de 5µm a 150µm, com pureza média de ouro de 877.

As concentrações dos elementos (Tabela 1) Ni, Zn, Pt, Hg, Pb e Bi não variaram significativamente nas duas gerações, enquanto as de As, Pd e S são pouco expressivas sendo em sua maioria abaixo do limite de detecção (Bdl.). Pontualmente as partículas de ouro ocorrem como *electrum* (associado a calcopirita e galena; Figura 14G), e teluretos de Ag + Au + e de Bi + Au, sendo estes últimos na forma de bolhas encapsuladas em pirita (Figura 14H).

⁹ Bdl.: valores abaixo do limite de detecção.

¹⁰ A pureza do ouro foi calculada pela fórmula: $Au \times 1000 / Ag + Au$ (Halbauer & Utter, 1977).

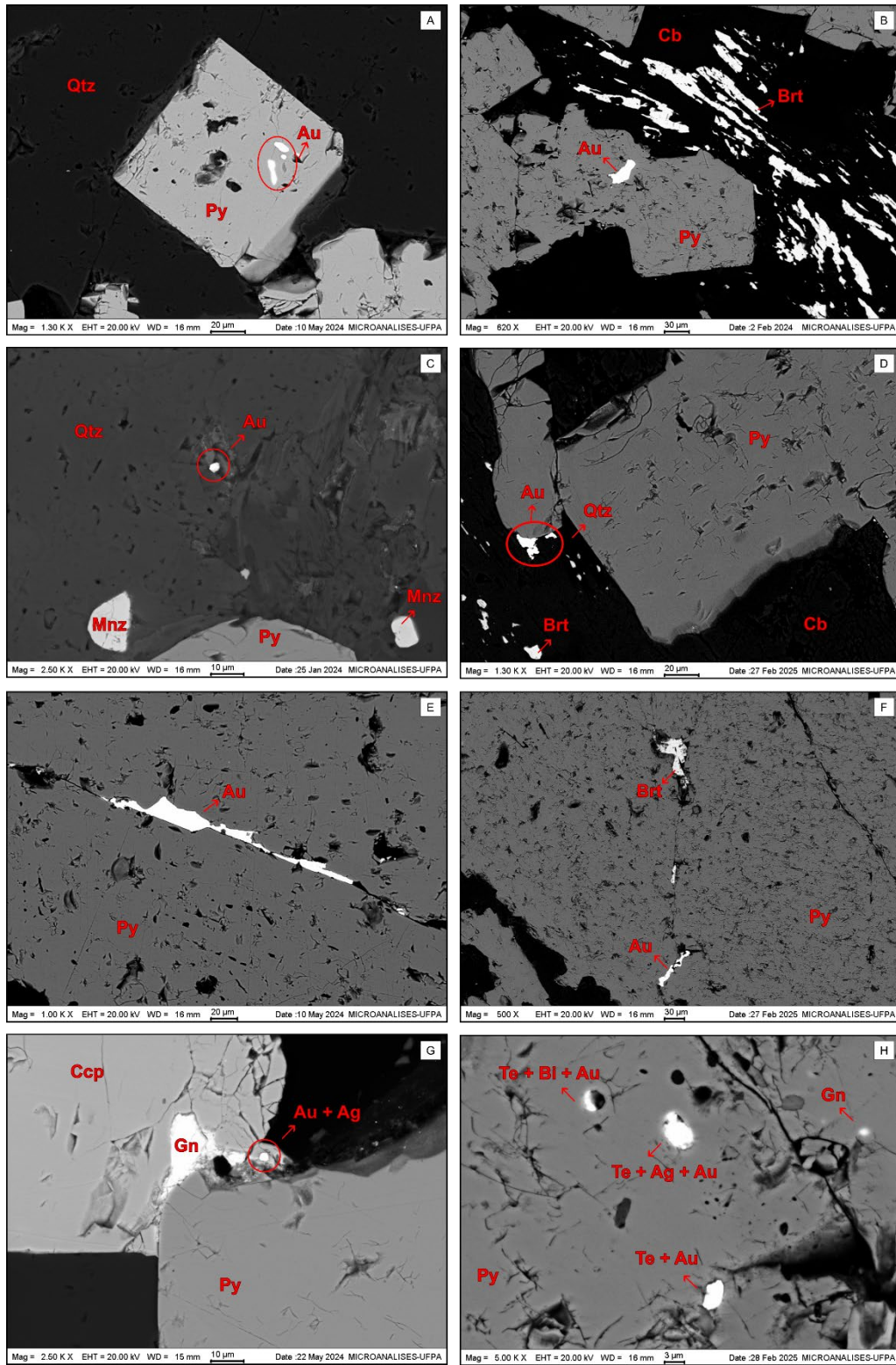


Figura 14 - Formas de ocorrência do ouro no depósito São Jorge em imagens de elétrons retroespalhados. (A) Inclusões de ouro (Au) em cristal euédrico de pirita (Py). (B) Agregado de pirita com inclusão de ouro, associado a veio de carbonato (Cb) e barita (Brt). (C) Quartzo (Qtz) com inclusões de ouro e monazita (Mnz) e pirita associada. (D) Ouro livre com bordas corroídas associado a veio de carbonato e barita. (E) Agregado de pirita com fratura preenchida por ouro. (F) Fratura em pirita preenchida por ouro e barita. (G) *Electrum* (Au + Ag) incluído em cristal de calcopirita (Ccp) e associado espacialmente a galena (Gn) e pirita. (H) Pirita com bolhas de teluretos (Te) de ouro e/ou prata e/ou bismuto (Bi), e inclusão de galena.

3.2.2 Depósito São Chico

O ouro ocorre como uma liga de Au + Ag (*electrum*), nas formas (1) livre/inclusão em quartzo (Figura 15A) e como inclusão em pirita (Figura 15C), e (2) e preenchendo fraturas em pirita (Figuras 15B e H).

As concentrações de Fe, Ni, Cu, Zn, As, Te, Pt e Pb (Tabela 1) ocorrem de forma uniforme entre as duas formas de ouro, com diferenças pouco significativas, sendo que no ouro 1 os teores são levemente mais elevados. S e Pd não foram detectados em ambas as formas.

Os elementos que apresentam uma diferença mais significativa nas duas formas de ouro são Ag, Sb, Hg e Bi. O ouro 1 (Tabela 1) apresenta menores teores de Ag (29,82 - 51,42%) e maiores de Sb (Bdl. - 0,34%), Hg (0,61 - 2,67%) e Bi (1,40 - 5,03%); as partículas ocorrem predominantemente na forma subarredondada e alongada, com tamanhos variando de 10µm a 150µm. A pureza média dessas partículas é de 526.

Já o ouro 2, ocorre como uma associação de *electrum* e galena que preenche fraturas em pirita e espaços entre os cristais de quartzo, podendo também estar associado a esfalerita e/ou a calcopirita. Contém maiores teores de Ag (38,97 - 59,83%), menores de Hg (0,64 - 1,78%) e Bi (1,55 - 3,53%); não foram detectadas concentrações de Sb (Tabela 1). As partículas do ouro 2 apresentam formatos alongados e poligonais, com tamanhos variando de 20µm a 120µm, tendo uma pureza média de 507 de ouro.

As partículas do ouro também podem ser agrupadas segundo a sua associação espacial com outros minerais, sendo divididas em seis categorias: (i) ouro associado a galena, geralmente preenchendo fraturas (Figura 15B); (ii) ouro associado a esfalerita, com o ouro ocorrendo na borda deste mineral ou formando inclusões com ele em pirita (Figura 15F); (iii) ouro associado a calcopirita, na forma de inclusões ou preenchendo cavidades em pirita (Figuras 15E e G); (iv) ouro associado a galena + esfalerita, preenchendo fraturas em pirita (Figura 15H); (v) ouro associado a galena + esfalerita + calcopirita, preenchendo fraturas em pirita (Figuras 12 C-D); (vi) ouro sem associações, ocorrendo como inclusões em pirita ou quartzo (Figuras 15A, C) e mais raramente como inclusões em esfalerita (Figura 15D). Em relação a distribuição dos elementos traços (Apêndice B), o ouro (iii) contém maiores teores médios de Bi (3,60%), Pb (3,18%), Fe (0,78%) e Cu (0,44%), enquanto o ouro (ii) apresenta maiores valores médios de Zn (0,42%) e o ouro (iv) menores valores médios de Hg (0,90%). Fazendo uma comparação entre as duas formas de maior ocorrência de ouro (i e vi), o ouro (i) apresenta teores levemente maiores de Pb (2,45%) que o ouro (vi; 2,22%).

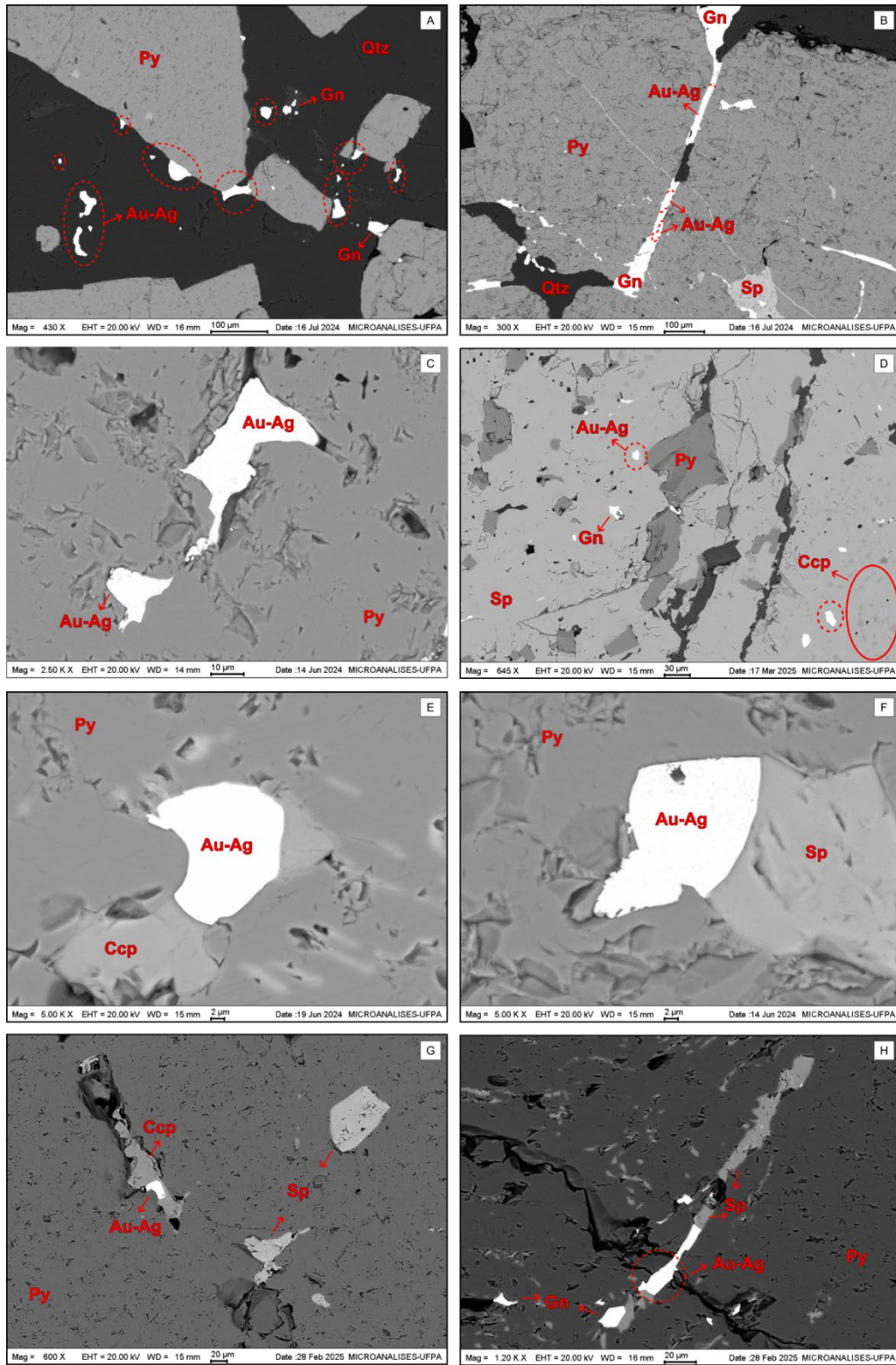


Figura 15 - Formas de ocorrência do ouro no depósito São Chico em imagens de elétrons retroespalhados. (A) partículas de *electrum* (Au +Ag) ocorrendo de forma livre em quartzo (Qtz) e na borda de pirita (Py) assim como a galena (Gn). (B) Fratura em pirita preenchida por galena e *electrum*. (C) Partícula de *electrum* incluída em pirita. (D) Esfalerita (Sp) com inclusões de *electrum*, galena e pirita, além de desmisturas de calcopirita (Ccp). (E) Pirita com inclusão de *electrum* associada a calcopirita. (F) Pirita com inclusão de *electrum* associada a esfalerita. (G) Pirita com inclusões de esfalerita e com cavidade preenchida por calcopirita com inclusão de *electrum*. (H) Fratura em pirita preenchida por galena, *electrum* e esfalerita.

Tabela 1 - Média, desvio padrão e valores mínimos e máximos das concentrações de elementos (%) em partículas de ouro analisadas por MEV-EDS.

	Depósito São Jorge				Depósito São Chico			
	Inclusão N = 32		Preenchendo fraturas N = 35		Inclusão N = 47		Preenchendo fraturas N = 38	
	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>
S	Bdl.	Bdl. - Bdl.	Bdl.	Bdl. - Bdl.	Bdl.	Bdl. - Bdl.	Bdl.	Bdl. - Bdl.
Fe	2,33 ± 1,18	0,69 - 6,21	1,76 ± 0,96	0,54 - 4,40	0,56 ± 0,33	0,17 - 1,58	0,66 ± 0,36	0,2 - 1,63
Ni	0,23 ± 0,04	0,16 - 0,36	0,24 ± 0,05	0,15 - 0,38	0,22 ± 0,08	0,12 - 0,61	0,23 ± 0,06	0,16 - 0,44
Cu	0,35 ± 0,15	0,23 - 1,14	0,31 ± 0,07	0,15 - 0,51	0,29 ± 0,09	0,18 - 0,56	0,27 ± 0,06	0,16 - 0,43
Zn	0,34 ± 0,08	0,18 - 0,56	0,33 ± 0,09	0,10 - 0,50	0,31 ± 0,12	0,16 - 0,81	0,27 ± 0,09	0,1 - 0,57
As	Bdl.	Bdl. - 0,13	Bdl.	Bdl. - 0,16	Bdl.	Bdl. - 0,29	Bdl.	Bdl. - 0,19
Pd	Bdl.	Bdl. - 0,19	Bdl.	Bdl. - Bdl.	Bdl.	Bdl. - Bdl.	Bdl.	Bdl. - Bdl.
Ag	1,21 ± 1,21	Bdl. - 4,00	11,18 ± 1,95	7,86 - 15,72	43,71 ± 3,70	29,82 - 51,42	45,43 ± 3,63	38,97 - 59,83
Sb	0,71 ± 0,42	0,22 - 2,01	0,13 ± 0,09	Bdl. - 0,33	Bdl.	Bdl. - 0,34	Bdl.	Bdl. - Bdl.
Te	1,10 ± 0,74	0,45 - 3,61	0,64 ± 0,16	0,37 - 0,92	0,45 ± 0,17	0,17 - 1,00	0,45 ± 0,15	0,17 - 0,84
Pt	Bdl.	Bdl. - 0,21	Bdl.	Bdl. - 0,20	0,14 ± 0,17	Bdl. - 0,95	0,15 ± 0,15	Bdl. - 0,53
Au	87,97 ± 1,49	84,27 - 91,02	79,77 ± 2,49	73,82 - 83,87	48,55 ± 2,83	42,88 - 57,10	46,84 ± 2,99	33,53 - 51,76
Hg	0,93 ± 0,24	0,33 - 1,47	1,05 ± 0,29	0,46 - 1,86	1,08 ± 0,35	0,61 - 2,67	1,04 ± 0,27	0,64 - 1,78
Pb	2,41 ± 0,39	1,68 - 3,60	2,27 ± 0,31	1,76 - 3,01	2,32 ± 0,66	1,21 - 4,30	2,48 ± 0,62	1,77 - 4,25
Bi	2,37 ± 0,35	1,84 - 3,23	2,28 ± 0,33	1,72 - 3,24	2,32 ± 0,75	1,40 - 5,03	2,18 ± 0,42	1,55 - 3,53

Bdl.: valores abaixo do limite de detecção. Limite de detecção: 0,1%. Os valores numéricos estão representados com duas casas decimais para uma melhor visualização dos dados e não devem ser interpretados para fins de precisão. N: número de análises.

3.3 QUÍMICA MINERAL DOS SULFETOS

Para uma melhor visualização das diferenças químicas entre os minerais, eles foram categorizados segundo diferentes formas de ocorrências ou diferentes associações com o ouro.

3.3.1 Depósito São Jorge

As concentrações de Au nos minerais estudados estão resumidas na Tabela 2 e os valores de correlações e concentrações de outros elementos nos Apêndices C a K.

As concentrações de Au na **pirita** (Py) variam de 0,75 a 1,61%, e segundo a sua relação com o ouro, foi dividida em três subtipos: Py 1- sem ouro, Py 2 - ouro preenchendo fraturas e Py 3 - ouro como inclusões. As composições de Au entre as três fases não apresentam diferenças significativas, porém em relação a outros elementos na pirita, o Au apresenta correlações moderadas negativas com As na Py 1 ($r -0,55$) e Py 3 ($r -0,69$), e moderada positiva na Py 2 ($r 0,52$). Além disso as Py 2 e 3 apresentam correlações fracas e moderadas negativas entre a Pt e Au ($r -0,48$ e $-0,66$, respectivamente) enquanto a Py 1 é a única que apresenta correlação fraca positiva entre Au e Sb ($r 0,39$).

