

**COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS
DIRETORIA DE GEOLOGIA E RECURSOS MINERAIS
DEPARTAMENTO DE RECURSOS MINERAIS**

RELATÓRIO PARCIAL DE ATIVIDADES

**CONTROLES ESTRUTURAIS DAS MINERALIZAÇÕES DE COBRE-OURO DO LINEAMENTO
CINZENTO, PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS**

Felipe Mattos Tavares
DIGECO

Iago Souza Lima Costa
DISEGE

Junny Kyley Mastop Oliveira
GEREMI-SUREG-BE

Dezembro de 2015

SUMÁRIO EXECUTIVO

- 1) A Província Mineral de Carajás abriga expressiva concentração de depósitos de Cu-Au de alta tonelagem, especialmente do tipo IOCG (*Iron Oxide – Copper – Gold*), estruturalmente controlados e majoritariamente agrupados em dois corredores estruturais principais, conhecidos como cinturões Norte e Sul do Cobre;
- 2) Os depósitos do Cinturão Norte do Cobre se distribuem ao longo do Lineamento Cinzento, um sistema deformacional complexo de evolução tectônica polifásica, que registrou diversos eventos alternados de extensão e contração ocorridos entre o Neoarqueano e o Paleoproterozoico;
- 3) Os litotipos que hospedam as zonas mineralizadas no Lineamento Cinzento são neoarqueanos, tratando-se de fragmentos de sequências metavulcanossedimentares da associação de topo do Supergrupo Itacaiúnas, imbricados tectonicamente com granitoides gnaissificados, pertencentes ao Metagranito Igarapé Gelado. Ocorrem também corpos graníticos paleoproterozoicos da Suíte Intrusiva Serra dos Carajás, que não hospedam mineralizações e que cortam a trama dúctil principal;
- 4) Os três principais eventos mineralizantes para Cu-Au reconhecidos na região do Lineamento Cinzento são o de caráter singenético, síncrono à deposição das sequências do Supergrupo Itacaiúnas, em 2,76 a 2,73 Ga (p. ex. depósito Pojuca); o evento principal, do tipo IOCG, em 2,61 a 2,55 Ga (p. ex. Salobo, Grota Funda, Paulo Afonso, Furnas, GT-46); e o relativo a remobilizações tardias, ao redor de 1,88 Ga, síncrono à colocação dos granitoides da Suíte Intrusiva Serra dos Carajás (p. ex. Gameleira);
- 5) Todos os eventos hidrotermais que produziram e/ou remobilizaram mineralizações de Cu-Au – singenético, IOCG e remobilizações tardias – são correlacionáveis a episódios de tectônica extensional, conforme caracterizado neste trabalho;
- 6) A interpretação funcional de lineamentos magnéticos, consistidos com anomalias de relevo, se mostrou eficaz no mapeamento e hierarquização de estruturas (zonas de cisalhamento, feixes de falhas, fraturas) e zonas magnéticas;
- 7) Os principais depósitos IOCG do Lineamento Cinzento (Salobo, Paulo Afonso e Furnas) estão em zonas de alta densidade de lineamentos magnéticos, exibindo valores muito altos de amplitude de sinal analítico (7 a 17 vezes superiores à média regional) e de urânio anômalo (50% a 120% superiores à média), embora os valores de potássio anômalo e de Fator F sejam algo divergentes, apresentando-se altos nos depósitos Salobo e Furnas e relativamente baixos no depósito Paulo Afonso;
- 8) Todas as unidades litológicas do Neoarqueano, assim como as mineralizações singenética e do tipo IOCG, foram deformadas e metamorfasadas em fácies anfíbolito, durante a Orogênese Transamazônica, entre 2,10 e 2,07 Ga, em regime tectônico compressivo a transpressivo, com transporte tectônico de topo para SW, sendo possível observar uma

forte correlação das zonas mineralizadas com as principais zonas de cisalhamento transamazônicas;

- 9) Um segundo evento tectônico compressivo, pós-transamazônico, também afetou a área do Lineamento Cinzento, sendo responsável por pares de zonas de cisalhamento reversas-obliquas, com transporte tectônico de topo para NW;
- 10) Os depósitos IOCG Salobo e Furnas são majoritariamente hospedados por formações ferríferas de fácies óxido a silicato. Os mesmos litotipos também ocorrem, em menor proporção, no depósito Paulo Afonso. As mineralizações são lentiformes e estão dispostas ao longo de zonas de cisalhamento transamazônicas, estiradas e onduladas, por vezes milonitizadas e localmente segmentadas por zonas de cisalhamento pós-transamazônicas;
- 11) As estruturas dúcteis transamazônicas e pós-transamazônicas foram tardiamente reativadas ao redor de 1,88, em regime extensional, sendo reaproveitadas como condutos preferenciais para a percolação de fluidos meteóricos e magmáticos-hidrotermais e para a precipitação de minério remobilizado de fontes mais antigas, processo amplamente documentado em lâminas polidas do depósito Salobo;
- 12) Os jazimentos mais importantes possuem características mistas de dois ou mais sistemas mineralizantes superpostos, de épocas metalogenéticas distintas, sugerindo que a recorrência tectônica ao longo do Lineamento Cinzento foi um dos fatores determinantes para a distribuição anômala de grandes depósitos de Cu-Au no Corredor Norte do Cobre;
- 13) A partir da caracterização geológico-geofísica dos depósitos conhecidos, foi possível apontar dois tipos de alvos para *follow up* em campo: zonas potenciais para depósitos IOCG e áreas prospectáveis para depósitos gerados por remobilização tardia.

INTRODUÇÃO

A Província Mineral de Carajás abriga expressiva concentração de depósitos de Cu-Au de alta tonelagem, especialmente do tipo IOCG (*Iron Oxide – Copper – Gold*), estruturalmente controlados e majoritariamente agrupados em dois corredores estruturais principais, conhecidos como cinturões Norte e Sul do Cobre. Os depósitos do Cinturão Norte do Cobre se distribuem ao longo do Lineamento Cinzento, um sistema deformacional complexo que registrou diversos eventos tectônicos entre o Neoarqueano e o Paleoproterozoico (Fig. 1).

Desde 2008, o Serviço Geológico do Brasil – CPRM – retomou o estudo sistemático da Província Mineral de Carajás, tendo disponibilizado até o momento três cartas geológicas na escala de 1:100.000 da sua porção nordeste (folhas Serra Pelada, Rio Verde e Serra dos Carajás). Em 2015, três novos produtos temáticos foram gerados: mapa de integração geológico-geofísica da porção norte da Província Carajás (Domínio Carajás), relatório de avaliação dos controles tectonoestratigráficos das mineralizações de manganês e o mapa geológico-estrutural da região do Lineamento Cinzento.

Este relatório tem por objetivo divulgar os avanços técnicos alcançados pela CPRM ao longo de 2015 sobre o entendimento dos controles estruturais das mineralizações de Cu-Au contidas no Lineamento Cinzento. Trata-se de material suplementar ao mapa geológico-estrutural ora divulgado. Cabe ressaltar, entretanto, que as observações aqui expostas ainda são parciais e cabíveis de alterações, pois a análise geológico-geofísica da região segue em andamento.

Unidades litoestratigráficas afetadas pelo Lineamento Cinzento

Os litotipos que hospedam as zonas mineralizadas no Lineamento Cinzento são neoarqueanos, tratando-se de fragmentos de sequências metavulcanossedimentares do Supergrupo Itacaiúnas (DOCEGEO, 1988), em especial litotipos metassedimentares clasto-químicos (quartzitos, quartzo-xistos, metacherts, formações ferríferas de fácies óxido e silicato, xistos aluminosos, grafita-xistos) e em menor proporção anfibolitos e metavulcânicas ácidas, imbricados tectonicamente com granitoides gnaissificados, subalcalinos, semelhantes aos do tipo A, pertencentes ao Metagranito Igarapé Gelado (Barbosa, 2004).

Ocorrem também corpos graníticos paleoproterozoicos da Suíte Intrusiva Serra dos Carajás (Dall’Agnol et al, 2005), como os granitos Cigano, Pojuca e *Young Salobo*, que não hospedam mineralizações e que cortam a trama dúctil principal.

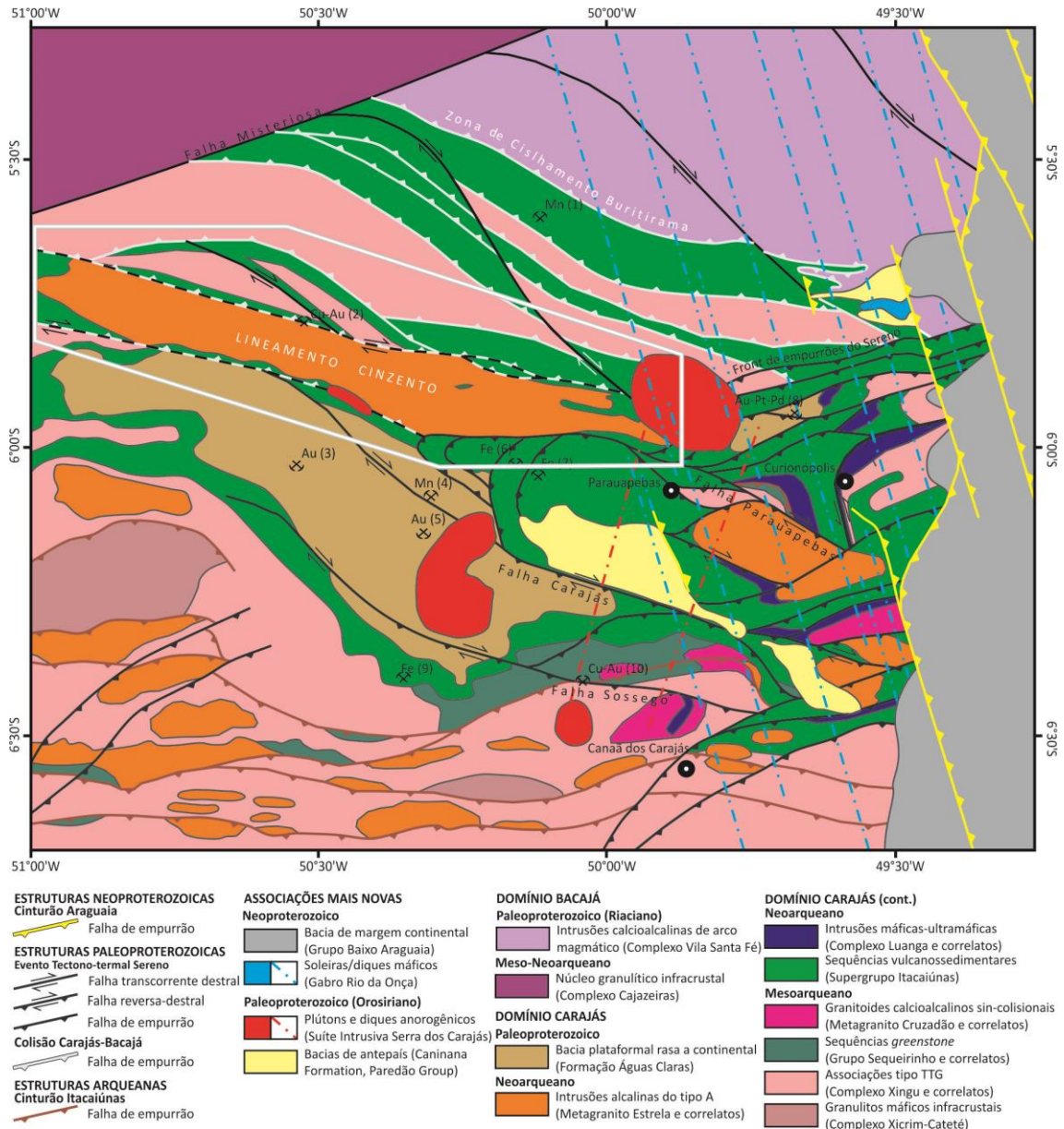


Figura 1: Mapa de associações tectonoestratigráficas do nordeste da Província Carajás e entorno. Minas e garimpos ativos/inativos estão indicados junto com a principal substância extraída: (1) Buritirama, (2) Salobo, (3) Igarapé Bahia, (4) Azul, (5) Águas Claras, (6) N4, (7) N5, (8) Serra Pelada, (9) S11D, (10) Sossego. Modificado de Tavares (2015). A área de estudo está marcada pelo polígono branco.

Depósitos de Cu-Au do Cinturão Norte do Cobre

Há três principais eventos mineralizantes para Cu-Au reconhecidos na região do Lineamento Cinzento, conforme descrito na literatura. O mais antigo é o de caráter singenético, síncrono à deposição das sequências do Supergrupo Itacaiúnas, em 2,76 a 2,73 Ga, bem representado pelo depósito Pojuca (DOCEGEO, 1988).

O evento de mineralização principal, do tipo IOCG, ocorreu em 2,61 a 2,55 Ga e gerou diversos depósitos, como Salobo, de classe mundial (1112 Mt @ 0,69 wt% Cu, 0,43 g/t Au, 55 g/t Ag; VALE, 2012), GT-46 (Silva *et al.*, 2005), Grota Funda, Paulo Afonso e Furnas.

O evento mais novo é correlacionado a remobilizações tardias, ao redor de 1,88 Ga, síncrono à colocação dos granitoides da Suíte Intrusiva Serra dos Carajás. O exemplo de mineralização mais bem documentado desta geração é depósito Gameleira (Lindenmayer *et al.*, 2001).

Cabe ressaltar que diversos depósitos possuem características mistas de duas ou mais épocas metalogenéticas, como o depósito Pojuca, onde Schwartz e Frantz (2011) reconheceram mineralizações tanto do tipo VMS (*volcanic massive sulfide*), singenética, como brechas hidrotermais do tipo IOCG. Na mesma região, contíguo ao depósito Pojuca, ocorre ainda o depósito Gameleira.

Trabalhos anteriores de Geologia Estrutural

Costa e Siqueira (1990) definiram o Lineamento Cinzento como um feixe de zonas de cisalhamento sinistrais, associadas a duplexes compressivos e distensivos (Cururu e Salobo, respectivamente) e a uma terminação em rabo de cavalo compressivo (rabo de cavalo Serra Pelada), desenvolvidos no final do Neoarqueano. Aqueles autores correlacionaram a evolução do Lineamento Cinzento ao Cinturão Itacaiúnas, de Araújo *et al.* (1988), compreendido como um conjunto de grandes transcorrências e empurrões oblíquos relacionados a um hipotético orógeno colisional que se estenderia para norte, sobre o Domínio Bacajá. Interpretação semelhante foi adotada por Pinheiro e Holdsworth (2000), que identificaram ainda reativações tardias no Paleoproterozoico.

Tavares (2015), ao estudar a evolução tectônica do limite entre as províncias Carajás e Transamazonas, propôs alternativamente que a estruturação principal do Lineamento Cinzento foi compressiva e associada ao Evento Transamazônico (2,10 a 2,07 Ga), a partir de datações pelo método Ar-Ar de minerais metamórficos que marcam a foliação dúctil regional. O mesmo autor identificou ainda uma segunda fase dúctil, pós-transamazônica e anterior à granitogênese de 1,88 Ga, denominada como Evento Tectono-termal Sereno.

GEOFÍSICA

Neste trabalho, foram utilizados dados aeromagnetométricos e aerogamaespectrométricos de alta resolução obtidos pela CPRM. A área do projeto é abrangida pelos projetos aerogeofísicos Oeste de Carajás, Rio Maria e Tucuruí. Todos estes projetos possuem 500 metros de espaçamento entre as linhas de voo, 10 km entre as linhas de controle e altura de voo de 100 metros. Inicialmente foram efetuados pré-processamentos para cada projeto separadamente utilizando o software Oasis Montaj. O pré-processamento tem como base a análise de ruídos, interpolação e aplicação de filtros para micronivelamento dos dados.

Aerogamaespectrometria

A emissão de raios gamas proveniente dos radioelementos K, Th e U sofre variações devido a fatores ambientais como: sobrecargas não radioativas; temperatura e pressão atmosférica; precipitação e umidade do solo (Minty, 1997). Estes fatores variam de acordo com a época do ano, assim, quando se utiliza dados aerogamaespectrométricos de diferentes projetos é necessária uma compensação dos mesmos. Para a compensação, foi determinada uma relação linear entre os dados de uma área de intersecção entre os projetos, que foi aplicada para o restante dos dados. Esta correção permite a união com eficácia dos dados gamaespectrométricos utilizando o algoritmo Grid Knitting (*Oasis Montaj*).

Após a união dos projetos foram gerados os produtos de concentração de K, eTh, eU; as razões eU/eTh, eU/K, eTh/K e a composição ternária RGB (K, eTh, eU) para constituir a base da interpretação geofísico-geológica (Fig. 2). A partir da interpretação a área foi classificada em unidades geofísico-geológicas, para as quais foram gerados mapas de Potássio e Urânio anômalos e Parâmetro F. É importante ressaltar que estes produtos sejam gerados individualmente para cada unidade interpretada, evitando um mascaramento de anomalias gerado por diferença de composição e outros fatores específicos de cada litologia.

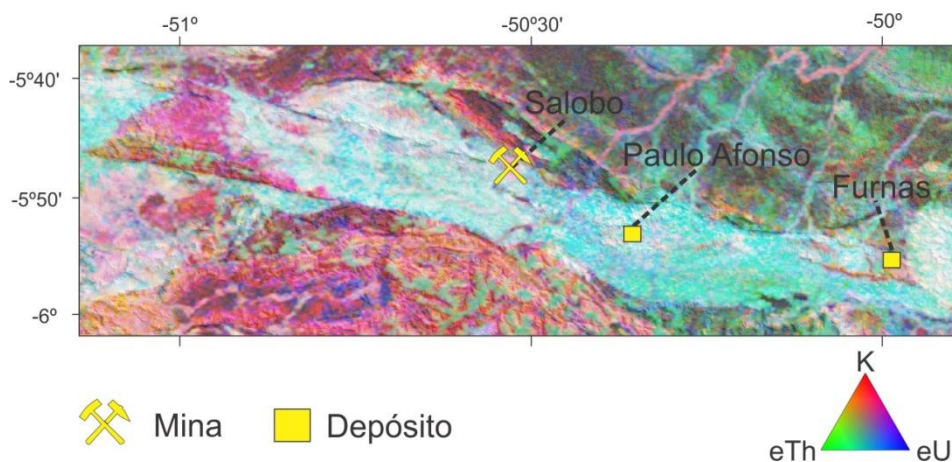


Figura 2: Composição ternária RGB de Potássio(K), Tório (eTh) e Urânio (eU) para a região do Lineamento Cinzento, com os principais depósitos em destaque.