Em relação a Ag, Py 1, Py 2 e Py 3 apresentam concentrações médias abaixo do limite de detecção, na qual a Py 1 atinge valores máximos de 0,16%.

As concentrações de Au na **calcopirita** (Ccp) variam de 0,90 a 1,52%. Tendo em base a sua forma de ocorrências foram subdivididas em dois tipos: Ccp 1 – forma livre e Ccp 2 – inclusa em pirita. Ambas as formas possuem valores próximos de Au, na qual a Ccp 1 apresenta correlação moderada negativa entre Au e Ni ($r -0,62$) e na Ccp 2 o Au não apresenta nenhuma correlação significativa. Em relação aos outros elementos, a Ccp 1 contém menores teores de Fe (26,24%) em relação a Ccp 2 (28, 79%).

As concentrações de Au na **esfalerita** (Sp) variam de 0,90 a 1,65%. Os cristais de esfalerita ocorrem sem e com desmisturas de calcopirita e por conta disso foram subdivididas em Sp 1 e Sp 2, respectivamente. A Sp 1 contém teores de Au um pouco mais elevados em relação a Sp 2, porém o Au não apresenta correlação significativa com os outros elementos de sua composição. A Sp 2 contém maiores valores médios de As (0,14%) e apresenta correlação forte positiva entre Au e S ($r 0,93$) e correlação forte negativa entre Au e Hg ($r - 0,91$).

As concentrações de Au na **galena** (Gn) variam de 1,84 a 2,29%, sendo o sulfeto com maior teor de Au entre os estudados. Os seus subtipos foram classificados segundo a sua forma de ocorrência: Gn 1 – inclusão e Gn 2 – preenchendo fratura em pirita. A Gn 1 é mais rica em Cu

(5,81%), Ag (0,34%) e Te (0,99%), enquanto a Gn 2 é mais rica em Fe (5,49%), As (12,88%), Pd (0,86%), Pt (2,10%) e Bi (2,84%). Os teores médios de Au entre as duas fases são bastante similares, e por conta da quantidade restrita de partículas analisadas (menos de três) não foi possível fazer a correção entre os elementos.

Os **sulfetos de bismuto e chumbo** apresentam concentrações variando de 15,89 a 23,82% de S, 32,54 a 49,25% de Bi e 12,65 a 24,76% de Pb, além de concentrações de Au variando de 1,31 a 2,81%, e ocorrem de duas formas: 1 – Partículas euédricas, poligonais preenchendo fraturas e associadas a barita; 2 – Partículas anédricas inclusas em piritita. O subtipo 1 contém maiores teores médios de Cu (10,57%) e levemente de Au (1,97%). O subtipo 2 contém maiores teores médios de Bi (41,53%) apresenta correlação positiva entre Au e As (r 0,77), enquanto o subtipo 1 não apresenta correlações significativas.

Tabela 2 - Concentrações de Au (%) nos sulfetos do depósito São Jorge, análises por MEV-EDS.

Depósito São Jorge				
		<i>N</i>	<i>Média</i>	<i>Mín. - Máx.</i>
<i>Pirita</i>	Py 1	36	1,13 ± 0,19	0,75 - 1,61
	Py 2	17	1,10 ± 0,17	0,81 - 1,36
	Py 3	10	1,15 ± 0,13	0,95 - 1,35
<i>Calcopirita</i>	Ccp 1	16	1,16 ± 0,19	0,90 - 1,52
	Ccp 2	4	1,15 ± 0,15	0,96 - 1,32
<i>Esfalerita</i>	Sp 1	7	1,37 ± 0,29	0,90 - 1,65
	Sp 2	5	1,20 ± 0,24	0,97 - 1,57
<i>Galena</i>	Gn 1	2	2,07 ± 0,09	2,00 - 2,13
	Gn 2	2	2,07 ± 0,32	1,84 - 2,29
<i>Sulfeto de Bi + Pb</i>	1	4	1,97 ± 0,62	1,31 - 2,81
	2	7	1,78 ± 0,28	1,35 - 2,09

Limite de detecção: 0,1%. Os valores numéricos estão representados com duas casas decimais para uma melhor visualização dos dados e não devem ser interpretados para fins de precisão. N: número de cristais analisados. Py: piritita; Ccp: calcopirita; Sp: esfalerita; Gn: galena.

3.3.2 Depósito São Chico

As concentrações de Au nos minerais estudados estão resumidas na Tabela 3 e os valores de correlações e concentrações de outros elementos nos Apêndices L a S.

As concentrações de Au na **pirita** (Py) variam de 0,76 a 2,14%, e segundo a sua relação com o ouro, foi dividida em três subtipos: Py 1- sem ouro, Py 2 - ouro preenchendo fraturas e Py 3 - ouro como inclusões. As composições de Au entre as três fases não apresentam diferenças significativas e concentrações de Ag abaixo do limite de detecção, porém em relação a outros elementos, Py 1 apresenta maiores concentrações médias de Zn (0,37%), As (0,17%), Py 2 maiores valores médios de Pb (1,54%) e Py 3 maiores valores médios de Te (0,46%). O Au apresenta correlação moderada positiva com Pb na Py 1 (r 0,64) e moderada negativa com As na Py 2 (r -0,64), na Py 3 o Au tem correlação forte negativa com a Ag (r -0,82) e Pt (r -0,81).

As concentrações de Au na **galena** (Gn) variam de 1,06 a 2,91%, sendo o sulfeto com maior teor de Au entre os estudados. Os seus subtipos foram classificados segundo a sua relação com o ouro e os outros minerais: Gn 1 – sem ouro, Gn 2 – com ouro, Gn 3 – associada a esfalerita, Gn 4 – associada a calcopirita. A Gn 2 é a mais rica em ouro, com concentrações médias de 1,93%. As galenas são ricas em As, tendo concentrações variando de 9,56 a 13,87%. Em relação aos outros elementos, a Gn 2 é a única que apresenta concentrações de Ag acima do limite de detecção, podendo atingir até 1,52%, além de apresenta correlações forte positivas entre Au e Pd (r 0,81) e Au e Ag (r 0,85), e correlação forte negativa entre Au e Pb (r -0,80). A Gn 3 contém maiores concentrações médias de Fe (1,09%) e de Zn (1,11%) e correlações moderadas negativa entre Au e As (r -0,66) e positiva entre Au e Sb (r 0,65), enquanto a Gn 4 apresenta maiores concentrações médias de Bi (2,15%) com correlação perfeita positiva entre Au e Zn (r 1,00). Por fim, na Gn 1 o Au apresenta correlação muito forte negativa com o Te (r -0,96).

As concentrações de Au na **esfalerita** (Sp) variam de 0,78 a 1,74%. Os cristais de esfalerita foram subdivididos de acordo com a sua associação com ouro e outros minerais. Sp 1 – sem ouro, Sp 2 – com ouro (incluso ou na borda do mineral) e Sp 3 – associado com galena. Os valores médios de Au na Sp 1 e Sp 2 são próximos, tendo a Sp 3 a fase com menores teores médios desse elemento (1,08%). A Sp 1 apresenta os menores teores médios de Ag (0,27%) e de Hg (1,14%), além de correlação perfeita negativa entre Au e Cu (r -1,00) e muito forte negativa entre Ag e Fe (r -0,99). A Sp 2 contém os maiores teores de Bi (2,16%), Hg (1,79%) e Sb (0,56%), e assim como a Sp 3 não apresenta correlações significativas de Au e Ag com os outros elementos.

As concentrações de Au na **calcopirita** (Ccp) variam de 1,03 a 1,65%. Para uma melhor visualização dos dados as diferentes associações e texturas de calcopirita foram divididas em: Ccp 1 – sem ouro, Ccp 2 – sem ouro e com zoneamento composicional (a- porção central do zoneamento), Ccp 3 – com ouro, Ccp 4 – associado a galena. A Ccp 1 é a que possui menores concentrações médias de ouro (1,26%) e correlação forte negativa entre Au e Pt ($r -0,78$), já a Ccp 4 apresenta correlação forte positiva entre Au e Te ($r 0,87$). Não foi possível estabelecer a matriz de correlação entre os elementos das Ccp 2 e 3 por conta do restrito número de cristais analisados (menos de três). As concentrações médias de Ag em todos os tipos de calcopirita são abaixo do limite de detecção, atingindo valores máximos de 1,14% na Ccp 1 e Ccp 4. Em relação ao Ccp 2, com zoneamento composicional, a porção central (Ccp 2a) é mais rica em Hg (1,79%), Te (0,58%) e Pd (0,23%) e com valores de As abaixo do limite de detecção.

Tabela 3 - Concentrações de Au (%) nos sulfetos do depósito São Chico, análises por MEV-EDS.

Depósito São Chico				
		<i>N</i>	<i>Média</i>	<i>Mín. - Máx.</i>
<i>Pirita</i>	Py 1	15	$1,29 \pm 0,29$	0,89 - 2,14
	Py 2	10	$1,23 \pm 0,22$	0,76 - 1,52
	Py 3	6	$1,24 \pm 0,22$	0,92 - 1,58
<i>Galena</i>	Gn 1	7	$1,54 \pm 0,55$	1,06 - 2,44
	Gn 2	7	$1,93 \pm 0,54$	1,29 - 2,91
	Gn 3	10	$1,59 \pm 0,29$	1,18 - 2,02
	Gn 4	3	$1,52 \pm 0,15$	1,41 - 1,70
<i>Esfalerita</i>	Sp 1	4	$1,30 \pm 0,19$	1,12 - 1,54
	Sp 2	4	$1,33 \pm 0,28$	1,08 - 1,74
	Sp 3	9	$1,08 \pm 0,30$	0,78 - 1,61
<i>Calcopirita</i>	Ccp 1	9	$1,26 \pm 0,15$	1,03 - 1,56
	Ccp 2	2	$1,37 \pm 0,04$	1,34 - 1,40
	Ccp 2a	2	$1,33 \pm 0,06$	1,29 - 1,37
	Ccp 3	2	$1,36 \pm 0,22$	1,20 - 1,52
	Ccp 4	6	$1,35 \pm 0,22$	1,01 - 1,65

Limite de detecção: 0,1%. Os valores numéricos estão representados com duas casas decimais para uma melhor visualização dos dados e não devem ser interpretados para fins de precisão. N: número de cristais analisados. Py: pirita; Gn: galena; Sp: esfalerita; Ccp: calcopirita.

3.4 ESTATÍSTICA MULTIVARIADA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO OURO

A Figura 16 resume os resultados da análise de componentes principais (PCA). Apesar de apenas 52,79% da variância total ter sido englobada pelos componentes principais (CP, fator 1 e 2), as projeções, incluindo qualquer um dos outros oito fatores, não são apresentadas por não fornecerem nenhuma informação adicional. A partir das projeções mostradas na Figura 16 é observada uma diferença significativa entre os dois depósitos. No depósito São Jorge é possível observar que o ouro como inclusões e em fraturas apresenta uma sobreposição mínima, enquanto no depósito São Chico há um grau de sobreposição alto entre os dois tipos de ocorrência de ouro (Figura 16B).

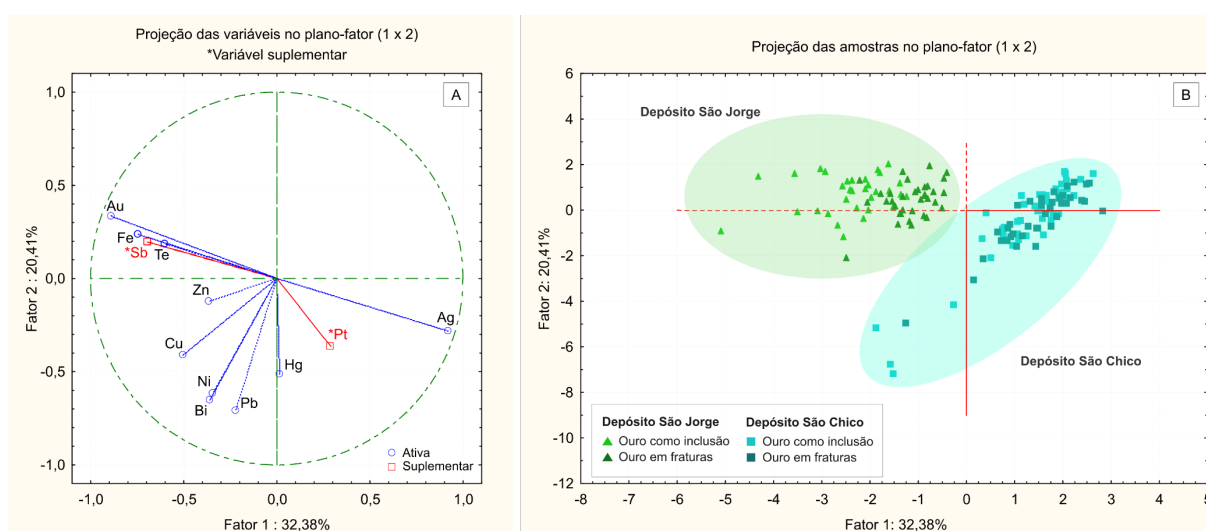


Figura 16 - Resultado da análise de componentes principais. (A) Círculo de correlação no gráfico de projeção das variáveis. (B) Gráfico da projeção das amostras no plano-fator (1 x 2).

As projeções na PC1 e PC2 indicam Au, Fe, Sb, Te e Ag como elementos com maior potencial discriminante entre os depósitos São Jorge e São Chico, sendo a Ag e Au com maior importância na contribuição das diferenças (Figuras 16 e 17). Os elementos Bi, Ni e Pb representam cerca de metade da importância na contribuição se comparados aos primeiros elementos, enquanto Cu, Hg e Zn são pouco significativos. O Sb e Pt estão apresentados no gráfico como variáveis suplementares, ou seja, a presença deles não afeta a variância das amostras, mas auxilia na interpretação, logo, o Sb apresenta uma importância aproximadamente igual ao Fe e Te, enquanto a Pt se mostrou pouco significativa. Sendo assim, é possível concluir que as diferenças entre os dois depósitos seguem um padrão bidimensional, ou seja, as concentrações de elementos menores e traços nas partículas de ouro dos depósitos São Jorge e São Chico se diferenciam de forma significativa em duas das dez dimensões do espaço amostral considerado neste trabalho.

Considerando o círculo de correlação (Figura 16A) e a matriz de correlação (Tabela 4), o Au apresenta uma correlação moderada positiva com Fe (r 0,66) e Te (r 0,50) e correlação perfeita negativa com Ag (r -1). Por outro lado, os elementos Cu, Bi e Ni apresentam uma boa correlação entre si, porém uma correlação fraca com o Au. Já o Zn, Pb, Hg e Pt mostram correlações pouco significativas na assembleia estudada. De acordo com essas características o seguinte comportamento é observado: a concentração dos elementos Au, Fe, Te e Sb aumenta em direção a extremidade esquerda do gráfico, enquanto a concentração de Ag aumenta na direção oposta, já as concentrações de Zn, Cu, Ni, Bi e Pb aumentam ligeiramente para o terceiro quadrante, Pt para o quarto quadrante e o Hg permanece inalterado em relação aos tipos de depósitos.

Tabela 4 - Matriz de correlação de elementos maiores, menores e traços em partículas de ouro.

	Fe	Ni	Cu	Zn	Ag	Te	Au	Hg	Pb	Bi
Fe	1									
Ni	0,12	1								
Cu	0,20	0,32	1							
Zn	0,16	0,11	0,20	1						
Ag	-0,69	-0,13	-0,29	-0,24	1					
Te	0,30	0,09	0,15	0,11	-0,53	1				
Au	0,66	0,10	0,27	0,23	-1,00	0,50	1			
Hg	-0,12	0,16	0,02	0,07	0,08	-0,01	-0,11	1		
Pb	0,04	0,41	0,31	0,14	-0,01	0,00	-0,04	0,17	1	
Bi	0,12	0,36	0,35	0,07	-0,16	0,11	0,11	0,32	0,39	1

Quantidade de análises: N = 152. Os valores numéricos correspondem ao r . Os valores em negrito correspondem às relações mais significativas dentre o espaço amostral, levando em consideração $p < 0,05$.

A Figura 17 ilustra que a região do depósito São Jorge é representada por uma maior concentração da associação Au-Sb-Fe-Te, enquanto a região do depósito São Chico está representada por maiores concentrações de Ag.

O diagrama Ag x (Fe+Te) (Figura 18A) evidencia a separação desses depósitos com base nos elementos obtidos pelo PCA, ressaltando que, apesar do Sb estar presente em maiores concentrações no depósito São Jorge, ele não é essencial para a discriminação dos dois depósitos. O depósito São Chico se concentra em uma área com valores menores que aproximadamente 2,5% de (Fe+Te) e entre 40 a 50% de Ag, já o depósito São Jorge se concentra em uma região com concentrações de (Fe+Te) acima de 1,5% e de Ag abaixo de 20%. O diagrama Ag x Au/10 x (Fe+Te) (Figura 18B) mostra que a análise de PCA é efetiva para discriminar não só partículas de ouro de diferentes depósitos, mas também dentro dos depósitos, como as observadas no depósito São Jorge, na qual foram possíveis identificar três

agrupamentos composicionais distintos: I – ouro em inclusão com fases a e b, e II – ouro em fraturas.

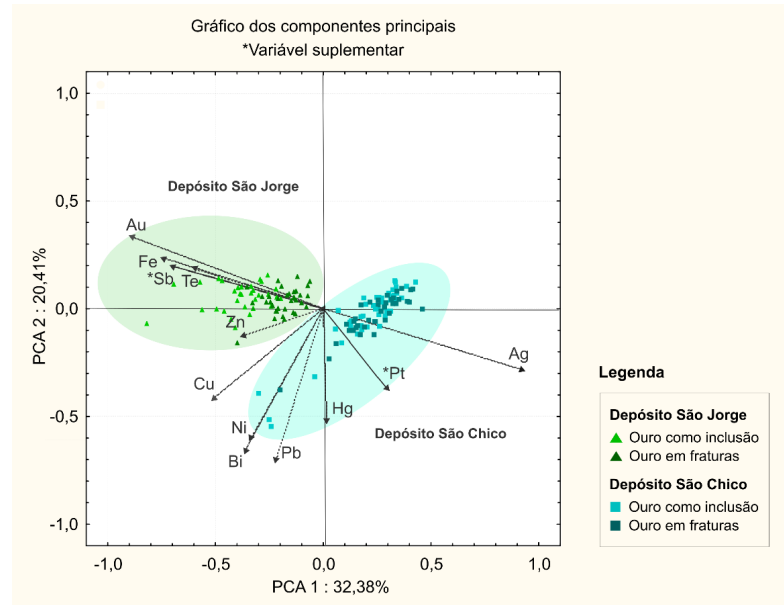


Figura 17 - Gráfico dos componentes principais (PCA).

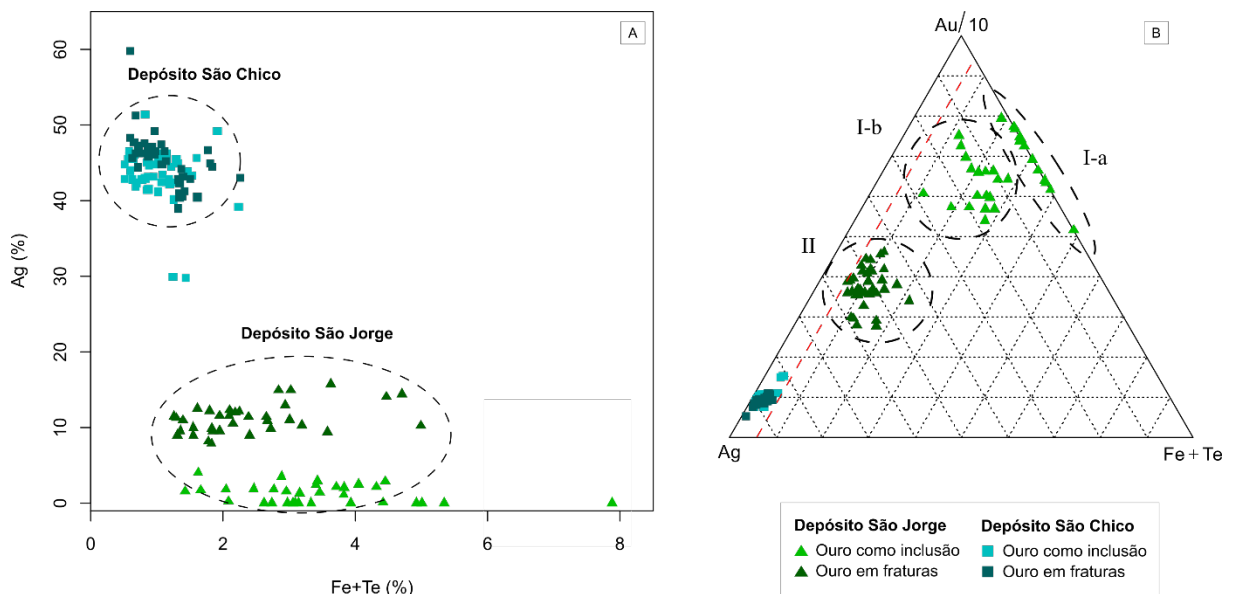


Figura 18 - (A) diagrama binário Ag vs Fe+Te. (B) diagrama ternário Ag vs Au/10 vs Fe+Te, com destaque para as três fases de ouro discriminadas no depósito São Jorge: I - ouro como inclusões e II - ouro em fraturas.

4 DISCUSSÃO

4.1 ASSINATURA GEOQUÍMICA DO OURO EM DEPÓSITOS DA PMT

As partículas de ouro exibem características composicionais e microtextura que são consequência de sua gênese e subsequente residência em ambiente hipogênico, sendo o padrão de elementos menores e traços, assim como as inclusões nas partículas de ouro uma ferramenta eficaz para distinguir diferentes tipos de mineralizações, detectar zoneamento dentro de uma área mineralizada e discriminar entre ouro de origem primária ou secundária (Liu & Beaudoïn 2021, Chapman *et al.* 2023, Vishiti *et al.* 2017).

Este trabalho demonstra que a assinatura geoquímica do ouro é característica de cada depósito e que além da composição distinta evidenciada principalmente pela concentração de Au e Ag, as concentrações de elementos traços como Fe e Te também se mostraram bons discriminantes na análise de PCA.

O ouro do depósito São Jorge apresenta uma assinatura geoquímica com altos teores de Au (73,82 – 91,02%), Fe (0,54 – 6,21%) e Te (0,37 – 3,61%) em comparação com o ouro do depósito São Chico que apresenta uma assinatura com maiores concentrações de Ag (29,82 – 51,42%).

O ouro nativo é geralmente um dos últimos minerais na sequência paragenética de processos hidrotermais, sendo a sua formação iniciada com uma composição rica em Au e pobre em Ag (Alfonso *et al.* 2023). De acordo com Morrison *et al.* (1991), as variações internas dentro de depósitos individuais podem refletir diferentes condições de deposição de Au e Ag no sistema hidrotermal e que a mineralização hospedada em granitos em níveis rasos apresenta baixa pureza (< 600), enquanto em níveis profundos (2-3km) alta pureza. Porém, a pureza do ouro pode não estar apenas relacionada à profundidade, mas também às associações minerais e à sua posição na sequência paragenética em depósitos complexos.

Sendo assim, o ouro do depósito São Chico apresenta uma pureza média (507-526) que está dentro da faixa de depósitos epitermais, segundo Morrison *et al.* (1991). Outra característica que corrobora com essa classificação, é a presença de adularia nos veios mineralizados (Corrêa Lima *et al.* 2023), cuja formação pode ter sido influenciada por *boiling* associado a perda de H₂S do fluido.

É importante ressaltar que somente a pureza do ouro não é suficiente para discriminar diferentes ambientes, devendo ser levados em consideração o contexto geológico local, a

associação de minerais de minério e de ganga, assim como a textura e geoquímica dos cristais de quartzo (Morrison *et al.* 1991). Por isso, mais estudos precisam ser realizados para a classificação do ouro do depósito São Jorge, pois a pureza dos diferentes tipos de ouro presentes neste depósito permitem classificá-lo, segundo Morrison *et al.* (1991), tanto como um depósito relacionado à intrusão, quanto a depósitos do tipo pórfiros.

4.1.1 Relação da composição do ouro com a assembleia mineral

Apesar do ouro ser geralmente um dos últimos minerais na sequência paragenética de zonas mineralizadas, uma pequena geração de ouro acompanha cada estágio dos sulfetos que podem ocorrer como inclusões microscópicas ou dentro dos sítios das redes cristalinas (ouro invisível), na qual substituem o Fe na pirita e o Pb na galena, e a compensação eletrônica pode ser dada por outros elementos, como por exemplo o Te na posição do S na galena (Boyle 1979).

Em depósitos em que o ouro está associado a sulfetos de metais de base, a pureza do ouro depende de outros fatores, que não somente a profundidade, tais como o coeficiente de partição da prata entre o ouro e as outras fases minerais coexistentes (Fontboté *et al.* 2017). Assim, no depósito São Chico foi possível observar que as concentrações médias de Ag na pirita e calcopirita estão abaixo do limite de detecção. A Gn 2, coprecipitada com ouro, é a única dentre as outras fases que apresenta valores de Ag acima do limite de detecção; além disso, a presença de forte correlação entre Au e Ag ($r = 0,85$) indica que esses elementos ocorrem como uma solução sólida dentro do mineral, enquanto a correlação forte negativa entre Au e Pb ($r = -0,80$) sugere que a concentração de Au diminui com aumento da concentração de Pb em uma liga de Au-Ag-Pb (cf. Liu *et al.* 2021).

Os teores de Ag e de outros elementos no ouro dependem também de sua abundância nos fluidos hidrotermais, assim como da fugacidade de enxofre e oxigênio, temperatura, salinidade, acidez e raio iônico (Liu *et al.* 2021, Gas'kov 2017). A diminuição da pureza do ouro nativo da primeira para a última geração pode estar relacionada à temperatura e à formação de sulfetos em grande escala, pois a prata tem maior afinidade com o enxofre e entra nos minerais de sulfeto em altas temperaturas e com a redução da temperatura, a concentração e fugacidade de enxofre caem, favorecendo a concentração de Ag no ouro nativo (Gas'kov 2017).

Altos teores de telúrio (Te) no fluido hidrotermal podem influenciar a distribuição de prata entre ouro nativo e teluretos, dependendo da fugacidade de Te (Gas'kov 2017). A temperatura também pode influenciar nessa distribuição, como exemplificado por Morrison *et al.* (1991), durante o resfriamento de fluidos saturados em ouro, prata e telúrio, tende a precipitar teluretos

de prata (ex. hessita, a 300°C) e como consequência, o fluido empobrece em prata, formando ouro de alta pureza, como observado no depósito São Jorge (Au1; Figuras 14A e H).

A presença ou ausência de minerais cocrystalizados com o ouro pode influenciar a incorporação de elementos traços (devido ao coeficiente de partição), ou seja, é importante que haja uma diferenciação das fases minerais associadas ao ouro, pois a assinatura de elementos traços no ouro é consequência do mineral que o acompanha (Liu *et al.* 2021, Chapman *et al.* 2023, George *et al.* 2016). Isso é bem observado no ouro do depósito São Chico, na qual altas concentrações de Zn no ouro estão relacionadas a coprecipitação com a esfalerita (Figura 15F), enquanto as de Cu estão relacionadas a calcopirita (Figuras 15E e G).

É importante ressaltar que os elementos que não possuem correlação com o Au ou Ag provavelmente ocorrem como nanoinclusões ou impurezas na estrutura cristalina do ouro nativo (Liu *et al.* 2021).

4.1.2 Relação da composição do ouro com a textura

Na zona mineralizada do depósito São Jorge, o tamanho e hábito da pirita variam dependendo do grau e natureza da alteração hidrotermal e o ouro se apresenta predominantemente em duas texturas, com composições químicas distintas: Au 1 - partículas de ouro nativo formando inclusões minerais (altos teores de Au) e Au 2 - preenchendo fraturas (maiores teores de Ag) em pirita.

A deformação rúptil-dúctil pode alterar significativamente a distribuição de elementos traços em um mineral, na qual a difusão atômica na pirita sob estresse aumenta a porosidade do cristal facilitando a percolação de fluidos, ocasionando dissolução e remobilização de elementos calcófilos (por exemplo Ag, Pb, Bi, Te, S, Cu e Sb) e do ouro invisível. Concomitantemente, há a criação de espaços abertos na estrutura cristalina que com o deslocamento da pressão local reprecipita o ouro e os outros elementos como nano/microinclusões. Episódios de deformação rúptil após o principal estágio de mineralização estão associados com o fraturamento de cristais de piritas preexistentes que promovem locais de remobilização tardia de ouro nas fraturas, assim como a precipitação de nova geração de ouro introduzida por fluidos mineralizantes tardios (Ouyi *et al.* 2017, Mapka *et al.* 2024).

Segundo Ouyi *et al.* (2017), inclusões de ouro em cristais de piritas euédricos com nenhuma ou pouca deformação indicam que os dois minerais tiveram precipitação simultânea (Figuras

14A e B), enquanto o ouro preenchendo fraturas indica cristalização após a formação do mineral hospedeiro (Figuras 14E e F).

4.2 PERCEPÇÕES SOBRE O PROCESSO DE MINERALIZAÇÃO DO OURO

A mineralização do depósito São Jorge consiste em uma paragênese formada por pirita + calcopirita ± esfalerita e, raramente, galena, na qual ocorrem a duas gerações de ouro com composições distintas. Essa diferença pode estar relacionada: (1) aos processos de exsolução que redistribuíram o ouro nos sulfetos, gerando inclusões secundárias de ouro nativo e teluretos de Au + Ag, principalmente na pirita ou, alternativamente, em estágios de mais baixa temperatura a migração (por difusão em estado sólido) de ouro nativo com Ag ao longo das fraturas dos cristais de pirita (Boyle 1979); (2) a diferentes alterações hidrotermais que afetaram a área do depósito, nas quais o ouro gerado em condições de maior temperatura não foi dissolvido e nem retransportado, ou seja, preservou-se como inclusões na pirita, seguido de uma alteração tardia que introduziu fluido em baixa temperatura que proporcionou uma segunda entrada de ouro, favorecendo a deposição da Ag no ouro nativo (preenchendo as fraturas em pirita) e não nos sulfetos (cf. Palacios *et al.* 2001, Gas'kov 2017).

Segundo Mapka *et al.* (2024), a ocorrência de inclusões anédricas de barita próximo ao ouro pode indicar que a oxidação do fluido teve um papel importante na precipitação de ouro nos cristais de pirita (Figuras 10A e 14F). A importância da oxidação para a precipitação de ouro no depósito São Jorge é destacada por Borges (2010), porém associada a primeira geração de ouro, não a segunda como neste trabalho, já que foram observados cristais de barita preenchendo fraturas em pirita próximas as partículas de ouro (Figura 14F). Já Alfonso *et al.* (2023), em estudo de depósito de ouro relacionado a intrusões e rico em teluretos, sugerem que os teluretos de Au e Ag associados a teluretos de Bi ocorrem como bolhas na pirita em um processo que geralmente ocorre antes do fraturamento desta.

O depósito São Chico carece de estudos petrográficos e geoquímicos mais completos. Apesar disso, as seguintes observações foram inferidas a partir deste estudo: A mineralização do depósito São Chico consiste em uma paragênese formada por pirita + galena + esfalerita ± calcopirita, na qual o ouro ocorre como *electrum*, principalmente associado a galena e preenchendo fraturas na pirita.

Segundo Boyle (1979), o ouro que ocorre simultaneamente com a galena em uma sequência paragenética está relacionado a baixas temperaturas de formação. Apesar do ouro estar texturalmente associado a diversos minerais e apresentar ligeiras diferenças composicionais,

não foi possível estabelecer gerações distintas, o que pode significar que o ouro em diversas associações foi precipitado no mesmo contexto de processos de formação.

A textura globular a anédrica e a ocorrência de agregados de ouro e galena podem sugerir que o Au foi extraído do fluido hidrotermal por líquido metálico (*liquid metal*) representado pela galena como produto de sulfetação retrograda da liga de $\text{Pb} \pm \text{Au} - \text{Ag}$ (cf. Cave *et al.* 2019).

5 CONCLUSÕES

As principais conclusões decorrentes deste estudo são resumidas da seguinte forma:

1. Os resultados mostraram que há diferenças estatísticas significativas nas concentrações médias de Ag, Fe e Te entre o ouro dos depósitos São Jorge e São Chico, nos quais a análise de PCA identificou estes três elementos como os com maiores potenciais de discriminação entre as partículas de ouro dos dois depósitos.
2. O ouro do depósito São Jorge tem como principal mineral hospedeiro a pirita. A ocorrência de pelo menos dois tipos de pirita e de ouro, distinguidos segundo critérios texturais e microquímicos sugerem a possibilidade de ocorrência de pelo menos dois eventos de mineralização. Sendo que o primeiro consiste em ouro na forma de inclusões com altos teores de Au, e o segundo, ouro tardio preenchendo fraturas em pirita com uma composição mais rica em Ag.
3. O ouro do depósito São Chico tem como principal mineral hospedeiro a galena, ocorrendo na forma de *electrum*. As relações texturais entre a galena e o ouro sugerem que foram precipitados simultaneamente em temperaturas relativamente baixas. A coprecipitação de ouro com outros minerais pode gerar uma assinatura que é evidenciada na sua composição química, na qual o ouro coprecipitado com calcopirita apresenta maiores teores de Cu, Fe, Bi e Pb, enquanto o coprecipitado com esfalerita apresenta maiores teores de Zn. Em relação ao ouro sem associações minerais e o coprecipitado com galena, este último contém maiores teores de Pb.
4. A análise da composição do ouro por MEV-EDS se mostrou eficaz para a determinação da composição química do ouro, evidenciando que é possível distinguir o ouro em nível local e regional, apesar do alto limite de detecção desta técnica analítica.

Embora não tenha sido possível estabelecer uma assinatura geoquímica de ouro diagnóstica de cada depósito, esta pesquisa aprimorou a compreensão dos fatores que influenciam a incorporação de elementos menores e traços nas partículas de ouro e que levam a presença de diferentes gerações deste mineral em um único depósito. Além de demonstrar que técnicas analíticas não destrutivas e rápidas podem ser usadas para a determinação preliminar de uma assinatura geoquímica. Análises de microsonda eletrônica desses depósitos estão previstas e serão incorporadas na publicação de um artigo científico em revista da área.