Potássio e Urânio Anômalos

De acordo com Saunders *et al* (1993), assume-se que os fatores ambientais que influenciam na concentração de tório (Th), influenciam de maneira previsível no potássio (K) e no urânio (U). A partir destas observações Saunders *et al* (1993) testou várias funções (logarítmica, polinomial de ordem N, etc.) que indicassem essa relação e concluiu que a melhor função para definir a relação entre K, U e Th é uma equação linear que passa pela origem. Estas equações lineares podem ser escritas na forma de:

$$K_i = \frac{(\text{média de } K_s)}{(\text{média de } Th)} \times (Th)$$

$$U_i = \frac{(\text{média de } U)}{(\text{média de } Th)} \times (Th)$$

onde K_i e U_i são valores ideais definidos a partir do tório (K_s , U_s e Th são os valores adquiridos no levantamento). Assim, presume-se que todos os valores anômalos não estão correlacionados a litologia ou fatores ambientais. Para o cálculo dos desvios reais dos valores ideais, são utilizadas as seguintes equações:

$$K_D = \frac{(K - K_i)}{(K_i)}$$

$$U_D = \frac{(U - U_i)}{(U_i)}$$

onde K_D e U_D (Fig. 3) são os desvios em porcentagem decimal entre os valores reais e os ideais.

Parâmetro F

Como já descrito por Gnojek e Prichystal (1985) as razões Th/U e U/K não são muito usuais em estudos de regiões com enriquecimento de potássio, pois não diferem suficientemente os limites dos mesmos. As informações mais importantes são inferidas a partir do mapa de Th/K devido ao antagonismo no comportamento destes elementos descrito por Ostrovsky (1973).

O enriquecimento de urânio em relação à razão Th/K e o enriquecimento de potássio em relação à razão Th/U pode ser analisado no **Parâmetro F** (Fig. 3) descrito por Effimov (1978; ver Gnojek e Prichystal, 1985). O Parâmetro F pode ser expresso pela relação:

$$F = \frac{K \times U}{Th} = \frac{K}{Th/U} = \frac{U}{Th/K}$$

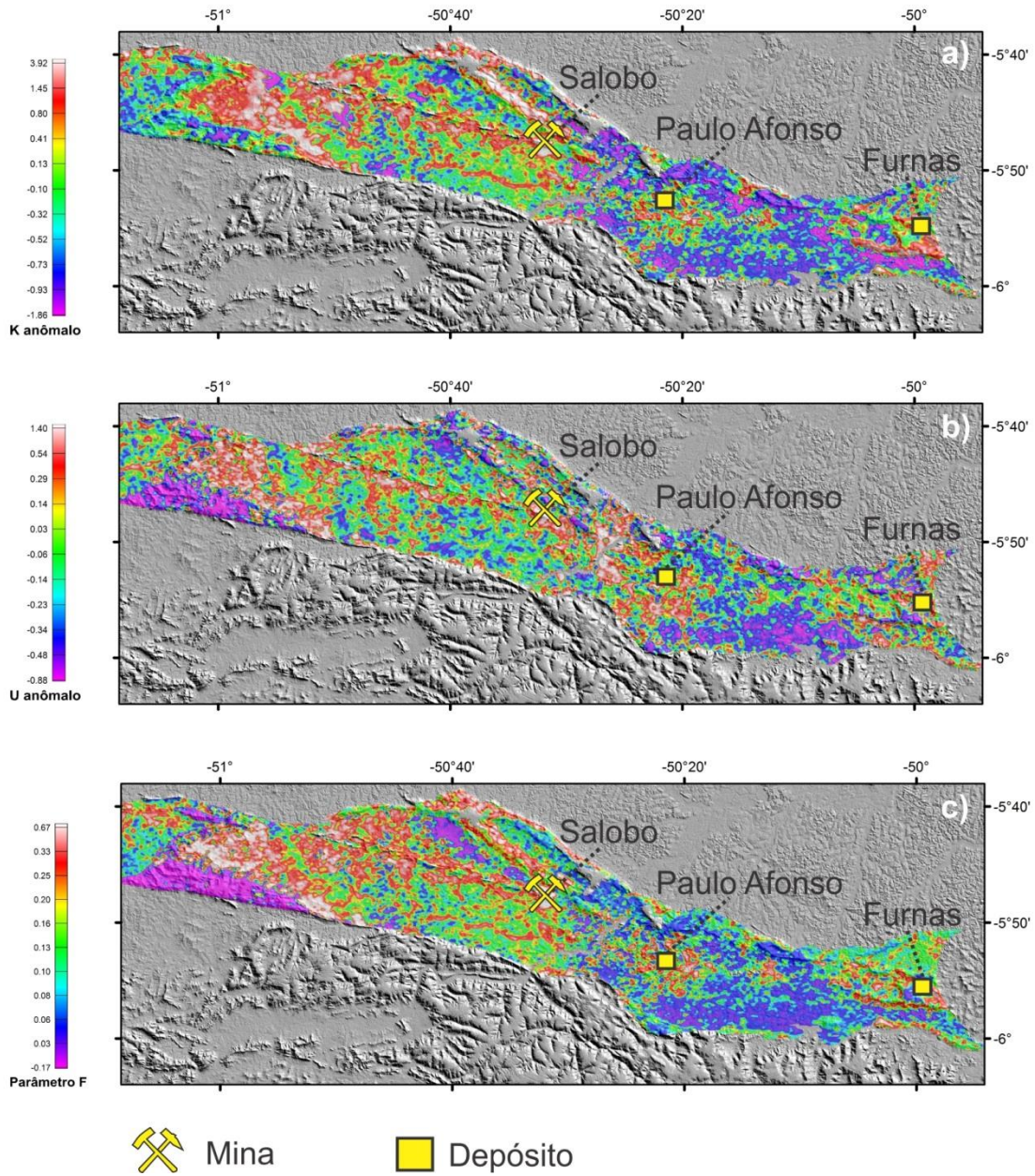


Figura 3: Produtos gamaespectrométricos para análise de concentração anômala de potássio e urânio com os principais depósitos e minas. a) mapa de potássio anômalo; b) urânio anômalo; c) Parâmetro F.

Aeromagnetometria

Os principais produtos foram gerados do Campo Magnético Anômalo reduzido do IGRF (CMA), destacando-se 1ª e 2ª derivada vertical, Amplitude do Sinal Analítico (ASA) (Fig. 4) e a Inclinação do Sinal Analítico (ISA). Estes produtos em conjunto com os aerogamaespectrométricos formaram a base da interpretação geofísico-geológica.

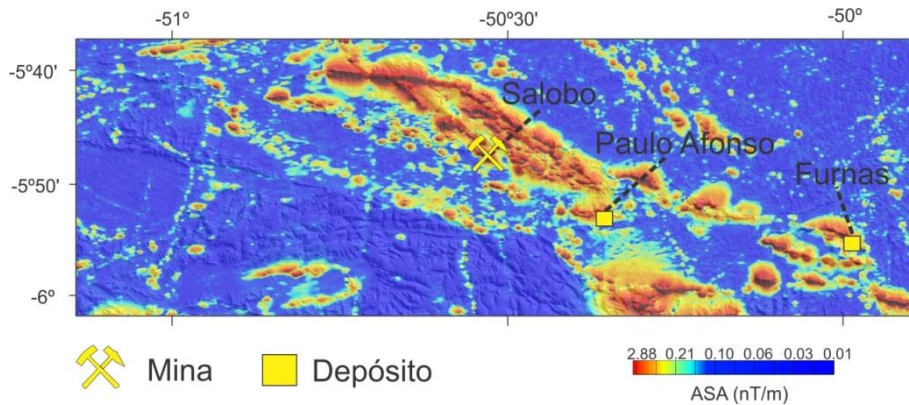


Figura 4: Mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA) sobre o SRTM para a região do Lineamento Cinzento, com os principais depósitos em destaque.

Interpretação de lineamentos magnéticos

Neste trabalho foi utilizada uma interpretação estrutural de lineamentos magnéticos denominada “Interpretação magnética funcional”. Esta interpretação tem como base classificar os lineamentos magnéticos baseado em respostas geológicas conhecidas, no intuito de melhorar a relação geofísico-geológica. Assim, os lineamentos magnéticos são divididos em:

- **Rupturas magnéticas:** São estruturas lineares ou curvilíneas, em geral possuem alta frequência e rompem feições magnéticas (e.g. falhas ou fraturas). Dependendo do processo geológico que afetou as propriedades físicas durante e após a formação da falha, as rupturas podem ser preenchidas ou não por magnetita (Clark *et al.*, 1997; Sánchez *et al.*, 2014).
- **Diques e zonas de deformação:** São extraídas as zonas de deformação e determinada onde a resposta magnetométrica indica o preenchimento dos mesmos por diques.
- **Lineamentos magnéticos:** Os lineamentos magnéticos são caracterizados pelos dipolos magnéticos lineares. O eixo de extração do lineamento no dipolo é estudado previamente caso não seja possível realizar uma redução ao polo.
- **Limites de domínios magnéticos:** É um produto baseado na interpretação do CMA, onde é determinado um limite entre as distintas susceptibilidades magnéticas, que podem estar associadas a limites litológicos.
- **Relevo magnético:** Em alguns casos específicos observam-se padrões direcionais em zonas de susceptibilidade magnética. Estes padrões não estão necessariamente relacionados a dipolos magnéticos lineares. Quando não é possível correlacionar este padrão direcional com dipolos, é utilizado o relevo magnético como forma de mensurar uma possível direção preferencial de minerais magnéticos.

Mesmo com essas classificações definidas, é importante ressaltar que a utilização das mesmas necessita de um caráter crítico dependente do objetivo, ou seja, é necessário observar quais dessas classificações serão funcionais. Neste trabalho, visando os controles estruturais das mineralizações de Cu-Au, foram utilizadas as classificações de ruptura, diques, e lineamentos magnéticos (Fig. 5a). Após a interpretação aerogeofísica, os traços estruturais foram consistidos com anomalias de relevo, extraídas de imagens de radar (SRTM), sombreadas por iluminação a 315° e a 45°.