REFERÊNCIAS

- Alfonso P., Ccolque E., Garcia-Valles M., Martínez A., Yubero M.T., Anticoi H., Sidki-Rius N. 2023. Mineralogy and mineral chemistry of the Au-Ag-Te-(Bi-Se) San Luis Alta Deposit, Mid-South Peru. *Mineral*, **13**(4). <https://doi.org/10.3390/min13040568>.
- ANM. 2023. *Anuário mineral brasileiro: principais substâncias metálicas*. Brasília, DF, Agência Nacional de Mineração: ANM, [Recurso eletrônico: PDF].
- Barbieri C.B. & Geiser G.C. 2021. Perícia ambiental. In: Velho J. A., Geiser G.C., Espindula A. (org.). *Ciências forenses: uma introdução às principais áreas da criminalística moderna*. 4 ed. Campinas, Millennium Editora, p. 303 - 330. (Criminalística premium, 1).
- Borges A.W.G. 2010. *Geologia e metalogênese do depósito aurífero São Jorge, Província Tapajós, Novo Progresso – PA*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 94 p.
- Borges R.M.K., Dall’Agnol R., Lamarão C.N., Figueiredo M.A.B.M., Leite A.A.S., Barros C.E.M., Costi H.T. 2009. Petrografia, química mineral e processos hidrotermais associados ao depósito de ouro São Jorge, Província Aurífera do Tapajós, Cráton Amazônico. *Revista Brasileira de Geociências*, **39**(2): 375-393. <http://dx.doi.org/10.25249/0375-7536.2009392375393>.
- Boyle R.W. 1979. *The geochemistry of gold and its deposits*. Disponível em: <https://publications.gc.ca/site/eng/9.817728/publication.html>.
- Castro C.C, Lima A.E., Gonçalves C.C. 2025. Chemical and morphological characterization of alluvial gold tracer for provenance and regional exploration: A study case from the Varginha Stream watershed, southwest of the Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **164**. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105656>.
- Cave B.J., Barnes S., Pitcain I.K., Sack P.J., Kuikka H., Johnson S.C., Duran C.J. 2019. Multi-stage precipitation and redistribution of gold, and its collection by lead-bismuth and lead immiscible liquids in a reduced-intrusion related gold system (RIRGS); Dublin Gulch, western Canada. *Ore Geology Reviews*, **106**: 28-55. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.01.010>
- Chapman R., Mortensen J.K., Murphy R. 2023. Compositional signatures of gold from different deposit types in British Columbia, Canada. *Mineral*. **13**(8). <https://doi.org/10.3390/min13081072>.
- Cook N.J. & Chryssoulis S.L. 1990. Concentration of “invisible gold” in the common sulfides. *The Canadian Mineralogist*, **28**(1): 1-16.
- Corrêa Lima R., Vasquez M.L., Paiva I.S. 2023. Aspectos metalogenéticos do depósito aurífero São Chico, Província Mineral Tapajós, Pará: informações com base em petrografia, MEV e inclusões fluidas dos veios Principal e Júlia. In: SBG, 17º Simpósio de Geologia da Amazônia, Santarém. *Anais*. p. 610 – 614.
- Corrêa Lima R., Vasquez M.L., Pinheiro F.G.R. 2017. Fluidos hidrotermais associados aos veios de quartzo auríferos da mina do São Chico, Província Tapajós, Pará: informações preliminares com base em inclusões fluidas. In: SBG, 15º Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém. *Anais*. p. 729 – 732.

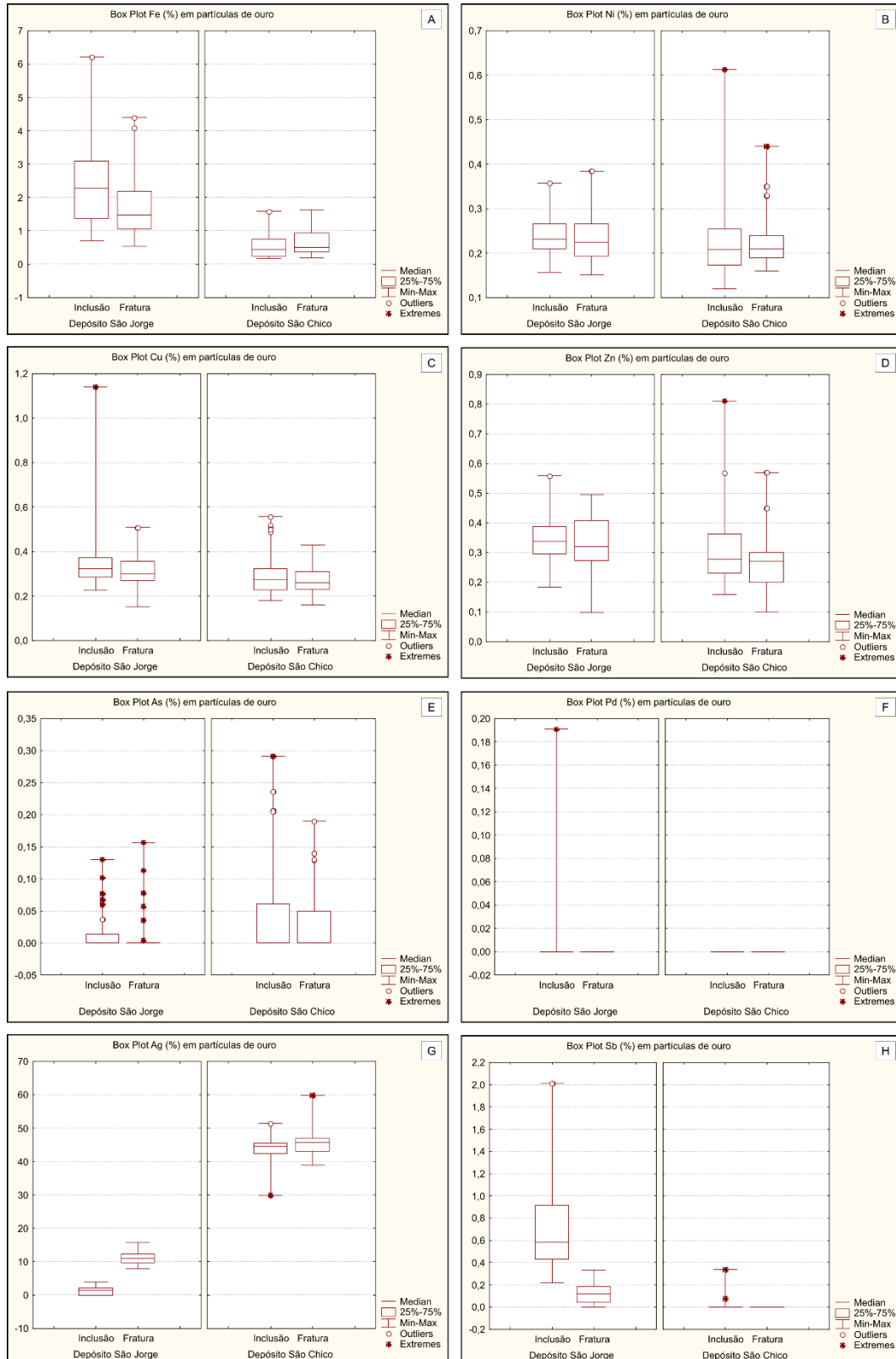
- Çubukçu H.E., Ersoy O., Aydar E., Çakir U. 2008. WDS versus silicon drift detector EDS: A case report for the comparison of quantitative chemical analysis of natural silicate minerals. *Micron*, **39**(2): 88-94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.micron.2006.11.004>.
- Dixon R.D. & Merkle R.K.W. 2019. Identifying the source of illicit gold from South America. *Forensic Soil Science and Geology*, **492**. <https://doi.org/10.1144/SP492-2018-15>.
- Dixon R.D. & Schouwstra R. 2017. The role of forensic geology in the illicit precious metals trade. *Episodes*, **40**(2): 132 – 140. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2017/v40i2/017015>.
- Departamento Nacional de Produção Mineral-DNPM. 2004. *Distritos mineiros do estado do Pará*. Belém, CPRM/DNPM: Programa Nacional de Distritos Mineiros. Recurso Eletrônico: PDF
- Enzweiler J. & Duarte M.A.I. 2007. Geoquímica Analítica. In: Licht O. A. B., Mello C.S.B., Silva C.R. (edit.). *Prospecção geoquímica: depósitos minerais metálicos, não-metálicos, óleo e gás*. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Geoquímica, CPRM, p. 253 – 278.
- Fabricio-Silva W., Schutesky M.E., Lima E.A.M., Joko C.T., Mendes T.A.A. 2025. Forensic geology and traceability: a case study from the Yanomami Indigenous Land. *Journal of the Geological Society*, **182**. <https://doi.org/10.1144/jgs2024-227>.
- Fontboté L., Kouzmanov K., Chiaradia M., Pokrovski G.S. 2017. Sulfide minerals in hydrothermal deposits. *Elements*, **13**(2): 97-103. <https://doi.org/10.2113/gselements.13.2.97>.
- Frenzel M. 2023. Making sense of mineral trace-element data – How to avoid common pitfalls in statistical analysis and interpretation. *Ore Geology Reviews*, **159**. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105566>.
- Gas'kov I.V. 2017. Major impurity elements in native gold and their association with gold mineralization settings in deposits of Asian folded areas. *Russian Geology and Geophysics*, **58**(9): 1080-1092. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.08.004>.
- George L.L., Cook N.J., Ciobanu C.L. 2016. Partitioning of trace elements in co-crystallized sphalerite-galena-chalcopyrite hydrothermal ores. *Ore Geology Reviews*, **77**: 97-116. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.02.009>.
- Greenacre M., Groenen P.J.F., Hastie T., Iodice d'Enza A., Markos A., Tuzhilina E. 2022. Principal component analysis. *Nature Reviews Methods Primers*, **2**. <https://doi.org/10.1038/s43586-022-00184-w>.
- Gomes C.B. 2015. *A microsonda eletrônica na geologia*. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo. 248 p. (Coleção Acadêmica, 84).
- Jost H., Frantz J.C., Lindenmayer Z.G. 2007. Assinatura geoquímica de depósitos minerais metálicos e não metálicos. In: Licht O.A.B., Mello C.S.B., Silva C.R. (edit.). *Prospecção geoquímica: depósitos minerais metálicos, não-metálicos, óleo e gás*. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Geoquímica, CPRM, p. 153 – 172.
- Juliani C., Vasquez M.L., Klein E.L., Villas R.N.N., Misas C.M.E., Santiago E.S.B., Monteiro L.V.S., Carneiro C.C., Fernandes C.M.D., Usero G. 2014. Metalogênese da Província Tapajós. In: Silva M.G., Neto M.B.R., Jost H., Kuyumjian R.M. (org.). *Metalogênese das províncias tectônicas Brasileiras*. Belo Horizonte, CPRM, p. 229 – 268.

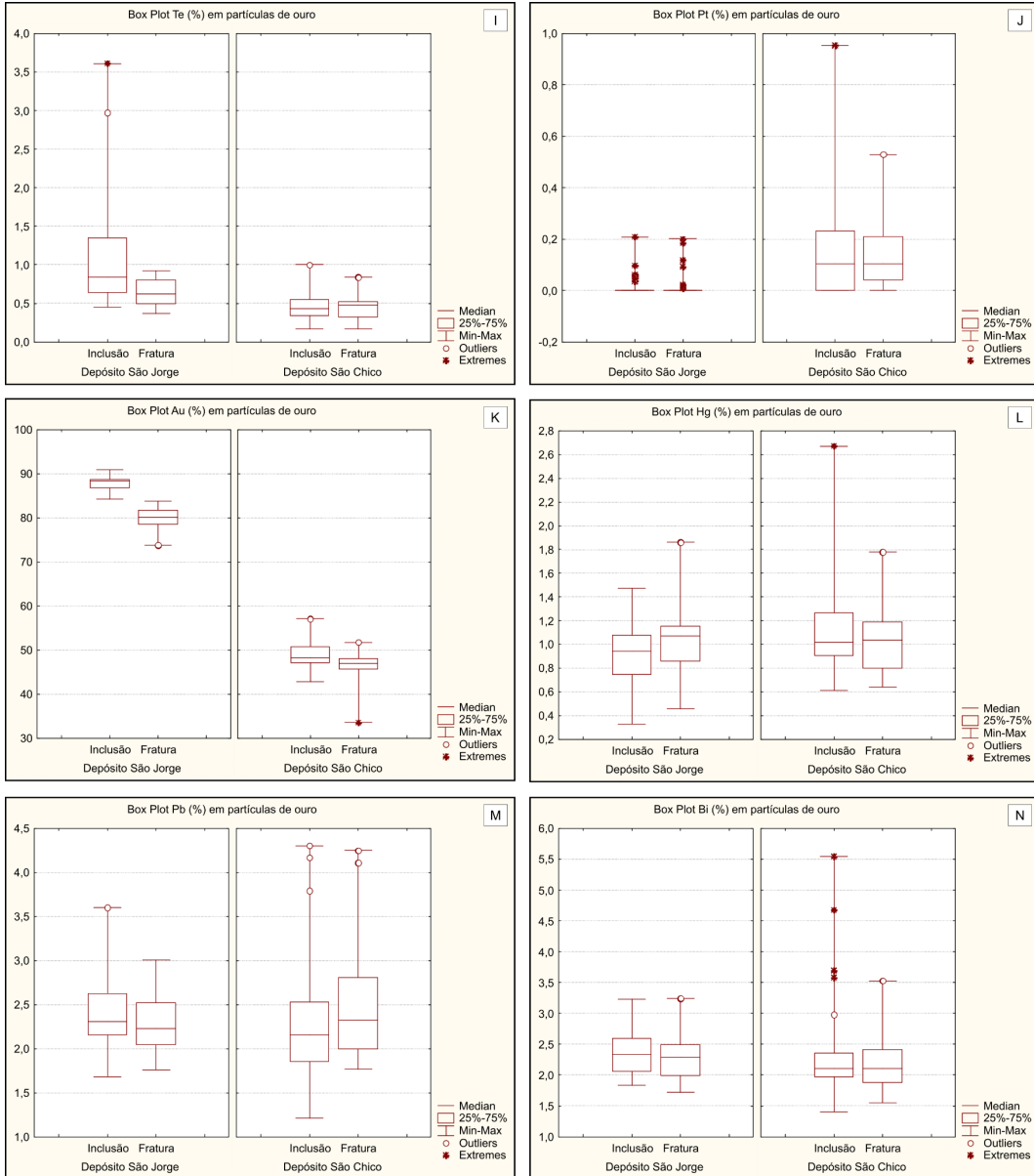
- Ketchaya Y.B., Dong G., Santosh M., Lemdjou Y.B. 2022. Microchemical signatures of placer gold grains from the Gamba district, Northern Cameroon: implications for possible bedrock sources. *Ore Geology Reviews*, **141** e 104640.
- Klein C. & Dutrow B. 2012. *Manual de ciências dos minerais*. 23 ed. Porto Alegre, Bookman, 716 p.
- Klein E.L. & Vasquez M.L. 2000. *Geologia e recursos minerais da Folha Vila Riozinho SB.21-Z-A, Estado do Pará, escala 1:250.000*. Brasília: CPRM, 1 CD-ROM. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGB). Projeto Especial Província Mineral do Tapajós (Promin Tapajós).
- Lamarão C.N., Dall'Agnol R., Lafon J., Lima E.F. 2002. Geology, geochemistry, and Pb-Pb zircon geochronology of the Paleoproterozoic magmatismo of Vila Riozinho, Tapajós Gold Province, Amazonian craton, Brazil. *Precambrian Research*, **119**: 189 -223.
- Lamarão C.N., Souza K.S., Dall'Agnol R., Galarza M.A. 2008. Granitos pórfiros da região de vila Riozinho, província aurífera do Tapajós: petrografia e geocronologia. *Revista Brasileira de Geociências*, **38**(3): 533-543.
- Lavrent'ev Y.G., Korolyuk V.N., Usova L.V., Nigmatulina E.N. 2015. Electron probe microanalysis of rock-forming minerals with a JXA-8100 electron probe microanalyzer. *Russian Geology and Geophysics*, **56**(10):1428-1436. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.09.005>.
- Liu H. & Beaudoin G. 2021. Geochemical signatures in native gold derived from Au-bearing ore deposits. *Ore Geology Reviews*, **132**. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104066>.
- Liu H., Beaudoin G., Makvandi S., Jackson S.E., Huang X. 2021. Multivariate statistical analysis of trace element compositions of native gold from orogenic gold deposits: Implication for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, **131**. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104061>.
- Mapka Y.W., Von der Heyden B.P., Glynn S., Hurst G., Lawrence D., Bampata T., Mwandale E. 2024. Multistage evolution of gold mineralization in the Kibali gold district: Insights from pyrite analyses. *Journal of African Earth Sciences*, **214**. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2024.105244>.
- Morrison G.W., Rose W.J., Jaireth S. 1991. Geological and geochemical controls on the silver content (fineness) of gold in gold-silver deposits. *Ore Geology Reviews*, **6**(4): 333-364. [https://doi.org/10.1016/0169-1368\(91\)90009-V](https://doi.org/10.1016/0169-1368(91)90009-V).
- Ouiya P., Béziat D., Salvi S., Velásquez G., Naba S., Proietti A. 2025. Gold in pyrite revisited: insights into remobilization during deformation using electron backscatter diffraction and LA-ICP-MS. *Mineralium Deposita*. <https://doi.org/10.1007/s00126-024-01346-4>.
- Palacios C., Hérial G., Townley B., Maksaev V., Sepúlveda F., Parseval P., Rivas P., Lahsen A., Parada M.A. 2001. The composition of gold in the Cerro Casale gold-rich porphyry deposit, Maricunga belt, northern Chile. *The Canadian Mineralogist*, **39**: 907-915.
- Pochon A., Desaulty A., Bailly L., Lach P. 2021. Challenging the traceability of natural gold by combining geochemical methods: French Guiana example. *Applied Geochemistry*, **129**. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.104952>.
- Reed S.J.B. 2005. *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*. Cambridge, Cambridge University Press, 232 p. (Second edition).