Para estudar a distribuição espacial dos lineamentos magnéticos consistidos com o relevo, foi aplicada a técnica de análise de densidade espacial utilizando o ArcMap 10.2 (Fig. 5b). A análise de densidade espacial é útil para agrupar lineamentos magnéticos com rupturas e analisar corredores estruturais. Na Figura 5b é possível observar a forte correlação entre as zonas de alta densidade de lineamentos com as ocorrências minerais.

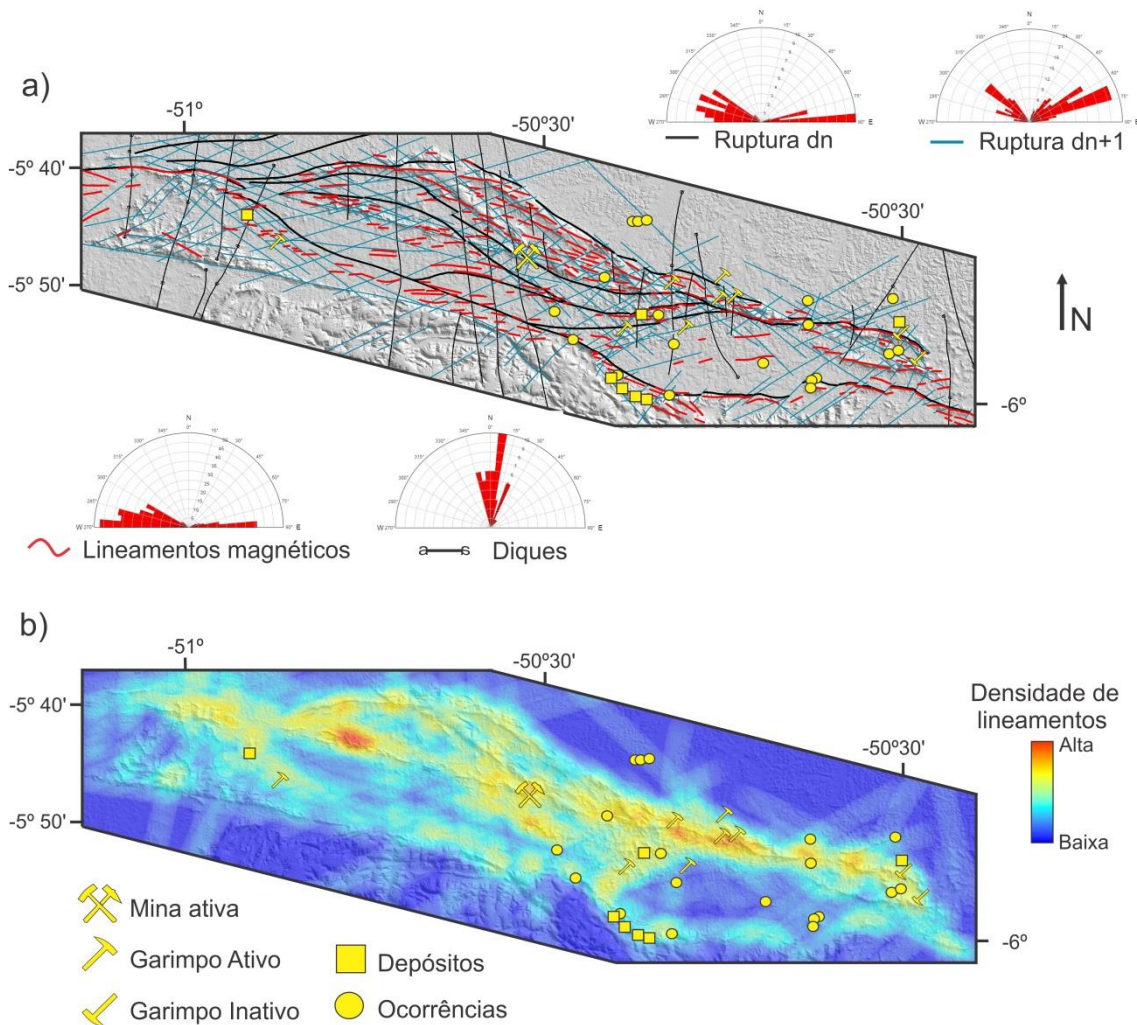


Figura 5: a) Interpretação magnética funcional para o Lineamento Cinzento com os respectivos diagramas de roseta, b) densidade de lineamentos magnéticos interpretados. Foram inseridas as ocorrências minerais em ambos os mapas para estudar sua correlação.

Caracterização geofísica dos principais depósitos

A partir dos produtos gamaespectrométricos e magnetométricos, foram gerados perfis sobre três depósitos IOCG conhecidos da região do Lineamento Cinzento, no intuito de caracterizar a assinatura geofísica dos mesmos. Foram estudados os depósitos Salobo, Paulo Afonso e Furnas. As porcentagens de enriquecimento dos radioelementos são baseadas nos valores de potássio e urânio anômalos.

Salobo

A partir das assinaturas, foi observado que o depósito do Salobo possui um enriquecimento de até 120% de urânio e de até 250% de potássio, além de um alto valor no Parâmetro F. Foram obtidos valores de amplitude do sinal analítico (ASA) de até 66 vezes a média na região da mina (0.3 nT/m), porém parte deste valor está relacionado às influências antrópicas da própria mina. A partir da análise dos dados, verificou-se que 75% da anomalia corresponde a influências antrópicas, resultando num valor médio de 5 nT/m para o depósito em si, 17 vezes a média (Fig. 6a).

Observou-se que a falta de cobertura e o processo de extração na cava principal aumentou em até 450% a captação de potássio pelo sensor gamaespectrométrico. Assim, chegou-se a conclusão que o depósito possui um valor médio de enriquecimento de potássio de 50% a 200%. Valores semelhantes se estendem para noroeste da área da mina, sugerindo a continuação do depósito (Fig. 6b).

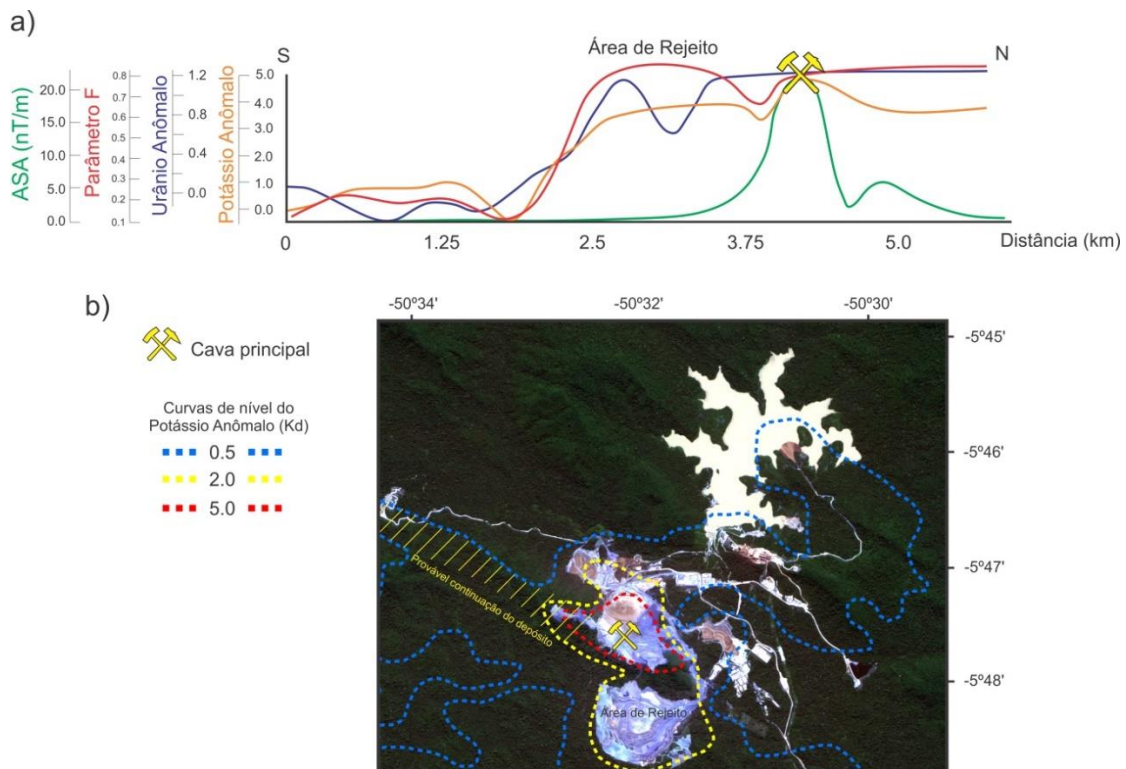


Figura 6: Caracterização da assinatura geofísica da mina do Salobo. Em a) foram gerados perfis geofísicos perpendiculares à mina, na direção S-N. Em b) é possível observar a correlação do enriquecimento de potássio na região da mina e sua possível continuação.

Paulo Afonso

O depósito Paulo Afonso possui um caráter magnético bem expressivo. A amplitude do sinal analítico apresenta um valor de até 2 nT/m (7 vezes a média da região). O depósito possui uma leve correlação com um enriquecimento de urânio de até 50%. Não possui uma relação direta com enriquecimento potássico, porém ao sul do depósito, existe uma anomalia de mais de 250% que possui um caráter magnético também elevado (Fig. 7), que pode representar parte do halo de alteração do depósito. As anomalias de parâmetro F acompanham o potássio anômalo.

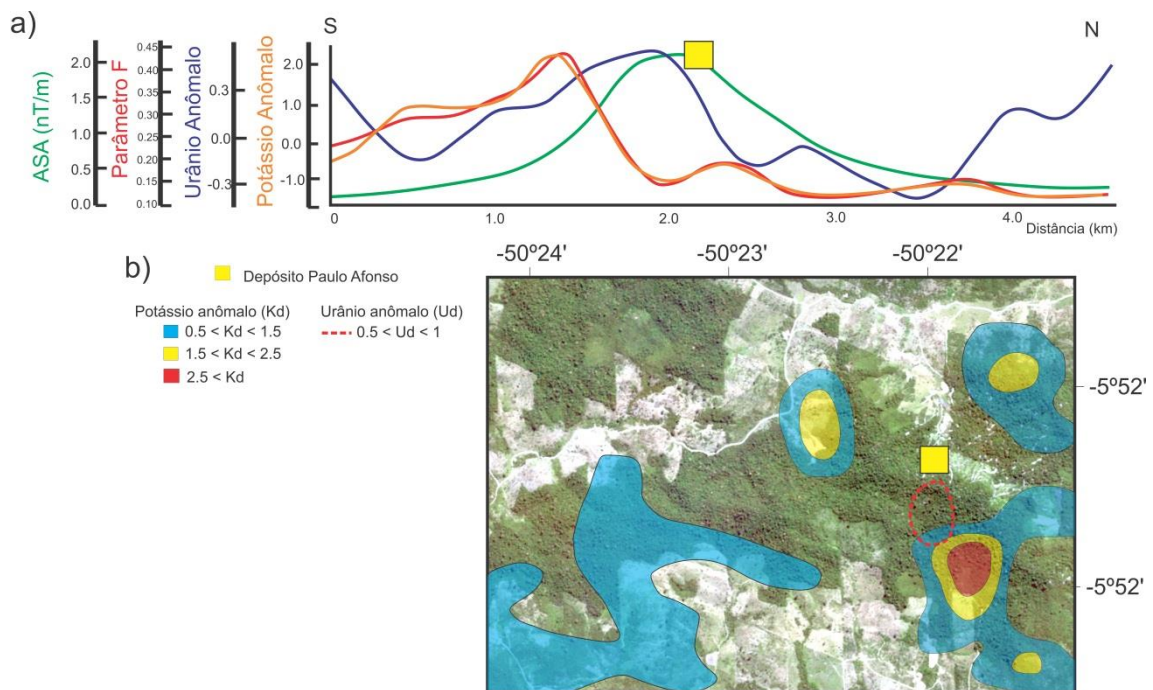


Figura 7: Caracterização da assinatura geofísica do depósito Paulo Afonso. Em a) foram gerados perfis geofísicos perpendiculares ao depósito, na direção S-N. Em b) é possível observar a aparente não correlação entre o enriquecimento de potássio e urânio com o depósito.

Furnas

O depósito Furnas possui um valor de amplitude do sinal analítico de 3.5 nT/m, o que corresponde a 11 vezes a média da região. É possível observar uma alta correlação entre o depósito com enriquecimento de urânio, que pode chegar a até 150% (Fig. 8). A localização do depósito aparentemente não possui correlação direta com enriquecimento de potássio, porém as anomalias de potássio anômalo e parâmetro F tendem a acompanhar a borda do depósito, especialmente na porção sul, podendo representar partes do seu halo de alteração hidrotermal.

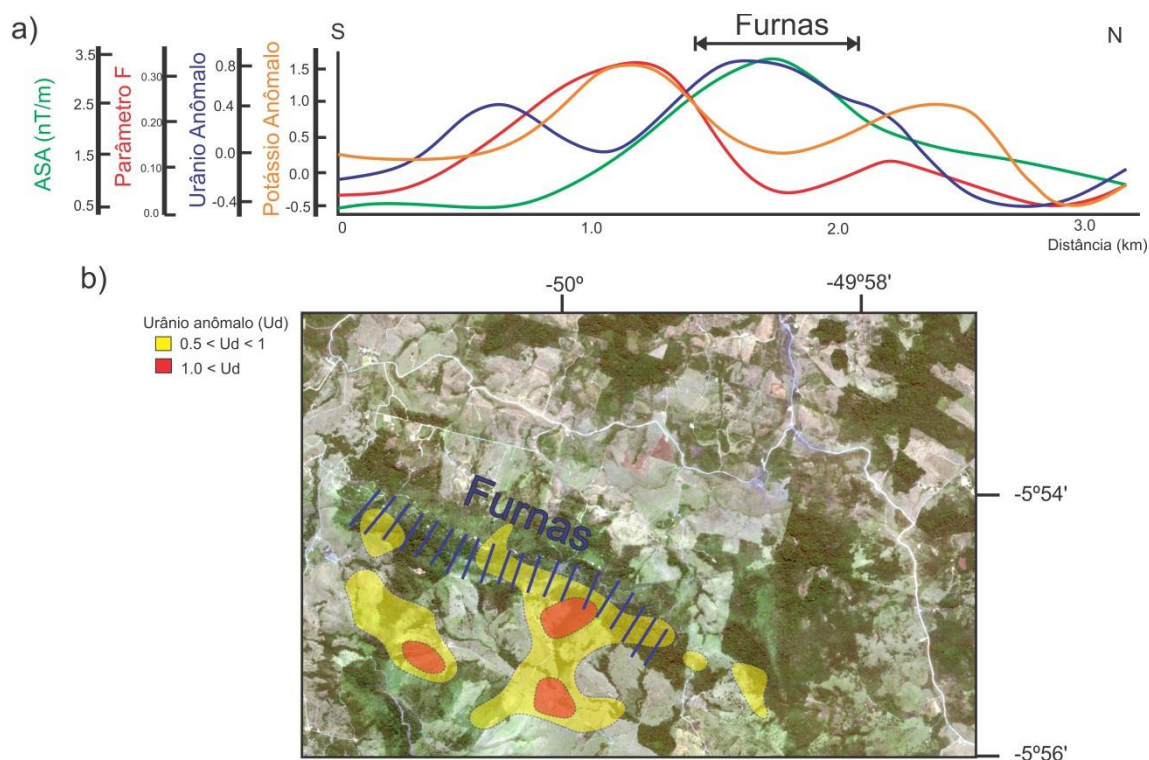


Figura 8: Caracterização da assinatura geofísica do depósito Furnas. Em a) foram gerados perfis geofísicos perpendiculares ao depósito, na direção S-N. Em b) é possível observar correlação entre as anomalias de urânio anômalo e o depósito.

ANÁLISE ESTRUTURAL DA REGIÃO DO LINEAMENTO CINZENTO

O arranjo estrutural regional ao longo do Lineamento Cinzento é complexo e polifásico. Foi possível distinguir quatro famílias de estruturas principais afetando as unidades neoarqueanas, diferente do proposto por Costa e Siqueira (1990) e concordante com a proposta de Tavares (2015). Todas possuem influência na distribuição das zonas mineralizadas, conforme será discutido nesta seção. Uma quinta família de estruturas rúpteis também ocorre, correlata à colocação de diques N-S, porém de maneira pouco expressiva e tardiamente, sem correlação com o controle das mineralizações e que não será analisado neste relatório.

Estruturas anteriores à deformação dúctil principal (pré-Dn)

A família de estruturas mais antiga (pré-Dn) se correlaciona diretamente ao episódio de hidrotermalismo que originou depósitos tipo IOCG. Trata-se de fraturas preenchidas por veios de quartzo \pm feldspato \pm anfibólio (hornblenda) \pm sulfeto (calcopirita, bornita) \pm magnetita (Fig. 9). Veios desta geração podem apresentar extensos halos de alteração hidrotermal sódico-cálcica, com crescimento disseminado de anfibólio e albita nas hospedeiras, além de pequenas quantidades de magnetita, apatita e allanita, indicando tratar-se de feições geradas em ambiente controlado por alta pressão de fluidos.

Os veios pré-Dn afetaram todos os litotipos neoarqueanos. No entanto, a maioria das principais mineralizações (Salobo, Grota Funda, Furnas e parte do depósito Paulo Afonso) está hospedada em fragmentos de sequências metavulcanossedimentares do Supergrupo Itacaiúnas, especialmente em horizontes ricos em formações ferríferas bandadas de fácies óxido e silicato, onde veios de magnetita e de anfibólio + sulfetos são comuns, geralmente concordantes com o bandamento primário (Fig. 10).

Observou-se que as venulações pré-Dn tendem a seguir o *trend* estrutural de fases dúcteis subsequentes (Dn, Dn+1), subparalelos à foliação principal da área, que os atravessa ou deflete ao seu redor. Localmente, são dobradas e/ou cisalhadas (Fig. 11), eventualmente assumindo formas lenticulares, com texturas primárias transpostas ou amplamente obliteradas por eventos tectônicos posteriores. Entretanto, foi possível reconhecer textura de crescimento mineral sintaxial bem preservada a relíquiar em diversos afloramentos, testemunhos de sondagem e lâminas, mostrando que sua colocação ocorreu em ambiente extensional (Fig. 12).

Datações de sulfetos pelos métodos Re-Os e Pb-Pb e monazita por U-Pb, reportados por Réquia *et al.* (2003), Marcshik, *et al.* (2005) e Tallarico *et al.* (2005), indicam idades de 2,61 a 2,57 Ga para o evento de mineralização tipo IOCG no Cinturão Norte do Cobre. Autores como Tallarico *et al.* (2005), Grainger *et al.* (2008) e Grooves *et al.* (2010) apontam correlação temporal e genética das mineralizações com a granitogênese de baixa intensidade representada pelo Granito Velho Salobo (2.573 ± 2 Ma, U-Pb em zircão, Machado *et al.*, 1991). Tais autores, no entanto, correlacionam as mineralizações IOCG à deformação dúctil principal, o que necessita ser revisto diante das observações expostas no presente relatório.