- Rizzotto G.J. (org.). 2022. *Províncias e distritos auríferos do Brasil*. Goiânia, CPRM, 1 Recurso eletrônico: PDF. (Informe de recursos minerais. Série Ouro: Informes Gerais; 18).
- Roberts R.J., Dixon R.D., Merkle R.K.W. 2016. Distinguishing between legally and illegally produced gold in South Africa. *Journal of Forensic Sciences*, **61**(1): 230-236. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.12886>.
- Rodriguez P. & Soares L.M. 2021. *São Jorge Gold Project, Pará State, Brazil*. Independent Technical Report on Mineral Resources. Belo Horizonte, GoldMining Inc. (GMI).
- Santos J.O.S., Hartmann L.A., Gaudette H.E., Groves D.I., Almeida M.E., McNaughton N.J., Fletcher I.R. 2000. A new understanding of the provinces of the Amazon Craton based on integration of field mapping and U-Pb and Sm-Nd geochronology. *Gondwana Research*, **3**(4): 453-488. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70755-3](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70755-3).
- Semblano F.R.D., Macambira M.J.B., Vasquez M.L. 2016. Petrography, geochemistry and Sm-Nd isotopes of the granites from eastern of the Tapajós Domain, Pará state. *Brazilian Journal of Geology*, **46**(4): 509-529. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620160059>.
- Sotero A.M., Lamarão C.N., Marques G.T., Rodrigues P.R.S. 2015. Quartzo magmático e hidrotermal do depósito de ouro São Jorge, Província Aurífera do Tapajós, Pará: petrografia, microscopia eletrônica de varredura-catodoluminescência e implicações metalogenéticas. *Brazilian Journal of Geology*, **45**(4): 591-607. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201520150011>.
- Vasquez M.L. 2008. Compartimentação tectônica. In: Vasquez M. L. & Rosa-Costa L. T. (org.). *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*. Escala 1:1.000.000. Belém, CPRM, p. 39 -112.
- Vasquez M.L., Chaves C.L., Moura E.L., Oliveira J.K.M., 2017. *Geologia e recursos minerais das folhas São Domingos – SB.21-Z-A-II e Jardim do Ouro – SB.21-Z-A-III*, escala: 1:100.000, Belém, SGB-CPRM. Relatório Técnico. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/17997>.
- Vasquez M.L., Gaia S.M.S., Chaves C.L., Silva C.M.G. (org.). 2024. *Área de relevante interesse mineral (ARIM): evolução crustal e metalogenia da Província Mineral do Tapajós*. Belém, SBG. Informes de Recursos Minerais. 334 p. (Série Províncias Minerais do Brasil, 39).
- Vishiti A., Suh C.E., Lehmann B., Shemang E.M., Ngome N.L.J., Nshanji N.J., Chinjo F.E., Mongwe O.Y., Egbe A.J., Petersen S. 2017. Mineral chemistry, bulk rock geochemistry, and S-isotope signature of lode-gold mineralization in the Bétaré Oya gold district, southe-east Cameroon. *Geological Journal*, **53**(6): 2569-2596. <https://doi.org/10.1002/gj.3093>.
- Watling R.J., Hebert H.K., Delev D., Abell I.D. 1994. Gold fingerprinting by laser ablation inductive coupled plasma mass spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, **49**(2): 205-219. [https://doi.org/10.1016/0584-8547\(94\)80019-7](https://doi.org/10.1016/0584-8547(94)80019-7).

APÊNDICE A

Diagramas Box Plot para os quatorze elementos considerados nas análises estatísticas das partículas de ouro (depósitos São Jorge e São Chico), valores em porcentagem. (A) Fe; (B) Ni; (C) Cu; (D) Zn; (E) As; (F) Pd; (G) Ag; (H) Sb; (I) Te; (J) Pt; (K) Au; (L) Hg; (M) Pb; (N) Bi.





APÊNDICE B

Tabela da média, desvio padrão e valores mínimos e máximos das concentrações de elementos (%) em partículas de ouro, segundo sua associação com outros minerais no depósito São Chico, analisadas por MEV-EDS.

Associação	Depósito São Chico					
	Ouro (i) Au + Gn N = 15		Ouro (ii) Au + Sp N = 4		Ouro (iii) Au + Ccp N = 3	
	<i>Média</i>	<i>Mín. - Máx.</i>	<i>Média</i>	<i>Mín. - Máx.</i>	<i>Média</i>	<i>Mín. - Máx.</i>
S	Bdl.	Bdl. – Bdl.	Bdl.	Bdl. – Bdl.	Bdl.	Bdl. – Bdl.
Fe	0,61 ± 0,35	0,21 – 1,28	0,42 ± 0,28	0,23 – 0,83	0,78 ± 0,08	0,72 – 0,86
Ni	0,21 ± 0,03	0,16 – 0,27	0,22 ± 0,03	0,18 – 0,26	0,31 ± 0,11	0,20 – 0,43
Cu	0,26 ± 0,06	0,16 – 0,39	0,27 ± 0,03	0,24 – 0,32	0,44 ± 0,14	0,28 – 0,53
Zn	0,25 ± 0,06	0,14 – 0,34	0,42 ± 0,14	0,29 – 0,62	0,36 ± 0,04	0,34 – 0,41
As	Bdl.	Bdl. – 0,19	Bdl.	Bdl. – Bdl.	Bdl.	Bdl. – Bdl.
Pd	Bdl.	Bdl. – Bdl.	Bdl.	Bdl. – Bdl.	Bdl.	Bdl. – Bdl.
Ag	45,20 ± 2,53	40,73 – 48,30	42,79 ± 0,99	41,82 – 44,12	40,17 ± 8,92	29,87 – 45,45
Sb	Bdl.	Bdl. – Bdl.	Bdl.	Bdl. – Bdl.	Bdl.	Bdl. – 0,23
Te	0,43 ± 0,08	0,29 – 0,55	0,53 ± 0,14	0,39 – 0,72	0,41 ± 0,07	0,37 – 0,50
Pt	0,13 ± 0,10	Bdl. – 0,35	0,16 ± 0,23	Bdl. – 0,51	0,16 ± 0,12	Bdl. – 0,30
Au	47,28 ± 2,01	45,24 – 51,65	49,42 ± 2,06	46,52 – 51,39	49,28 ± 6,64	43,42 – 56,49
Hg	1,02 ± 0,23	0,70 – 1,32	1,16 ± 0,28	0,80 – 1,48	1,14 ± 0,50	0,64 – 1,62
Pb	2,45 ± 0,51	1,77 – 3,35	2,37 ± 0,31	2,00 – 2,65	3,18 ± 1,37	1,61 – 4,10
Bi	2,11 ± 0,33	1,73 – 2,78	2,18 ± 0,18	2,00 – 2,42	3,60 ± 1,29	2,52 – 5,03

Bdl.: valores abaixo do limite de detecção. Limite de detecção: 0,1%. Os valores numéricos estão representados com duas casas decimais para uma melhor visualização dos dados e não devem ser interpretados para fins de precisão. Au: ouro; Gn: galena; Sp: esfalerita; Ccp: calcopirita; N: número de partículas analisadas.

Associação	Depósito São Chico					
	Ouro (iv) Au + Gn + Sp N = 3		Ouro (v) Au + Gn + Sp + Ccp N = 2		Ouro (vi) Au N = 34	
	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>
S	Bdl.	Bdl. - Bdl.	Bdl.	Bdl. - Bdl.	Bdl.	Bdl. - Bdl.
Fe	0,53 ± 0,45	0,26 - 1,05	0,32 ± 0,05	0,28 - 0,35	0,57 ± 0,29	0,17 - 1,26
Ni	0,27 ± 0,14	0,18 - 0,44	0,22 ± 0,01	0,21 - 0,22	0,21 ± 0,05	0,12 - 0,31
Cu	0,28 ± 0,09	0,22 - 0,38	0,25 ± 0,00	0,25 - 0,25	0,28 ± 0,06	0,18 - 0,40
Zn	0,24 ± 0,08	0,19 - 0,33	0,34 ± 0,11	0,25 - 0,42	0,28 ± 0,08	0,16 - 0,52
As	Bdl.	Bdl. - Bdl.	Bdl.	Bdl. - Bdl.	Bdl.	Bdl. - 0,21
Pd	Bdl.	Bdl. - Bdl.	Bdl.	Bdl. - Bdl.	Bdl.	Bdl. - Bdl.
Ag	47,81 ± 7,22	41,22 - 55,52	46,08 ± 0,60	45,65 - 46,50	44,73 ± 1,92	40,16 - 48,66
Sb	Bdl.	Bdl. - Bdl.	Bdl.	Bdl. - Bdl.	Bdl.	Bdl. - Bdl.
Te	0,51 ± 0,11	0,38 - 0,58	0,51 ± 0,18	0,39 - 0,64	0,44 ± 0,16	0,17 - 0,84
Pt	0,18 ± 0,10	0,11 - 0,29	Bdl.	Bdl. - 0,17	0,13 ± 0,13	Bdl. - 0,44
Au	44,27 ± 5,48	37,95 - 47,71	47,05 ± 0,69	46,57 - 47,54	48,01 ± 1,77	44,88 - 51,28
Hg	1,00 ± 0,27	0,70 - 1,29	0,90 ± 0,00	0,90 - 0,90	1,01 ± 0,25	0,61 - 1,76
Pb	2,77 ± 1,01	2,06 - 3,93	2,26 ± 0,18	2,13 - 2,39	2,22 ± 0,45	1,43 - 3,29
Bi	2,10 ± 0,57	1,55 - 2,69	1,97 ± 0,00	1,96 - 1,97	2,11 ± 0,31	1,40 - 2,86

Bdl.: valores abaixo do limite de detecção. Limite de detecção: 0,1%. Os valores numéricos estão representados com duas casas decimais para uma melhor visualização dos dados e não devem ser interpretados para fins de precisão. Au: ouro; Gn: galena; Sp: esfalerita; Ccp: calcopirita; N: número de partículas analisadas.

APÊNDICE C

Tabela da média, desvio padrão e valores mínimos e máximos das concentrações de elementos (%) em cristais de pirita do depósito São Jorge analisados por MEV-EDS.

	<i>Pirita</i>					
	Py 1 N: 36		Py 2 N: 17		Py 3 N: 10	
	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>
S	54,81 ± 0,31	53,81 – 55,35	54,67 ± 0,58	52,57 – 55,21	54,97 ± 0,24	54,64 – 55,28
Fe	37,91 ± 0,30	37,24 – 38,54	37,94 ± 0,71	35,43 – 38,56	37,88 ± 0,18	37,70 – 38,16
Ni	0,14 ± 0,04	Bdl. – 0,24	0,14 ± 0,03	Bdl. – 0,21	0,14 ± 0,03	0,11 – 0,20
Cu	0,18 ± 0,04	0,11 – 0,28	0,24 ± 0,15	0,11 – 0,74	0,18 ± 0,01	0,14 – 0,20
Zn	0,21 ± 0,04	0,10 – 0,28	0,22 ± 0,04	0,16 – 0,33	0,22 ± 0,03	0,16 – 0,26
As	Bdl.	Bdl. – 0,23	Bdl.	Bdl. – 0,27	Bdl.	Bdl. – 0,15
Pd	0,16 ± 0,04	Bdl. – 0,26	0,14 ± 0,04	Bdl. – 0,20	0,14 ± 0,03	Bdl. – 0,20
Ag	Bdl.	Bdl. – 0,16	Bdl.	Bdl.	Bdl.	Bdl.
Sb	0,31 ± 0,07	0,14 – 0,47	0,31 ± 0,07	0,19 – 0,43	0,28 ± 0,06	0,23 – 0,43
Te	0,38 ± 0,08	0,26 – 0,61	0,37 ± 0,07	0,28 – 0,52	0,38 ± 0,04	0,34 – 0,45
Pt	1,05 ± 0,14	0,81 – 1,31	1,05 ± 0,21	0,73 – 1,43	1,06 ± 0,13	0,85 – 1,22
Au	1,13 ± 0,19	0,75 – 1,61	1,10 ± 0,17	0,81 – 1,36	1,15 ± 0,13	0,95 – 1,35
Hg	1,20 ± 0,21	0,72 – 1,59	1,22 ± 0,14	1,01 – 1,52	1,17 ± 0,18	0,89 – 1,43
Pb	1,27 ± 0,27	0,79 – 1,97	1,20 ± 0,35	0,51 – 2,34	1,14 ± 0,18	0,85 – 1,35
Bi	1,14 ± 0,29	0,60 – 1,87	1,31 ± 0,60	0,70 – 3,45	1,19 ± 0,24	0,84 – 1,51

Bdl.: valores abaixo do limite de detecção. Limite de detecção: 0,1%. Os valores numéricos estão representados com duas casas decimais para uma melhor visualização dos dados e não devem ser interpretados para fins de precisão. Py 1: cristais de pirita não associados ao ouro; Py 2: cristais de pirita com ouro preenchendo fraturas; Py 3: cristais de pirita com ouro ocorrendo como inclusões. N: número de cristais analisados.

APÊNDICE D

Matrizes de correlação dos elementos maiores, menores e traços em cristais de pirita do depósito São Jorge.

		S	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Pd	Ag	Sb	Te	Pt	Au	Hg	Pb	Bi
Py 1 N: 36	S	1,00														
	Fe	-0,26	1,00													
	Ni	-0,05	-0,15	1,00												
	Cu	-0,19	-0,03	0,01	1,00											
	Zn	-0,03	0,06	-0,10	0,16	1,00										
	As	0,04	0,47	-0,17	-0,05	-0,03	1,00									
	Pd	-0,19	-0,11	0,06	-0,30	-0,14	0,03	1,00								
	Ag	0,05	0,05	0,03	-0,18	-0,18	0,00	-0,14	1,00							
	Sb	-0,21	-0,05	0,20	-0,06	0,15	-0,08	0,14	-0,30	1,00						
	Te	-0,25	-0,22	0,26	0,19	-0,25	-0,07	0,12	-0,09	-0,19	1,00					
	Pt	0,08	0,04	-0,34	-0,38	-0,11	0,31	0,11	0,20	-0,14	-0,07	1,00				
	Au	-0,19	-0,30	0,33	-0,25	-0,15	-0,55	0,08	-0,09	0,39	0,01	-0,28	1,00			
	Hg	-0,14	0,05	0,26	0,17	-0,01	0,10	-0,01	0,31	-0,26	0,27	-0,18	-0,25	1,00		
	Pb	-0,25	-0,44	-0,36	0,01	-0,13	-0,34	0,09	-0,16	0,09	-0,01	0,22	0,30	-0,29	1,00	
Bi	-0,22	-0,22	0,11	0,33	0,17	-0,24	0,01	-0,18	0,00	0,10	-0,44	-0,06	-0,22	-0,18	1,00	
		S	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Pd	Ag	Sb	Te	Pt	Au	Hg	Pb	Bi
Py 2 N: 17	S	1,00														
	Fe	0,83	1,00													
	Ni	-0,23	-0,01	1,00												
	Cu	-0,83	-0,82	0,20	1,00											
	Zn	0,41	0,36	-0,11	-0,42	1,00										
	As	-0,52	-0,61	-0,09	0,61	-0,38	1,00									
	Pd	0,09	0,34	-0,25	-0,18	0,08	0,06	1,00								
	Ag	-0,06	-0,02	-0,03	0,22	0,11	0,08	0,15	1,00							
	Sb	-0,02	0,09	-0,03	-0,10	0,04	0,29	0,01	-0,37	1,00						
	Te	0,20	-0,10	-0,19	-0,08	-0,24	0,04	0,14	0,26	-0,44	1,00					
	Pt	-0,26	-0,32	0,06	0,49	-0,27	0,23	0,01	0,10	0,07	-0,05	1,00				
	Au	-0,28	-0,39	-0,01	0,19	-0,26	0,52	-0,34	0,06	0,01	0,08	-0,48	1,00			
	Hg	-0,54	-0,59	0,36	0,44	0,23	-0,02	-0,43	-0,01	-0,13	-0,15	0,11	-0,03	1,00		
	Pb	-0,76	-0,89	-0,01	0,72	-0,38	0,28	-0,39	-0,08	-0,19	0,06	0,30	0,25	0,50	1,00	
Bi	-0,95	-0,85	0,09	0,73	-0,38	0,53	-0,10	-0,01	-0,04	-0,12	0,08	0,38	0,57	0,73	1,00	
		S	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Pd	Ag	Sb	Te	Pt	Au	Hg	Pb	Bi
Py 3 N: 10	S	1,00														
	Fe	0,15	1,00													
	Ni	0,00	-0,77	1,00												
	Cu	0,17	-0,01	-0,02	1,00											
	Zn	0,10	0,24	0,11	-0,34	1,00										
	As	-0,05	-0,35	0,60	0,48	0,15	1,00									
	Pd	-0,30	-0,06	-0,07	-0,55	-0,15	-0,53	1,00								
	Ag	0,15	-0,04	0,03	0,05	-0,05	-0,02	-0,24	1,00							
	Sb	-0,47	-0,22	0,50	0,18	-0,11	0,66	0,11	-0,02	1,00						
	Te	0,44	-0,02	0,14	-0,01	0,10	-0,12	-0,23	0,13	-0,41	1,00					
	Pt	0,09	-0,13	0,21	0,13	-0,51	0,34	0,03	-0,46	0,41	-0,10	1,00				
	Au	-0,33	0,03	-0,25	-0,34	-0,02	-0,69	0,62	0,29	-0,20	-0,22	-0,66	1,00			
	Hg	-0,35	-0,72	0,52	0,26	0,06	0,38	-0,16	-0,26	0,11	-0,11	-0,16	0,01	1,00		
	Pb	0,09	0,15	-0,45	-0,47	-0,30	-0,79	0,59	0,03	-0,41	-0,35	-0,05	0,59	-0,37	1,00	
Bi	-0,70	-0,21	0,16	0,01	0,09	0,42	-0,26	0,05	0,35	0,06	-0,07	-0,20	0,36	-0,62	1,00	

Os valores numéricos correspondem ao r. Os valores em negrito correspondem às correlações mais significativas dentre o espaço amostral, levando em consideração $p < 0,05$. Py 1: cristais de pirita não associados ao ouro; Py 2: cristais de pirita com ouro preenchendo fraturas; Py 3: cristais de pirita com ouro ocorrendo como inclusões. N: número de cristais analisados.

APÊNDICE E

Tabela da média, desvio padrão e valores mínimos e máximos das concentrações de elementos (%) em cristais de calcopirita do depósito São Jorge analisados por MEV-EDS.

	<i>Calcopirita</i>			
	Ccp 1 N: 16		Ccp 2 N: 4	
	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>
S	37,43 ± 0,37	36,68 – 38,16	37,57 ± 0,30	37,29 – 37,99
Fe	26,24 ± 0,31	25,65 – 26,74	28,79 ± 4,46	26,21 – 35,47
Ni	0,12 ± 0,03	Bdl. – 0,17	0,13 ± 0,02	0,12 – 0,17
Cu	28,28 ± 0,34	27,57 – 28,81	25,94 ± 4,61	19,04 – 28,58
Zn	0,15 ± 0,03	0,11 – 0,23	0,14 ± 0,03	0,11 – 0,17
As	Bdl.	Bdl. – 0,17	0,15 ± 0,15	Bdl. – 0,38
Pd	0,17 ± 0,07	Bdl. – 0,33	0,17 ± 0,06	Bdl. – 0,23
Ag	0,11 ± 0,06	Bdl. – 0,23	Bdl.	Bdl. – 0,10
Sb	0,34 ± 0,09	0,18 – 0,49	0,35 ± 0,07	0,26 – 0,43
Te	0,55 ± 0,20	0,29 – 1,10	0,40 ± 0,06	0,35 – 0,48
Pt	1,12 ± 0,17	0,08 – 1,42	1,19 ± 0,19	0,91 – 1,35
Au	1,16 ± 0,19	0,90 – 1,52	1,15 ± 0,15	0,96 – 1,32
Hg	1,40 ± 0,20	1,10 – 1,67	1,30 ± 0,26	1,05 – 1,62
Pb	1,32 ± 0,31	0,93 – 2,08	1,20 ± 0,43	0,61 – 1,62
Bi	1,55 ± 0,40	1,04 – 2,46	1,46 ± 0,40	0,90 – 1,85

Bdl.: valores abaixo do limite de detecção. Limite de detecção: 0,1%. Os valores numéricos estão representados com duas casas decimais para uma melhor visualização dos dados e não devem ser interpretados para fins de precisão. Ccp 1: cristais de calcopirita ocorrendo de forma livre; Ccp 2: cristais de calcopirita ocorrendo como inclusão em pirita. N: número de cristais analisados.

APÊNDICE F

Matrizes de correlação dos elementos maiores, menores e traços em cristais de calcopirita do depósito São Jorge.

	S	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Pd	Ag	Sb	Te	Pt	Au	Hg	Pb	Bi
Ccp 1 N: 16	S	1,00													
	Fe	0,02	1,00												
	Ni	-0,09	0,13	1,00											
	Cu	-0,31	0,42	-0,02	1,00										
	Zn	-0,07	-0,15	0,39	-0,34	1,00									
	As	0,10	0,06	0,45	0,00	0,26	1,00								
	Pd	0,26	-0,13	0,41	-0,31	0,61	0,44	1,00							
	Ag	-0,18	0,12	-0,47	0,35	-0,62	-0,45	-0,75	1,00						
	Sb	0,19	-0,45	0,43	-0,33	0,13	0,28	0,11	-0,07	1,00					
	Te	0,22	-0,43	-0,06	-0,52	-0,05	0,02	0,08	-0,14	0,44	1,00				
	Pt	-0,10	-0,25	0,09	-0,13	-0,01	-0,02	-0,10	-0,02	-0,13	0,30	1,00			
	Au	0,45	-0,05	-0,62	0,07	-0,38	-0,30	-0,05	0,21	-0,36	-0,07	-0,10	1,00		
	Hg	-0,52	-0,29	0,15	0,01	0,29	-0,21	-0,17	0,25	0,41	-0,04	-0,35	-0,39	1,00	
	Pb	-0,07	-0,46	0,23	-0,44	0,33	0,22	0,48	-0,53	0,36	0,11	-0,12	-0,37	0,04	1,00
Bi	-0,71	-0,19	-0,24	-0,14	0,08	-0,34	-0,37	0,19	-0,38	-0,19	0,19	-0,16	0,41	-0,01	1,00
Ccp 2 N: 4	S	1,00													
	Fe	0,92	1,0												
	Ni	-0,44	-0,2	1,00											
	Cu	-0,92	-1,0	0,15	1,0										
	Zn	0,46	0,6	-0,23	-0,7	1,00									
	As	0,86	1,0	-0,12	-1,0	0,76	1,00								
	Pd	-0,63	-0,7	0,43	0,7	-0,97	-0,82	1,00							
	Ag	0,05	0,2	-0,37	-0,2	0,85	0,32	-0,79	1,00						
	Sb	0,21	0,0	-0,89	0,0	0,47	0,09	-0,58	0,72	1,00					
	Te	-0,33	-0,6	-0,18	0,6	-0,91	-0,76	0,81	-0,68	-0,08	1,00				
	Pt	0,50	0,1	-0,94	-0,1	-0,03	0,06	-0,21	0,04	0,70	0,41	1,00			
	Au	-0,45	-0,1	0,68	0,1	0,41	0,07	-0,17	0,43	-0,29	-0,67	-0,88	1,00		
	Hg	-0,77	-0,5	0,68	0,5	0,09	-0,33	0,16	0,29	-0,30	-0,33	-0,85	0,92	1,00	
	Pb	-0,76	-0,9	-0,22	0,9	-0,48	-0,91	0,51	0,05	0,34	0,63	0,18	-0,12	0,26	1,00
Bi	0,58	0,7	0,44	-0,7	0,02	0,61	-0,05	-0,50	-0,68	-0,26	-0,25	-0,03	-0,28	-0,88	1,00

Os valores numéricos correspondem ao r. Os valores em negrito correspondem às correlações mais significativas dentre o espaço amostral, levando em consideração $p < 0,05$. Ccp 1: cristais de calcopirita ocorrendo de forma livre; Ccp 2: cristais de calcopirita ocorrendo como inclusão em pirita. N: número de cristais analisados.

APÊNDICE G

Tabela da média, desvio padrão e valores mínimos e máximos das concentrações de elementos (%) em cristais de esfalerita do depósito São Jorge analisados por MEV-EDS.

	<i>Esfalerita</i>			
	Sp 1 N: 7		Sp 2 N: 5	
	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>
S	35,23 ± 0,31	34,65 – 35,59	35,48 ± 0,30	35,15 – 35,97
Fe	0,38 ± 0,12	0,22 – 0,57	0,60 ± 0,39	0,29 – 1,23
Ni	0,16 ± 0,04	0,13 – 0,25	0,13 ± 0,01	0,11 – 0,14
Cu	0,30 ± 0,14	0,16 – 0,52	0,54 ± 0,45	0,18 – 1,28
Zn	55,87 ± 0,45	55,37 – 56,36	55,45 ± 0,49	54,94 – 55,99
As	Bdl.	Bdl. – 0,13	0,14 ± 0,10	Bdl. – 0,26
Pd	0,19 ± 0,08	Bdl. – 0,34	0,19 ± 0,09	Bdl. – 0,29
Ag	0,12 ± 0,11	Bdl. – 0,32	0,13 ± 0,07	Bdl. – 0,26
Sb	0,39 ± 0,10	0,29 – 0,56	0,40 ± 0,05	0,35 – 0,47
Te	0,51 ± 0,09	0,43 – 0,68	0,46 ± 0,10	0,35 – 0,59
Pt	0,78 ± 0,18	0,54 – 1,03	0,76 ± 0,27	0,54 – 1,20
Au	1,37 ± 0,29	0,90 – 1,65	1,20 ± 0,24	0,97 – 1,57
Hg	1,37 ± 0,07	1,28 – 1,49	1,45 ± 0,27	1,10 – 1,85
Pb	1,70 ± 0,34	1,10 – 2,01	1,41 ± 0,31	1,10 – 1,92
Bi	1,60 ± 0,45	1,09 – 2,33	1,67 ± 0,29	1,21 – 1,98

Bdl.: valores abaixo do limite de detecção. Limite de detecção: 0,1%. Os valores numéricos estão representados com duas casas decimais para uma melhor visualização dos dados e não devem ser interpretados para fins de precisão. Sp 1: cristais de esfalerita sem desmisturas de calcopirita; Sp 2: cristais de esfalerita com desmisturas de calcopirita. N: número de cristais analisados.

APÊNDICE H

Matrizes de correlação dos elementos maiores, menores e traços em cristais de esfalerita do depósito São Jorge.

		S	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Pd	Ag	Sb	Te	Pt	Au	Hg	Pb	Bi
Sp 1 N: 7	S	1,00														
	Fe	-0,13	1,00													
	Ni	-0,28	-0,30	1,00												
	Cu	0,37	0,48	-0,35	1,00											
	Zn	-0,71	-0,16	0,62	-0,79	1,00										
	As	0,51	-0,34	0,51	-0,11	-0,06	1,00									
	Pd	-0,44	-0,15	-0,01	0,38	-0,15	-0,36	1,00								
	Ag	0,72	0,31	0,06	0,21	-0,33	0,64	-0,74	1,00							
	Sb	-0,42	0,04	-0,32	0,07	0,17	-0,72	0,43	-0,69	1,00						
	Te	0,64	0,58	-0,46	0,31	-0,48	0,13	-0,71	0,82	-0,38	1,00					
	Pt	-0,44	-0,13	-0,44	0,16	-0,17	-0,72	0,80	-0,85	0,56	-0,52	1,00				
	Au	0,48	-0,50	0,18	0,22	-0,23	0,11	0,06	0,06	0,06	-0,11	-0,03	1,00			
	Hg	-0,64	-0,02	-0,23	-0,60	0,60	-0,61	0,00	-0,62	0,66	-0,30	0,37	-0,41	1,00		
	Pb	-0,80	-0,26	0,02	-0,32	0,49	-0,62	0,63	-0,97	0,75	-0,81	0,73	-0,13	0,74	1,00	
Bi	0,35	0,28	-0,16	0,07	-0,37	0,50	-0,35	0,61	-0,78	0,56	-0,36	-0,53	-0,41	-0,66	1,00	
		S	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Pd	Ag	Sb	Te	Pt	Au	Hg	Pb	Bi
Sp 2 N: 5	S	1,00														
	Fe	0,33	1,00													
	Ni	0,36	0,01	1,00												
	Cu	0,25	1,00	-0,02	1,00											
	Zn	-0,22	-0,78	-0,40	-0,78	1,00										
	As	0,29	0,36	-0,76	0,34	0,19	1,00									
	Pd	-0,79	-0,21	-0,76	-0,15	0,52	0,30	1,00								
	Ag	0,86	0,12	0,59	0,04	-0,37	-0,12	-0,96	1,00							
	Sb	-0,66	0,19	0,27	0,25	-0,48	-0,63	0,20	-0,42	1,00						
	Te	-0,17	-0,74	-0,55	-0,75	0,96	0,35	0,50	-0,30	-0,60	1,00					
	Pt	-0,76	-0,66	0,06	-0,61	0,19	-0,68	0,30	-0,34	0,54	0,16	1,00				
	Au	0,93	0,52	0,15	0,45	-0,42	0,44	-0,72	0,80	-0,59	-0,28	-0,76	1,00			
	Hg	-0,93	-0,50	-0,07	-0,43	0,17	-0,59	0,53	-0,62	0,70	0,10	0,94	-0,91	1,00		
	Pb	-0,51	-0,21	0,54	-0,17	-0,36	-0,92	-0,13	-0,05	0,82	-0,45	0,79	-0,52	0,75	1,00	
Bi	-0,01	-0,93	0,08	-0,95	0,84	-0,22	0,04	0,07	-0,45	0,78	0,35	-0,28	0,17	-0,04	1,00	

Os valores numéricos correspondem ao r. Os valores em negrito correspondem às correlações mais significativas dentre o espaço amostral, levando em consideração $p < 0,05$. Sp 1: cristais de esfalerita sem desmisturas de calcopirita; Sp 2: cristais de esfalerita com desmisturas de calcopirita. N: número de cristais analisados.

APÊNDICE I

Tabela da média, desvio padrão e valores mínimos e máximos das concentrações de elementos (%) em cristais de galena do depósito São Jorge analisados por MEV-EDS.

	<i>Galena</i>			
	Gn 1 N: 2		Gn 2 N: 2	
	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>
<i>S</i>	15,01 ± 2,09	13,53 – 16,49	14,13 ± 3,65	11,55 – 16,71
<i>Fe</i>	2,86 ± 1,01	2,15 – 3,58	5,49 ± 1,14	4,68 – 6,30
<i>Ni</i>	0,21 ± 0,04	0,18 – 0,24	0,30 ± 0,04	0,27 – 0,33
<i>Cu</i>	5,81 ± 0,98	5,12 – 6,50	0,38 ± 0,06	0,33 – 0,42
<i>Zn</i>	0,24 ± 0,05	0,20 – 0,28	0,44 ± 0,00	0,44 – 0,44
<i>As</i>	10,0 ± 0,40	9,79 – 10,36	12,88 ± 0,00	12,88 – 12,89
<i>Pd</i>	Bdl.	Bdl.	0,86 ± 1,22	Bdl. – 1,73
<i>Ag</i>	0,34 ± 0,07	0,29 – 0,39	Bdl.	Bdl.
<i>Sb</i>	1,05 ± 0,27	0,85 – 1,24	1,17 ± 0,82	0,59 – 1,74
<i>Te</i>	0,99 ± 0,04	0,96 – 1,01	0,70 ± 0,02	0,68 – 0,72
<i>Pt</i>	1,19 ± 0,61	0,76 – 1,62	2,10 ± 0,14	1,99 – 2,20
<i>Au</i>	2,07 ± 0,09	2,00 – 2,13	2,07 ± 0,32	1,84 – 2,29
<i>Hg</i>	0,27 ± 0,30	Bdl. – 0,48	0,44 ± 0,13	0,35 – 0,53
<i>Pb</i>	58,03 ± 3,26	55,72 – 60,34	56,21 ± 2,25	54,62 – 57,80
<i>Bi</i>	1,86 ± 1,02	1,14 – 2,58	2,84 ± 0,18	2,72 – 2,97

Bdl.: valores abaixo do limite de detecção. Limite de detecção: 0,1%. Os valores numéricos estão representados com duas casas decimais para uma melhor visualização dos dados e não devem ser interpretados para fins de precisão. Gn 1: cristais de galena ocorrendo como inclusões; Gn 2: cristais de galena preenchendo fraturas em pirita. N: número de cristais analisados.

APÊNDICE J

Tabela da média, desvio padrão e valores mínimos e máximos das concentrações de elementos (%) em cristais de sulfeto de Bi e Pb do depósito São Jorge analisados por MEV-EDS.

	<i>Sulfeto de Bi e Pb</i>			
	1 N: 4		2 N: 7	
	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>
S	19,03 ± 2,11	15,89 – 20,37	20,77 ± 1,96	18,39 – 23,82
Fe	1,61 ± 1,10	0,88 – 3,26	3,47 ± 2,03	1,31 – 5,94
Ni	0,34 ± 0,05	0,27 – 0,39	0,28 ± 0,07	0,18 – 0,38
Cu	10,57 ± 0,13	10,42 – 10,71	3,85 ± 0,81	3,15 – 5,35
Zn	0,24 ± 0,16	0,14 – 0,48	0,31 ± 0,07	0,26 – 0,43
As	5,49 ± 1,44	4,41 – 7,54	4,44 ± 2,08	2,08 – 8,31
Pd	Bdl.	Bdl.	Bdl.	Bdl.
Ag	Bdl.	Bdl.	0,31 ± 0,47	Bdl. – 1,28
Sb	0,80 ± 0,31	0,54 – 1,17	0,65 ± 0,37	0,30 – 1,31
Te	0,60 ± 0,21	0,40 – 0,82	0,84 ± 0,22	0,58 – 1,17
Pt	1,00 ± 0,17	0,82 – 1,15	1,09 ± 0,50	0,56 – 2,09
Au	1,97 ± 0,62	1,31 – 2,81	1,78 ± 0,28	1,35 – 2,09
Hg	1,41 ± 0,71	0,93 – 2,46	1,30 ± 0,34	0,59 – 1,57
Pb	23,04 ± 1,49	21,58 – 24,76	19,38 ± 3,94	12,65 – 23,36
Bi	33,90 ± 1,58	32,54 – 35,80	41,53 ± 3,74	37,98 – 49,25

Bdl.: valores abaixo do limite de detecção. Limite de detecção: 0,1%. Os valores numéricos estão representados com duas casas decimais para uma melhor visualização dos dados e não devem ser interpretados para fins de precisão. 1: cristais euédricos, poligonais preenchendo fraturas e associados a barita; 2: cristais anédricos inclusos em cristais de pirita. N: número de cristais analisados.

APÊNDICE K

Matrizes de correlação dos elementos maiores, menores e traços em cristais de sulfeto de bismuto e chumbo do depósito São Jorge.

		S	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Pd	Ag	Sb	Te	Pt	Au	Hg	Pb	Bi
1 N: 4	S	1,00														
	Fe	-0,98	1,00													
	Ni	-0,73	0,60	1,00												
	Cu	-0,63	0,74	0,09	1,00											
	Zn	-1,00	0,98	0,73	0,66	1,00										
	As	-0,98	0,96	0,70	0,53	0,97	1,00									
	Pd							1,00								
	Ag								1,00							
	Sb	0,45	-0,43	-0,51	-0,62	-0,49	-0,28			1,00						
	Te	0,73	-0,64	-0,76	0,05	-0,71	-0,82			-0,09	1,00					
	Pt	-0,53	0,45	0,79	0,36	0,56	0,40			-0,91	-0,23	1,00				
	Au	0,13	-0,27	0,53	-0,35	-0,11	-0,23			-0,52	0,03	0,71	1,00			
	Hg	0,30	-0,12	-0,87	0,36	-0,30	-0,28			0,32	0,58	-0,68	-0,80	1,00		
	Pb	0,55	-0,51	-0,40	0,11	-0,51	-0,70			-0,46	0,90	0,21	0,41	0,22	1,00	
Bi	-0,42	0,33	0,48	-0,36	0,38	0,57			0,49	-0,91	-0,15	-0,17	-0,43	-0,95	1,00	
2 N: 7	S	1,00														
	Fe	0,56	1,00													
	Ni	-0,50	0,04	1,00												
	Cu	-0,14	-0,84	-0,29	1,00											
	Zn	0,50	0,12	-0,65	-0,04	1,00										
	As	-0,40	-0,66	0,44	0,54	-0,37	1,00									
	Pd							1,00								
	Ag	0,84	0,69	-0,09	-0,48	0,42	-0,31		1,00							
	Sb	-0,67	-0,31	0,52	-0,08	0,04	0,17		-0,35	1,00						
	Te	0,17	0,47	-0,02	-0,34	-0,21	-0,02		0,07	-0,55	1,00					
	Pt	-0,09	-0,65	-0,65	0,62	0,62	0,10		-0,35	0,16	-0,38	1,00				
	Au	-0,11	-0,24	0,62	0,30	-0,67	0,77		0,01	-0,11	0,06	-0,46	1,00			
	Hg	-0,38	0,19	0,10	-0,64	0,25	-0,33		-0,06	0,50	-0,03	0,06	-0,59	1,00		
	Pb	-0,40	0,03	0,51	-0,04	-0,93	0,03		-0,38	-0,06	0,11	-0,64	0,44	-0,24	1,00	
Bi	-0,16	-0,33	-0,49	0,10	0,76	-0,16		-0,19	0,41	-0,34	0,83	-0,73	0,57	-0,74	1,00	

Os valores numéricos correspondem ao r. Os valores em negrito correspondem às correlações mais significativas dentre o espaço amostral, levando em consideração $p < 0,05$. 1: cristais euédricos, poligonais preenchendo fraturas e associados a barita; 2: cristais anédricos inclusos em cristais de pirita. N: número de cristais analisados.