Figura 9: Veio de anfibólio (hornblenda) e sulfeto (bornita), concordante à foliação dúctil principal, em afloramento da cava da mina do Salobo.



Figura 10: veio de anfibólio (hornblenda), quartzo e sulfeto (bornita), concordante com a foliação dúctil principal (Sn), hospedado em ortognaisse. Observa-se disseminação de anfibólio ao redor do veio. Testemunho de sondagem do depósito Salobo (furo FD-310, profundidade 214,55 a 214,75 m).



Figura 11: Veio de quartzo e anfíbólio pré-Dn, dobrado, localmente sendo atravessado na charneira pela foliação dúctil principal (Sn). Testemunho de sondagem do depósito Furnas (furo DH-091, profundidade 76,00-76,15 m)



Figura 12: textura syntaxial semi-preserveda em veio de quartzo e feldspato pré-Dn, subparalelo à foliação dúctil principal (Sn). Nota-se que a porção central do veio foi cisalhada posteriormente à sua cristalização. Afloramento próximo ao depósito Furnas.

Estruturas da trama dúctil principal (Dn)

A trama estrutural principal da área de trabalho (Dn) é dúctil e orientada em média na posição WNW-ESE. É representada por foliações e lineações minerais e/ou de estiramento, dobras apertadas e zonas de cisalhamento reversas-sinistras, associadas a petrotramas metamórficas de fácies anfíbolito. Observa-se forte correlação das estruturas dúcteis medidas em campo com a orientação preferencial de anomalias dipolares e descontinuidades tangenciais à trama magnética, em imagens de aeromagnetometria.

A foliação Sn é contínua, variando desde uma fina xistosidade em litotipos metapelíticos até uma xistosidade grossa, eventualmente convertida em bandamento gnáissico, em metagranitoides (Fig. 13). Nos quartzitos e quartzo-xistos, é marcada por fitas de quartzo recristalizado e por micas (muscovita, biotita) orientadas. Em metapelitos, além de quartzo, muscovita e biotita, podem ainda ocorrer leitos de sillimanita (localmente fibrolita) e granada, além de raras ocorrências de porfiroblastos pré- a sin-tectônicos de andaluzita, parcialmente substituídos por sillimanita. Formações ferríferas apresentam intercrescimento estável de grunerita orientada e porfiroblastos de granada com inclusões frequentes de magnetita, quartzo e grunerita (Figs. 14, 15). Também ocorrem leitos interdigitados de magnetita e bandas ricas em quartzo recristalizado. A foliação Sn deflete ao redor dos porfiroblastos de granada, indicando caráter sin a tardi-tectônico para seu crescimento, em relação a Dn. Em granitoides gnaissificados, Sn é marcada pelo crescimento/recristalização de biotita e hornblenda, orientadas, bem como por fitas de quartzo. Feldspatos (microclima, plagioclásio) ocorrem parcialmente recristalizados, com formação de subgrãos e de novos grãos, ocorrendo localmente fitados, ao longo de zonas de cisalhamento sin-Dn. Foi possível medir 141 planos de foliação Sn. Em estereograma, observa-se que a média de medidas mergulha moderada a íngreme para NNE, de maneira consistente, havendo também um conjunto menor de medidas com mergulho íngreme para SSW (Fig. 16a).

A lineação mineral e/ou de estiramento Ln é *down dip* a oblíqua em relação a Sn, sendo mais visível ao longo ou próximo das zonas de cisalhamento sin-Dn, onde os litotipos podem assumir feição de L-tectonitos. Em estereograma, as 57 medidas de Ln mostram, em média, caimento suave a moderado para ENE, com relevante espalhamento horário das medidas, resultante de retrabalhamento durante Dn+1 (Fig. 16b).

Relações tipo S/C observadas em campo e em lâmina delgada, bem como assimetrias em sombras de pressão de porfiroblastos de granada e tramas oblíquas em fitas de quartzo e feldspato, indicam cinemática *up-dip* para Dn. O ângulo entre a média do mergulho de Sn com o caimento de Ln, em torno de 35°, associado ao componente *up dip* de indicadores cinemáticos, mostra componente transpressivo sinistral, porém com domínio do vetor compressivo.

O conjunto de dados apresentados indica que Dn ocorreu sob regime tectônico compressivo a transpressivo, com vetor de encurtamento σ_1 na direção média NW-SE e transporte tectônico de topo para SW. Regionalmente, observa-se que Dn se propaga para norte, estando também registrado em rochas do Domínio Bacajá, podendo ser correlacionada à deformação transamazônica relativa ao evento colisional entre os blocos Carajás e Bacajá, entre 2,10 e 2,07 Ga, descrita por Tavares (2015) para a região.



Figura 13: Xistosidade grossa (Sn) marcada por planos contínuos a levemente anastomosados de biotita e por cristais amendoados de feldspato. Afloramento próximo ao depósito Furnas.



Figura 14: xistosidade fina a média em formação ferrífera bandada de fácies silicato do depósito Salobo. A foliação deflete ao redor dos porfiroblastos de granada. Testemunho de sondagem do depósito Salobo (Furo FD-310, profundidade de 340,03 a 340,10 m)

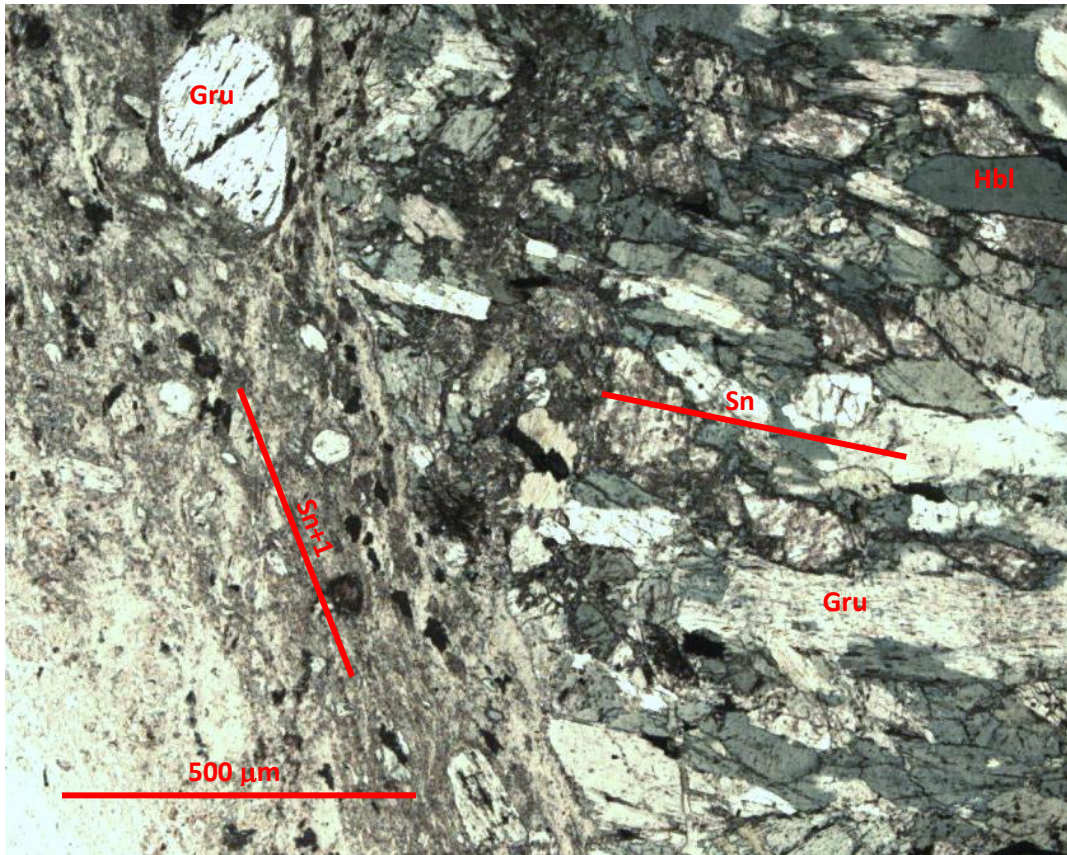


Figura 15: Foliação dúctil de fácies anfibolito, contínua (Sn), marcada pelo intercrescimento de grunerita e hornblenda, sendo cortada por banda de cisalhamento ultramilonítica Dn+1. Lâmina delgada de testemunho de sondagem do depósito Salobo.

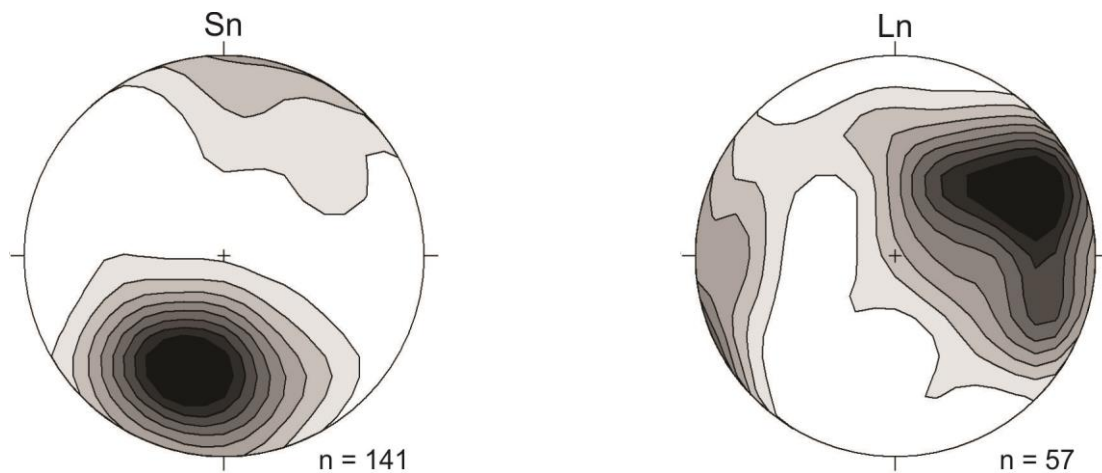


Figura 16: a) estereograma de polos de medidas da foliação Sn, mostrando mergulho médio moderado a íngreme para NNE; b) estereograma de medidas da lineação Ln, com caimento médio suave a moderado para ENE.

Estruturas dúcteis-rúpteis posteriores à deformação principal (Dn+1)

Uma segunda trama de estruturas dúcteis a dúcteis-rúpteis (Dn+1) foi reconhecida na região do Lineamento Cinzento, desenvolvida sob condições metamórficas de fácies xisto verde baixo, conseqüentemente apresentando estilo tectônico distinto ao descrito para Dn. O registro de Dn+1 é uma clivagem de crenulação pouco penetrativa, desenvolvida preferencialmente em litotipos paraderivados de baixa competência, além de dobras assimétricas e feixes de bandas de cisalhamento e zonas de falhas oblíquas, transpressivas, em pares conjugados.

A foliação Sn+1 é uma clivagem de crenulação pouco penetrativa, marcada em litotipos micáceos por microdobras assimétricas que retrabalham Sn, em geral com eixo sub-horizontal, se repetindo até a escala de afloramento (Figs. 17, 18). Bandas de cisalhamento contemporâneas se instalam em posição plano-axial, eventualmente rompendo flancos de dobras Dn+1, localmente com desenvolvimento de ultramilonitos de baixa temperatura.

Todas as feições planares correlacionáveis a Dn+1 estão orientadas nas direções principais ENE-WSW e WNW-ESE (a NW-SE). As feições orientadas na posição ENE-WSW apresentam mergulho suave a moderado, tanto para NNW quanto para SSE. Bandas de cisalhamento e falhas de empurrão possuem cinemática predominantemente reversa e minoritariamente sinistral (Fig. 19). Já as feições orientadas na posição WNW-ESE apresentam mergulhos moderados a íngremes para NNE e para SSW. Bandas de cisalhamento apresentam cinemática reversa-destral (Fig. 20), com maior domínio do vetor compressivo em zonas de orientação mais próxima à direção NW-SE e componente transcorrente mais significativo naquelas próximas à direção WNW-ESE. Em estereograma, as 32 medidas de foliações e bandas de cisalhamento Dn+1 mostram quatro concentrações preferenciais, de mergulho moderado a íngreme para NNW, NNE, SSW e SSE, com maior domínio das feições que mergulham para NNW e SSE (Fig. 21).

Em imagens de aeromagnetometria, as feições Dn+1 são discretas descontinuidades na trama magnética principal, em X, oblíquas a ortogonais às feições dipolares correlatas a Dn. Observou-se que, eventualmente, foliações Sn ocorrem reorientadas para uma posição paralela às estruturas Dn+1, quando cortadas por descontinuidades desta geração. Ambos os conjuntos de feições Dn+1 parecem síncronos, pois não se observou relações de corte entre elas, mas sim de continuidade.

A resultante do somatório dos vetores compressivos sugerem encurtamento (σ_1) na direção NNW-SSE a NW-SE. Entende-se que feixes de zonas de cisalhamento desta geração seccionam em blocos toda a região, cada um com movimento cavalgante diferencial de topo para NW em relação aos vizinhos imediatos.

Dn+1 possui a mesma relação temporal (pós-transamazônico e pré-granitogênese de 1,88 Ga), o mesmo vetor σ_1 e direção de transporte tectônico que o Evento Tectono-termal Sereno, de Tavares (2015), datado por aquele autor entre 2,00 e 1,95 Ga, pelo método Ar-Ar, a partir da determinação de idade de minerais metamórficos.



Figura 17: clivagem de crenulação S_{n+1} em formação ferrífera de fácies silicato do depósito Furnas. Testemunho de sondagem (furo DH-091, profundidade de 133,04 a 133,30 m)

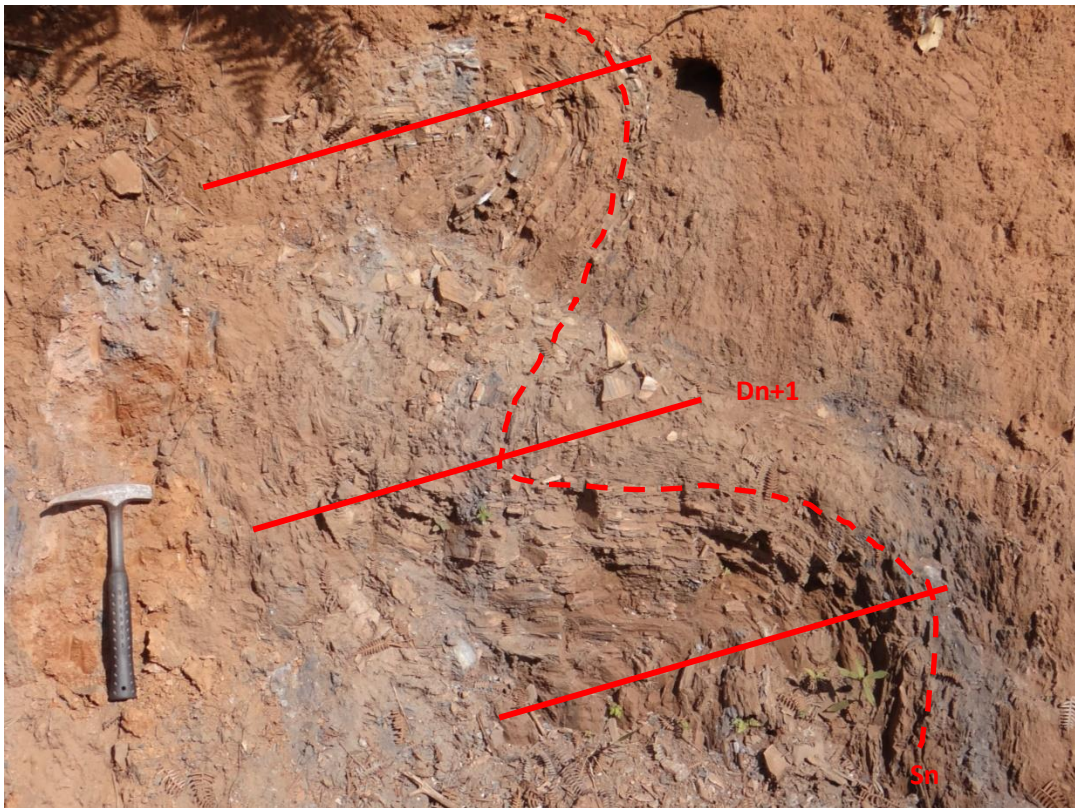


Figura 18: dobras recumbentes assimétricas S_n - D_{n+1} , afetando pacote de quartzitos e xistos grafitosos. Corte na estrada do Garimpo das Pedras, Serra do Cururu.



Figura 19: zona de cisalhamento milonítica Dn+1, de cinemática aparente sinistral em planta (a resultante é reversa-sinistral). Afloramento de ortognaisse, próximo ao depósito Paulo Afonso.



Figura 20: banda de cisalhamento reversa-destal Dn+1, cortando ortognaisse. Nota-se material ultramilonítico escuro ao longo da estrutura. Afloramento próximo ao depósito Furnas.

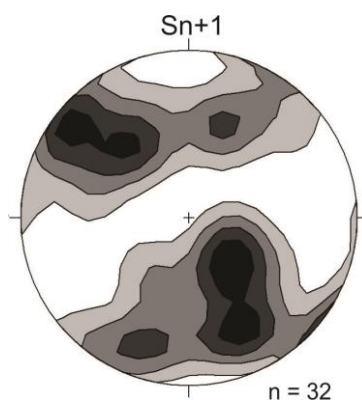


Figura 21: Estereograma dos polos das medidas de foliações S_{n+1} e bandas de cisalhamento D_{n+1} , mostrando quatro pontos de concentração de medidas.

Estruturas rúpteis tardias (pós- D_{n+1})

Falhas e fraturas de natureza extensional a transtraccional, rúpteis e posteriores a D_{n+1} ocorrem em pares conjugados por toda a região do Lineamento Cinzento. Em parte, acompanham as tramas dúcteis pretéritas (D_n , D_{n+1}), eventualmente rompendo-as.

Em estereograma, 33 medidas de falhas e fraturas mostram as duas direções principais de pares conjugados subverticais, NNW-SSE e ENE-SSW (Fig. 22). Fraturas pós- D_{n+1} de natureza extensional exibem texturas bem preservadas de crescimento mineral sintaxial, inclusive com cavidades abertas (Fig. 23). Falhas tendem a ser transcorrentes, de cinemática destal a normal-destal, com formação de texturas brechoides e localmente pseudotaquilitos.

É comum o preenchimento de fraturas pós- D_{n+1} por quartzo, clorita, epidoto, albita e especularita. Podem ocorrer com menos frequência calcopirita, bornita e/ou malaquita (Fig. 24). Próximo ou junto às zonas sulfetadas, ainda ocorre escapolita, biotita, estilplomelana, carbonato, sericita, apatita, allanita e fluorita (Fig. 25). Halos de alteração podem conter sericita, estilplomelana e clorita, ocorrendo disseminados e/ou pseudomorfizando cristais metamórficos de fases anteriores, além de silicificação.