APÊNDICE L

Tabela da média, desvio padrão e valores mínimos e máximos das concentrações de elementos (%) em cristais de pirita do depósito São Chico analisados por MEV-EDS.

	<i>Pirita</i>					
	Py 1 N: 15		Py 2 N: 10		Py 3 N: 6	
	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>
S	53,35 ± 1,20	49,46 – 54,62	53,56 ± 0,74	51,82 – 54,15	53,94 ± 0,28	53,72 – 54,42
Fe	38,21 ± 1,08	37,39 – 41,84	38,07 ± 0,78	37,38 – 40,01	37,94 ± 0,33	37,55 – 38,45
Ni	0,14 ± 0,05	Bdl. – 0,22	0,13 ± 0,03	Bdl. – 0,16	0,14 ± 0,05	Bdl. – 0,21
Cu	0,22 ± 0,12	0,14 – 0,62	0,21 ± 0,05	0,15 – 0,34	0,22 ± 0,04	0,18 – 0,26
Zn	0,37 ± 0,27	0,11 – 1,10	0,23 ± 0,11	Bdl. – 0,50	0,18 ± 0,05	0,11 – 0,23
As	0,17 ± 0,12	Bdl. – 0,41	Bdl.	Bdl. – 0,21	Bdl.	Bdl. – 0,23
Pd	0,16 ± 0,05	Bdl. – 0,29	0,17 ± 0,05	Bdl. – 0,26	0,16 ± 0,05	Bdl. – 0,22
Ag	Bdl.	Bdl. – 0,12	Bdl.	Bdl. – 0,11	Bdl.	Bdl. – 0,14
Sb	0,41 ± 0,11	0,25 – 0,63	0,34 ± 0,08	0,22 – 0,44	0,32 ± 0,07	0,22 – 0,43
Te	0,38 ± 0,11	0,24 – 0,62	0,41 ± 0,08	0,30 – 0,57	0,46 ± 0,10	0,30 – 0,61
Pt	1,03 ± 0,28	0,48 – 1,67	1,17 ± 0,23	0,80 – 1,57	1,05 ± 0,17	0,83 – 1,25
Au	1,29 ± 0,29	0,89 – 2,14	1,23 ± 0,22	0,76 – 1,52	1,24 ± 0,22	0,92 – 1,58
Hg	1,30 ± 0,24	0,87 – 1,61	1,29 ± 0,25	0,94 – 1,79	1,27 ± 0,31	0,69 – 1,53
Pb	1,46 ± 0,39	0,84 – 1,94	1,54 ± 0,37	1,06 – 2,17	1,41 ± 0,26	1,02 – 1,71
Bi	1,48 ± 0,35	0,85 – 2,00	1,53 ± 0,31	1,16 – 2,13	1,52 ± 0,30	1,22 – 1,95

Bdl.: valores abaixo do limite de detecção. Limite de detecção: 0,1%. Os valores numéricos estão representados com duas casas decimais para uma melhor visualização dos dados e não devem ser interpretados para fins de precisão. Py 1: cristais de pirita não associados ao ouro; Py 2: cristais de pirita com ouro preenchendo fraturas; Py 3: cristais de pirita com ouro ocorrendo como inclusões. N: número de cristais analisados.

APÊNDICE M

Matrizes de correlação dos elementos maiores, menores e traços em cristais de pirita do depósito São Chico.

	S	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Pd	Ag	Sb	Te	Pt	Au	Hg	Pb	Bi
Py 1 N: 15	S	1,00													
	Fe	-0,88	1,00												
	Ni	0,14	-0,26	1,00											
	Cu	0,14	0,01	-0,37	1,00										
	Zn	0,06	-0,25	-0,02	0,00	1,00									
	As	0,28	-0,23	0,13	-0,29	-0,06	1,00								
	Pd	0,32	-0,29	0,31	-0,53	-0,25	0,17	1,00							
	Ag	0,24	0,02	-0,42	-0,06	-0,08	0,25	0,30	1,00						
	Sb	-0,13	-0,06	0,39	-0,26	0,39	-0,22	-0,23	-0,29	1,00					
	Te	0,24	-0,14	0,31	-0,12	-0,55	0,02	0,48	-0,18	-0,35	1,00				
	Pt	0,16	-0,10	-0,09	-0,03	-0,24	-0,04	0,33	-0,03	-0,43	0,78	1,00			
	Au	-0,46	0,21	0,46	-0,16	0,09	-0,30	0,05	-0,25	0,44	-0,23	-0,39	1,00		
	Hg	-0,02	0,15	-0,17	0,24	-0,31	0,10	-0,43	-0,24	-0,06	0,16	0,05	-0,47	1,00	
	Pb	-0,49	0,21	-0,03	-0,13	-0,13	-0,52	-0,03	-0,20	0,26	-0,29	-0,34	0,64	-0,27	1,00
	Bi	-0,21	-0,08	-0,11	-0,37	0,39	0,34	-0,18	-0,24	0,06	-0,45	-0,29	-0,02	-0,20	0,22
Py 2 N: 10	S	1,00													
	Fe	-0,86	1,00												
	Ni	-0,51	0,16	1,00											
	Cu	0,24	-0,46	0,01	1,00										
	Zn	-0,58	0,60	0,26	0,07	1,00									
	As	-0,25	0,40	0,08	-0,41	-0,29	1,00								
	Pd	-0,22	0,22	-0,36	-0,15	-0,36	0,51	1,00							
	Ag	-0,27	0,08	0,35	-0,24	0,31	-0,28	-0,08	1,00						
	Sb	0,26	-0,41	0,23	-0,44	-0,49	0,01	-0,05	0,46	1,00					
	Te	0,05	0,08	-0,11	0,34	0,29	-0,26	-0,32	-0,39	-0,75	1,00				
	Pt	0,22	-0,15	0,38	0,00	-0,06	0,16	-0,53	-0,17	-0,08	0,54	1,00			
	Au	0,02	-0,26	-0,15	0,49	-0,21	-0,28	0,25	0,03	0,06	-0,30	-0,64	1,00		
	Hg	-0,50	0,63	0,30	-0,43	0,65	0,00	-0,39	0,45	-0,12	0,20	0,22	-0,31	1,00	
	Pb	0,05	-0,26	-0,11	0,07	-0,50	-0,09	0,41	-0,36	0,20	-0,22	-0,40	0,35	-0,72	1,00
	Bi	0,18	-0,54	0,30	0,49	-0,09	-0,29	0,01	0,44	0,38	-0,46	-0,22	0,32	-0,47	0,16
Py 3 N: 6	S	1,00													
	Fe	0,50	1,00												
	Ni	0,02	-0,70	1,00											
	Cu	0,40	0,84	-0,42	1,00										
	Zn	-0,44	-0,72	0,44	-0,92	1,00									
	As	0,67	0,87	-0,60	0,62	-0,52	1,00								
	Pd	-0,64	-0,36	0,45	-0,10	0,34	-0,61	1,00							
	Ag	-0,46	-0,49	-0,16	-0,57	0,40	-0,21	-0,25	1,00						
	Sb	0,49	-0,39	0,84	-0,32	0,36	-0,13	0,03	-0,22	1,00					
	Te	-0,64	0,07	-0,60	-0,12	0,23	0,10	0,11	0,60	-0,68	1,00				
	Pt	-0,32	-0,56	-0,01	-0,85	0,66	-0,43	-0,24	0,58	-0,04	0,19	1,00			
	Au	0,41	0,56	0,12	0,63	-0,32	0,44	0,33	-0,82	0,26	-0,28	-0,81	1,00		
	Hg	-0,92	-0,66	0,16	-0,41	0,33	-0,82	0,57	0,49	-0,36	0,40	0,31	-0,54	1,00	
	Pb	-0,49	-0,04	-0,41	-0,05	-0,14	-0,38	0,03	0,09	-0,70	0,19	0,43	-0,51	0,51	1,00
	Bi	-0,08	-0,81	0,78	-0,62	0,54	-0,48	0,13	0,45	0,70	-0,20	0,22	-0,29	0,27	-0,50

Os valores numéricos correspondem ao r. Os valores em negrito correspondem às correlações mais significativas dentre o espaço amostral, levando em consideração $p < 0,05$. Py 1: cristais de pirita não associados ao ouro; Py 2: cristais de pirita com ouro preenchendo fraturas; Py 3: cristais de pirita com ouro ocorrendo como inclusões. N: número de cristais analisados.

APÊNDICE N

Tabela da média, desvio padrão e valores mínimos e máximos das concentrações de elementos (%) em cristais de galena do depósito São Chico analisados por MEV-EDS.

	<i>Galena</i>							
	Gn 1 N: 7		Gn 2 N: 7		Gn 3 N: 10		Gn 4 N: 3	
	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>
S	12,75 ± 0,49	11,93 – 13,30	12,71 ± 0,59	11,93 – 13,50	12,85 ± 0,66	11,60 – 13,88	12,25 ± 0,24	11,99 – 12,45
Fe	0,57 ± 0,25	0,39 – 1,06	0,64 ± 0,35	0,29 – 1,29	1,09 ± 0,77	0,41 – 2,86	0,56 ± 0,03	0,53 – 0,58
Ni	0,29 ± 0,06	0,22 – 0,41	0,31 ± 0,06	0,24 – 0,40	0,30 ± 0,05	0,21 – 0,38	0,33 ± 0,17	0,22 – 0,53
Cu	0,36 ± 0,09	0,25 – 0,49	0,34 ± 0,05	0,29 – 0,45	0,37 ± 0,06	0,27 – 0,47	0,39 ± 0,08	0,35 – 0,48
Zn	0,49 ± 0,30	0,22 – 1,07	0,36 ± 0,05	0,29 – 0,43	1,11 ± 0,55	0,39 – 1,87	0,38 ± 0,21	0,21 – 0,62
As	12,28 ± 0,58	11,08 – 12,89	12,85 ± 0,65	11,80 – 13,87	12,12 ± 1,00	9,56 – 12,92	12,39 ± 0,95	11,29 – 13,02
Pd	Bdl.	Bdl.	Bdl.	Bdl.	Bdl.	Bdl.	Bdl.	Bdl.
Ag	Bdl.	Bdl.	0,31 ± 0,55	Bdl. – 1,52	Bdl.	Bdl.	Bdl.	Bdl.
Sb	0,60 ± 0,13	0,48 – 0,77	0,59 ± 0,16	0,36 – 0,82	0,53 ± 0,12	0,35 – 0,74	0,64 ± 0,21	0,46 – 0,87
Te	0,69 ± 0,10	0,56 – 0,78	0,82 ± 0,22	0,57 – 1,12	0,88 ± 0,12	0,73 – 1,13	0,75 ± 0,47	0,35 – 1,27
Pt	1,82 ± 0,27	1,43 – 2,28	1,78 ± 0,12	1,58 – 1,89	1,63 ± 0,16	1,32 – 1,85	1,67 ± 0,42	1,31 – 2,13
Au	1,54 ± 0,55	1,06 – 2,44	1,93 ± 0,54	1,29 – 2,91	1,59 ± 0,29	1,18 – 2,02	1,52 ± 0,15	1,41 – 1,70
Hg	0,57 ± 0,39	0,15 – 1,12	0,47 ± 0,32	0,17 – 0,91	0,45 ± 0,38	Bdl. – 1,20	0,48 ± 0,84	Bdl. – 1,45
Pb	66,57 ± 0,92	65,42 – 67,72	65,16 ± 1,32	63,07 – 66,32	65,28 ± 1,09	63,14 – 66,59	66,49 ± 1,18	65,42 – 67,75
Bi	1,46 ± 0,32	1,05 – 2,09	1,74 ± 0,22	1,27 – 1,91	1,81 ± 0,32	1,29 – 2,27	2,15 ± 1,14	1,30 – 3,45

Bdl.: valores abaixo do limite de detecção. Limite de detecção: 0,1%. Os valores numéricos estão representados com duas casas decimais para uma melhor visualização dos dados e não devem ser interpretados para fins de precisão. Gn 1: cristais de galena não associados ao ouro; Gn 2: cristais de galena associados ao ouro; Gn 3: cristais de galena associados a esfalerita; Gn 4: cristais de galena associados a calcopirita. N: número de cristais analisados.

APÊNDICE O

Matrizes de correlação dos elementos maiores, menores e traços em cristais de galena do depósito São Chico.

	S	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Pd	Ag	Sb	Te	Pt	Au	Hg	Pb	Bi
Gn 1 N: 7	S	1,00													
	Fe	0,59	1,00												
	Ni	0,09	0,26	1,00											
	Cu	0,24	0,13	0,34	1,00										
	Zn	-0,81	-0,39	-0,12	-0,63	1,00									
	As	0,50	0,25	-0,18	0,47	-0,42	1,00								
	Pd							1,00							
	Ag								1,00						
	Sb	-0,43	-0,21	0,67	-0,35	0,50	-0,66			1,00					
	Te	0,69	0,35	0,29	0,49	-0,49	0,72			-0,30	1,00				
	Pt	0,73	0,22	0,55	0,24	-0,67	0,15			0,18	0,50	1,00			
	Au	-0,59	-0,31	-0,33	-0,31	0,29	-0,69			0,13	-0,96	-0,48	1,00		
	Hg	-0,20	-0,21	0,72	0,60	-0,01	-0,07			0,41	0,35	0,18	-0,32	1,00	
	Pb	-0,85	-0,74	-0,42	-0,56	0,76	-0,61			0,31	-0,80	-0,64	0,71	-0,15	1,00
Bi	0,82	0,82	-0,11	0,14	-0,58	0,46			-0,58	0,57	0,26	-0,46	-0,34	-0,76	1,00
Gn 2 N: 7	S	1,00													
	Fe	0,37	1,00												
	Ni	-0,82	-0,45	1,00											
	Cu	0,37	-0,16	-0,19	1,00										
	Zn	-0,28	-0,18	-0,15	0,34	1,00									
	As	0,43	0,37	-0,12	0,07	-0,55	1,00								
	Pd	0,23	-0,15	0,23	0,10	-0,62	-0,05	1,00							
	Ag	0,34	-0,08	0,09	0,34	-0,46	-0,11	0,96	1,00						
	Sb	-0,43	-0,40	0,59	-0,26	-0,15	-0,49	0,64	0,53	1,00					
	Te	0,35	0,03	-0,42	0,35	0,07	0,31	-0,44	-0,35	-0,88	1,00				
	Pt	-0,30	-0,05	0,20	-0,88	-0,41	0,20	-0,22	-0,48	0,03	-0,04	1,00			
	Au	0,20	0,35	0,15	0,12	-0,52	0,00	0,81	0,85	0,42	-0,39	-0,39	1,00		
	Hg	-0,94	-0,46	0,71	-0,21	0,43	-0,41	-0,41	-0,48	0,19	-0,05	0,23	-0,39	1,00	
	Pb	-0,64	-0,42	0,17	-0,34	0,66	-0,49	-0,70	-0,75	0,00	0,02	0,38	-0,80	0,74	1,00
Bi	-0,31	-0,67	0,27	0,32	0,49	-0,80	0,30	0,37	0,64	-0,40	-0,46	0,05	0,30	0,28	1,00
Gn 3 N: 10	S	1,00													
	Fe	0,13	1,00												
	Ni	0,04	-0,23	1,00											
	Cu	0,22	-0,21	-0,23	1,00										
	Zn	-0,31	-0,15	-0,20	-0,31	1,00									
	As	0,33	-0,35	0,40	0,73	-0,45	1,00								
	Pd							1,00							
	Ag								1,00						
	Sb	-0,12	0,03	-0,01	-0,33	-0,40	-0,44			1,00					
	Te	-0,08	-0,36	-0,06	0,03	0,33	-0,09			-0,04	1,00				
	Pt	-0,22	-0,07	0,06	0,56	-0,65	0,42			0,40	0,00	1,00			
	Au	-0,23	0,40	-0,30	-0,58	-0,09	-0,66			0,65	-0,30	0,01	1,00		
	Hg	-0,57	-0,07	-0,33	-0,25	0,29	-0,61			0,51	0,35	0,21	0,40	1,00	
	Pb	-0,61	-0,62	0,13	-0,41	0,24	-0,30			0,28	0,23	-0,11	0,13	0,35	1,00
Bi	0,23	0,76	-0,28	0,16	0,05	-0,05			-0,39	-0,53	-0,21	-0,06	-0,27	-0,71	1,00
Gn 4 N: 3	S	1,00													
	Fe	-0,43	1,00												
	Ni	-0,95	0,70	1,00											
	Cu	-0,98	0,61	0,99	1,00										
	Zn	0,55	0,51	-0,25	-0,37	1,00									
	As	-0,17	0,96	0,48	0,37	0,73	1,00								
	Pd							1,00							
	Ag								1,00						
	Sb	0,88	0,04	-0,68	-0,77	0,88	0,31			1,00					
	Te	0,51	-1,00	-0,76	-0,67	-0,44	-0,94			0,04	1,00				
	Pt	-0,83	0,86	0,97	0,93	0,00	0,69			-0,47	-0,90	1,00			
	Au	0,61	0,45	-0,32	-0,44	1,00	0,67			0,91	-0,37	-0,07	1,00		
	Hg	0,25	-0,98	-0,55	-0,44	-0,67	-1,00			-0,23	0,96	-0,75	-0,61	1,00	
	Pb	0,60	-0,98	-0,83	-0,75	-0,34	-0,89			0,15	0,99	-0,94	-0,27	0,93	1,00
Bi	-0,90	0,78	0,99	0,97	-0,14	0,58			-0,59	-0,83	0,99	-0,21	-0,64	-0,89	1,00

Os valores numéricos correspondem ao r. Os valores em negrito correspondem às correlações mais significativas dentre o espaço amostral, levando em consideração $p < 0,05$. Gn 1: cristais de galena não associados ao ouro; Gn 2: cristais de galena associados ao ouro; Gn 3: cristais de galena associados a esfalerita; Gn 4: cristais de galena associados a calcopirita. N: número de cristais analisados.

APÊNDICE P

Tabela da média, desvio padrão e valores mínimos e máximos das concentrações de elementos (%) em cristais de esfalerita do depósito São Chico analisados por MEV-EDS.

	<i>Esfalerita</i>					
	Sp 1 N: 4		Sp 2 N: 4		Sp 3 N: 9	
	<i>Média</i>	<i>Mín. - Máx.</i>	<i>Média</i>	<i>Mín. - Máx.</i>	<i>Média</i>	<i>Mín. - Máx.</i>
<i>S</i>	35,14 ± 0,59	34,51 – 35,85	33,95 ± 0,86	32,71 – 34,70	35,04 ± 0,55	34,41 – 35,88
<i>Fe</i>	1,13 ± 0,24	0,87 – 1,45	1,30 ± 0,47	0,83 – 1,91	1,42 ± 0,72	0,46 – 2,44
<i>Ni</i>	0,16 ± 0,05	0,14 – 0,24	0,16 ± 0,06	0,12 – 0,24	0,15 ± 0,04	Bdl. – 0,23
<i>Cu</i>	0,45 ± 0,07	0,35 – 0,51	0,35 ± 0,14	0,23 – 0,50	0,35 ± 0,22	0,16 – 0,85
<i>Zn</i>	55,41 ± 0,57	54,89 – 56,22	54,71 ± 0,63	53,93 – 55,46	54,82 ± 0,91	53,34 – 56,40
<i>As</i>	0,10 ± 0,13	Bdl. – 0,29	Bdl.	Bdl. – 0,29	0,13 ± 0,11	Bdl. – 0,31
<i>Pd</i>	0,15 ± 0,06	Bdl. – 0,23	0,13 ± 0,03	Bdl. – 0,16	0,12 ± 0,06	Bdl. – 0,21
<i>Ag</i>	0,27 ± 0,06	0,20 – 0,33	0,37 ± 0,07	0,31 – 0,48	0,32 ± 0,06	0,24 – 0,43
<i>Sb</i>	0,41 ± 0,05	0,35 – 0,47	0,56 ± 0,18	0,40 – 0,81	0,28 ± 0,08	0,15 – 0,44
<i>Te</i>	0,46 ± 0,06	0,41 – 0,54	0,47 ± 0,13	0,34 – 0,64	0,54 ± 0,07	0,47 – 0,67
<i>Pt</i>	0,97 ± 0,18	0,83 – 1,24	0,82 ± 0,41	0,47 – 1,38	0,80 ± 0,34	0,11 – 1,15
<i>Au</i>	1,30 ± 0,19	1,12 – 1,54	1,33 ± 0,28	1,08 – 1,74	1,08 ± 0,30	0,78 – 1,61
<i>Hg</i>	1,14 ± 0,21	0,91 – 1,39	1,79 ± 0,19	1,56 – 1,98	1,52 ± 0,28	1,13 – 2,04
<i>Pb</i>	1,46 ± 0,15	1,33 – 1,61	1,80 ± 0,23	1,62 – 2,14	1,61 ± 0,42	0,74 – 2,08
<i>Bi</i>	1,45 ± 0,18	1,20 – 1,60	2,16 ± 0,45	1,78 – 2,79	1,81 ± 0,22	1,43 – 2,25

Bdl.: valores abaixo do limite de detecção. Limite de detecção: 0,1%. Os valores numéricos estão representados com duas casas decimais para uma melhor visualização dos dados e não devem ser interpretados para fins de precisão. Sp 1: cristais de esfalerita não associados ao ouro; Sp 2: cristais de esfalerita com ouro na forma de inclusões; Sp 3: cristais de esfalerita associados a galena. N: número de cristais analisados.

APÊNDICE Q

Matrizes de correlação dos elementos maiores, menores e traços em cristais de esfalerita do depósito São Chico.

	S	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Pd	Ag	Sb	Te	Pt	Au	Hg	Pb	Bi
Sp 1 N: 4	S	1,00													
	Fe	-0,34	1,00												
	Ni	0,80	0,02	1,00											
	Cu	0,03	-0,29	0,44	1,00										
	Zn	-0,53	-0,62	-0,64	0,30	1,00									
	As	-0,85	0,78	-0,52	-0,17	0,01	1,00								
	Pd	0,56	-0,04	0,92	0,75	-0,38	-0,39	1,00							
	Ag	-0,99	0,36	-0,72	0,08	0,50	0,86	-0,45	1,00						
	Sb	0,94	-0,49	0,84	0,36	-0,32	-0,90	0,73	-0,90	1,00					
	Te	-0,36	0,92	0,18	0,12	-0,50	0,75	0,26	0,43	-0,38	1,00				
	Pt	-0,64	0,89	-0,16	0,02	-0,25	0,93	-0,03	0,69	-0,66	0,94	1,00			
	Au	-0,05	0,37	-0,41	-1,00	-0,36	0,23	-0,72	-0,06	-0,38	-0,03	0,06	1,00		
	Hg	-0,23	-0,36	-0,77	-0,69	0,46	-0,06	-0,90	0,11	-0,37	-0,65	-0,41	0,63	1,00	
	Pb	0,87	-0,18	0,48	-0,47	-0,59	-0,69	0,12	-0,92	0,66	-0,40	-0,60	0,45	0,16	1,00
Bi	-0,55	0,28	0,02	0,74	0,27	0,53	0,38	0,66	-0,30	0,61	0,64	-0,70	-0,63	-0,87	1,00
Sp 2 N: 4	S	1,00													
	Fe	0,14	1,00												
	Ni	-0,92	-0,16	1,00											
	Cu	-0,78	-0,10	0,47	1,00										
	Zn	-0,14	-0,82	-0,06	0,46	1,00									
	As	0,31	-0,65	-0,01	-0,65	0,16	1,00								
	Pd	0,52	0,66	-0,75	-0,02	-0,21	-0,64	1,00							
	Ag	0,81	0,68	-0,72	-0,70	-0,65	-0,08	0,70	1,00						
	Sb	0,41	-0,74	-0,18	-0,59	0,35	0,97	-0,52	-0,09	1,00					
	Te	-0,81	0,46	0,68	0,71	-0,28	-0,73	-0,01	-0,34	-0,85	1,00				
	Pt	0,43	-0,29	-0,06	-0,86	-0,25	0,91	-0,49	0,25	0,81	-0,65	1,00			
	Au	-0,87	0,21	0,93	0,45	-0,35	-0,27	-0,48	-0,47	-0,47	0,85	-0,19	1,00		
	Hg	-0,14	0,95	0,02	0,22	-0,67	-0,84	0,61	0,43	-0,92	0,69	-0,55	0,38	1,00	
	Pb	-0,98	-0,06	0,83	0,87	0,18	-0,47	-0,36	-0,77	-0,54	0,86	-0,60	0,82	0,24	1,00
Bi	-0,98	-0,10	0,83	0,88	0,22	-0,45	-0,38	-0,80	-0,51	0,84	-0,59	0,80	0,20	1,00	1,00
Sp 3 N: 9	S	1,00													
	Fe	-0,39	1,00												
	Ni	0,55	-0,33	1,00											
	Cu	0,33	-0,21	-0,13	1,00										
	Zn	0,35	-0,75	0,76	-0,23	1,00									
	As	0,38	-0,08	0,59	0,15	0,32	1,00								
	Pd	0,12	-0,39	0,26	0,06	0,28	-0,39	1,00							
	Ag	-0,63	0,56	-0,32	-0,43	-0,35	0,19	-0,73	1,00						
	Sb	-0,21	0,17	0,20	-0,30	-0,04	-0,06	0,55	0,01	1,00					
	Te	-0,52	0,12	-0,57	-0,12	-0,21	-0,57	-0,11	0,09	-0,51	1,00				
	Pt	-0,77	0,40	-0,46	0,08	-0,48	-0,29	-0,02	0,51	0,35	0,11	1,00			
	Au	0,14	-0,18	-0,29	0,25	-0,10	0,32	-0,39	0,01	-0,34	0,06	-0,40	1,00		
	Hg	-0,16	-0,21	-0,49	-0,20	-0,10	-0,24	-0,12	0,14	-0,33	0,50	-0,14	0,33	1,00	
	Pb	-0,46	0,51	-0,76	0,01	-0,72	-0,83	0,00	0,16	-0,02	0,49	0,54	-0,31	0,08	1,00
Bi	-0,77	-0,08	-0,52	-0,19	-0,14	-0,60	0,36	0,15	0,42	0,35	0,63	-0,08	0,21	0,42	1,00

Os valores numéricos correspondem ao r. Os valores em negrito correspondem às correlações mais significativas dentre o espaço amostral, levando em consideração $p < 0,05$. Sp 1: cristais de esfalerita não associados ao ouro; Sp 2: cristais de esfalerita com ouro na forma de inclusões; Sp 3: cristais de esfalerita associados a galena. N: número de cristais analisados.

APÊNDICE R

Tabela da média, desvio padrão e valores mínimos e máximos das concentrações de elementos (%) em cristais de calcopirita do depósito São Chico analisados por MEV-EDS.

	<i>Calcopirita</i>									
	Ccp 1 N: 9		Ccp 2 N: 2		Ccp 2a N: 2		Ccp 3 N: 2		Ccp 4 N: 6	
	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>	<i>Média</i>	<i>Min. - Máx.</i>
S	36,63 ± 0,31	36,10 – 37,04	36,37 ± 0,22	36,21 – 36,53	36,28 ± 0,14	36,19 – 36,38	37,61 ± 0,81	37,04 – 38,18	36,84 ± 0,21	36,62 – 37,16
Fe	26,55 ± 0,22	26,34 – 26,97	26,65 ± 0,12	26,56 – 26,73	26,54 ± 0,08	26,49 – 26,60	26,51 ± 0,40	26,23 – 26,79	26,52 ± 0,29	26,08 – 26,97
Ni	0,13 ± 0,02	0,11 – 0,16	0,14 ± 0,01	0,13 – 0,14	0,13 ± 0,00	0,13 – 0,14	0,14 ± 0,02	0,12 – 0,15	0,13 ± 0,03	Bdl. – 0,18
Cu	28,37 ± 0,31	27,95 – 28,98	28,62 ± 0,05	28,59 – 28,66	28,46 ± 1,17	28,34 – 28,58	27,56 ± 0,60	27,14 – 27,99	28,18 ± 0,29	27,70 – 28,55
Zn	0,13 ± 0,03	Bdl. – 0,17	0,15 ± 0,00	0,15 – 0,15	0,13 ± 0,00	0,12 – 0,13	0,19 ± 0,06	0,15 – 0,23	0,15 ± 0,03	0,11 – 0,18
As	0,12 ± 0,13	Bdl. – 0,41	0,13 ± 0,02	0,11 – 0,14	Bdl.	Bdl.	0,22 ± 0,02	0,21 – 0,24	0,17 ± 0,13	Bdl. – 0,32
Pd	0,18 ± 0,05	0,10 – 0,27	0,17 ± 0,01	0,16 – 0,18	0,23 ± 0,01	0,22 – 0,24	0,22 ± 0,10	0,15 – 0,29	0,20 ± 0,05	0,15 – 0,28
Ag	Bdl.	Bdl.	Bdl.	Bdl.	Bdl.	Bdl.	Bdl.	Bdl.	Bdl.	Bdl. – 0,14
Sb	0,40 ± 0,07	0,32 – 0,53	0,31 ± 0,06	0,27 – 0,35	0,29 ± 0,08	0,23 – 0,34	0,39 ± 0,16	0,27 – 0,51	0,36 ± 0,10	0,24 – 0,49
Te	0,37 ± 0,05	0,31 – 0,43	0,46 ± 0,00	0,46 – 0,47	0,58 ± 0,05	0,54 – 0,61	0,39 ± 0,11	0,31 – 0,47	0,40 ± 0,05	0,35 – 0,46
Pt	1,20 ± 0,18	0,98 – 1,42	1,26 ± 0,11	1,18 – 1,34	1,19 ± 0,02	1,18 – 1,20	1,43 ± 0,30	1,22 – 1,65	1,30 ± 0,14	1,12 – 1,46
Au	1,26 ± 0,15	1,03 – 1,57	1,37 ± 0,04	1,34 – 1,40	1,33 ± 0,06	1,29 – 1,37	1,36 ± 0,22	1,20 – 1,52	1,35 ± 0,22	1,01 – 1,65
Hg	1,44 ± 0,25	1,09 – 1,81	1,41 ± 0,24	1,25 – 1,58	1,79 ± 0,08	1,73 – 1,85	1,38 ± 0,11	1,30 – 1,45	1,36 ± 0,20	1,12 – 1,64
Pb	1,46 ± 0,40	0,73 – 1,96	1,57 ± 0,17	1,45 – 1,68	1,66 ± 0,11	1,58 – 1,74	1,09 ± 0,55	0,70 – 1,47	1,65 ± 0,23	1,35 – 1,88
Bi	1,66 ± 0,12	1,50 – 1,88	1,31 ± 0,69	0,83 – 1,80	1,28 ± 0,00	1,28 – 1,29	1,43 ± 0,53	1,06 – 1,80	1,33 ± 0,35	0,99 – 1,96

Bdl.: valores abaixo do limite de detecção. Limite de detecção: 0,1%. Os valores numéricos estão representados com duas casas decimais para uma melhor visualização dos dados e não devem ser interpretados para fins de precisão. Ccp 1: cristais de calcopirita não associados ao ouro; Ccp 2: cristais de calcopirita não associados ao ouro e com zoneamento composicional; Ccp 2a: porção central do zoneamento composicional da Ccp 2; Ccp 3: cristais de calcopirita associados ao ouro; Ccp 4: cristais de calcopirita associados a galena. N: número de cristais analisados.

APÊNDICE S

Matrizes de correlação dos elementos maiores, menores e traços em cristais de calcopirita do depósito São Chico.

	S	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Pd	Ag	Sb	Te	Pt	Au	Hg	Pb	Bi
Ccp 1 N: 9	S	1,00													
	Fe	0,02	1,00												
	Ni	0,00	-0,14	1,00											
	Cu	0,17	0,14	-0,46	1,00										
	Zn	-0,11	0,58	0,23	-0,14	1,00									
	As	0,37	0,10	-0,51	0,66	0,19	1,00								
	Pd	-0,51	-0,24	-0,11	-0,42	-0,52	-0,63	1,00							
	Ag	0,18	0,45	0,01	0,30	0,54	0,18	-0,69	1,00						
	Sb	0,55	-0,54	0,60	-0,37	-0,07	-0,09	-0,24	-0,06	1,00					
	Te	-0,12	0,51	0,13	0,36	0,48	0,38	-0,53	0,21	-0,37	1,00				
	Pt	-0,59	-0,46	0,48	-0,44	-0,06	-0,44	0,40	-0,55	0,08	0,12	1,00			
	Au	0,27	0,27	-0,40	0,04	0,06	0,09	-0,22	0,62	-0,05	-0,32	-0,78	1,00		
	Hg	-0,61	-0,26	-0,11	-0,21	-0,02	0,00	0,52	-0,73	-0,27	0,08	0,71	-0,69	1,00	
	Pb	-0,62	-0,29	0,26	-0,63	-0,16	-0,86	0,66	-0,12	-0,03	-0,49	0,48	0,05	0,16	1,00
Bi	0,27	-0,53	0,56	-0,58	-0,35	-0,33	0,18	-0,45	0,79	-0,35	0,25	-0,11	-0,05	0,19	1,00
Ccp 4 N: 6	S	1,00													
	Fe	0,74	1,00												
	Ni	0,12	-0,43	1,00											
	Cu	-0,54	-0,39	-0,24	1,00										
	Zn	0,71	0,66	-0,08	0,16	1,00									
	As	-0,55	-0,72	0,01	0,06	-0,76	1,00								
	Pd	0,02	0,02	-0,62	0,35	0,11	0,40	1,00							
	Ag	-0,01	-0,21	0,68	-0,22	-0,15	-0,31	-0,71	1,00						
	Sb	0,58	-0,01	0,53	-0,19	0,33	-0,13	0,10	0,43	1,00					
	Te	-0,15	0,28	-0,30	-0,10	-0,03	-0,11	-0,29	-0,44	-0,85	1,00				
	Pt	-0,84	-0,88	0,18	0,23	-0,88	0,73	-0,03	0,28	-0,14	-0,26	1,00			
	Au	0,06	0,20	-0,05	-0,01	0,22	-0,08	-0,19	-0,52	-0,57	0,87	-0,41	1,00		
	Hg	-0,35	-0,04	-0,37	-0,34	-0,69	0,30	0,04	0,17	-0,25	-0,08	0,50	-0,52	1,00	
	Pb	0,40	0,66	-0,07	0,00	0,64	-0,97	-0,41	0,39	0,06	0,07	-0,59	-0,05	-0,14	1,00
Bi	-0,56	-0,90	0,49	-0,03	-0,81	0,85	-0,08	0,19	0,05	-0,21	0,84	-0,16	0,20	-0,81	1,00

Os valores numéricos correspondem ao r. Os valores em negrito correspondem às correlações mais significativas dentre o espaço amostral, levando em consideração $p < 0,05$. Ccp 1: cristais de calcopirita não associados ao ouro; Ccp 4: cristais de calcopirita associados a galena. N: número de cristais analisados.