A estruturação rúptil é contemporânea à colocação dos granitoides tipo-A da Suíte Intrusiva Serra dos Carajás, de 1,88 Ga.

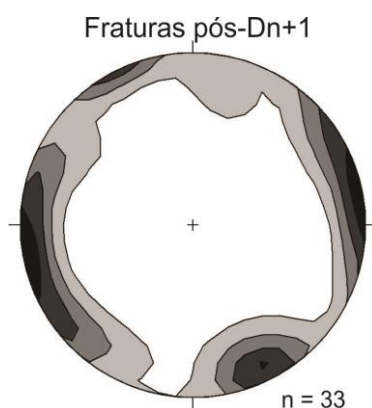


Figura 22: Estereograma das medidas de falhas e fraturas pós- D_{n+1} , mostrando par conjugado nas direções NNW-SSE e ENE-WSW.



Figura 23: veios de quartzo pós-Dn+1, subverticais, sintaxiais, em afloramento de quartzito do depósito Furnas.

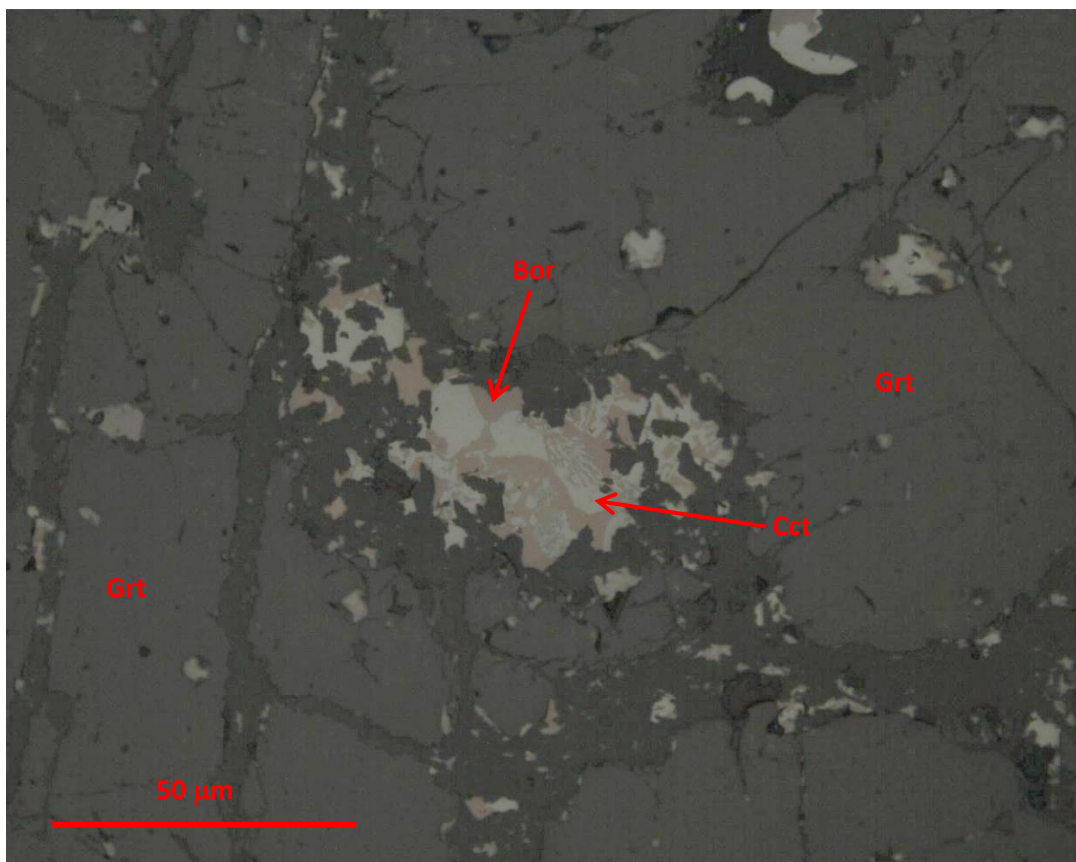


Figura 24: Fotomicrografia em luz refletida de fratura pós-Dn+1, cortando granada e preenchida por sulfetos (intercrescimento gráfico de calcocita e bornita). Lâmina polida do depósito Salobo.

DISCUSSÃO

A análise geológico-estrutural e geofísica apresentada neste relatório permitiu reconhecer algumas características comuns entre as principais zonas mineralizadas do Lineamento Cinzento. Os depósitos IOCG selecionados para estudo de caso (Salobo, Paulo Afonso e Furnas) estão em zonas de alta densidade de lineamentos magnéticos, exibindo valores muito altos de amplitude de sinal analítico (7 a 17 vezes superiores à média regional) e de urânio anômalo (50% a 120% superiores à média). Os valores de potássio anômalo e de Fator F, no entanto, são divergentes, apresentando-se altos nos depósitos Salobo e Furnas e relativamente baixos no depósito Paulo Afonso, o que pode refletir diferenças na distribuição das zonas de alteração potássica e/ou na intensidade de retrabalhamento durante a fase rúptil tardia (pós-Dn+1). Características semelhantes também podem ser observadas em outros depósitos e ocorrências de Cu-Au que não foram sistematicamente estudados, como GT-46 e Grotá Funda.

Os depósitos Salobo e Furnas são majoritariamente hospedados por formações ferríferas de fácies óxido a silicato (grunerita-granada-magnetita-xistos), tectonizadas e metamorfasadas em fácies anfíbolito. Os mesmos litotipos também ocorrem, em menor proporção, no depósito Paulo Afonso, tectonicamente imbricados com metagranitoides hidrotermalizados. No depósito Furnas, ainda foi possível reconhecer extensas zonas de alteração hidrotermal de fundo oceânico, representadas por cordierita-cummingtonita-antofilita-xistos (dalmatanitos), interdigitados com grunerita-granada-magnetita-xistos e com xistos aluminosos, de maneira semelhante à descrita por Schwartz e Frantz (2011) para o depósito Pojuca. Trata-se de zonas de alteração clorítica metamorfasadas em fácies anfíbolito, conforme amplamente descrito na literatura (p. ex. Spear, 1980; Diener *et al.*, 2008). Essas associações litológicas são cortadas por veios e zonas de alteração do evento IOCG e aparentemente pertencem à assembleia de rochas hospedeiras da mineralização principal.

Foi possível reconhecer que as mineralizações IOCG são pré-tectônicas em relação à deformação dúctil principal, tendo sido metamorfasadas em conjunto com suas hospedeiras, o que se reflete em substituições parciais da paragênese hidrotermal por minerais metamórficos (hornblenda com bordas de grunerita, por exemplo). As zonas mineralizadas são lentiformes, venuladas (veios pré-Dn, ricos em hornblenda verde-azulada, magnetita e calcopirita/bornita) e estão dispostas ao longo de zonas de cisalhamento transamazônicas, estiradas e por vezes milonitizadas, localmente segmentadas e onduladas por bandas de cisalhamento pós-transamazônicas. Este conjunto é tardiamente cortado por quantidades variáveis de fraturas extensionais a transtracionais e por veios subparalelos a ortogonais à trama dúctil principal (veios pós-Dn+1, ricos em albita, quartzo, carbonato, calcopirita/bornita e, no depósito Salobo, ainda ocorrendo calcocita e covelita), associados a amplas zonas de alteração hidrotermal de baixa temperatura, ricas em escapolita, biotita verde, epidoto, clorita e estilplomelana.

Conforme apresentado neste trabalho, os eventos hidrotermais que produziram e/ou remobilizaram mineralizações de Cu-Au são correlacionáveis a episódios de tectônica predominantemente extensional: o evento singenético inicial é associado a alterações de fundo oceânico e coevo à abertura do Rift Carajás; o evento principal, tipo IOCG, é associado a

fraturas e veios com crescimento mineral sintaxial; e o evento rúptil tardio é associado à reativação extensional a transtracional de tramas dúcteis paleoproterozoicas, coevo a hidrotermalismo e a remobilização de sulfetos durante a granitogênese de 1,88 Ga. É notável a distribuição preferencial das zonas de alteração hidrotermal e mineralizações de Cu-Au das três gerações ao longo das mesmas zonas de cisalhamento. Essa relação espacial indica que tais estruturas possuem história evolutiva complexa, de recorrência tectônica, tratando-se de descontinuidades antigas, neoarqueanas, reativadas como zonas de cisalhamento reversas-sinistrais durante a inversão da porção norte da bacia e tardiamente hospedando feixes de fraturas extensionais a transtracionais.

Lindenmayer (2003) classificou os litotipos aflorantes no depósito Salobo como produtos de alteração hidrotermal, inclusive as formações ferríferas, interpretadas por aquela autora como termos extremos de alteração de rochas vulcânicas. De acordo com aquela proposta, não haveria registro de metamorfismo regional sobre as zonas mineralizadas, mas sim de metassomatismo dinâmico, síncrono à deformação cisalhante que afeta o depósito, supostamente ocorrida em ambiente profundo, confinado e quente, o que explicaria a existência de paragêneses “hidrotermais” de alto grau, ricas em granada, grunerita e mesmo olivina, que teriam sido geradas por intensa interação fluido-rocha, durante a gênese da mineralização IOCG. Tal proposta considera que todas as gerações de veios mineralizados (descritas no presente relatório como pré-Dn e pós-Dn+1) pertenceriam a um mesmo processo hidrotermal, do tipo IOCG, gerado em profundidade e gradualmente afetado por fases de ambiente mais raso e frio. Interpretação semelhante foi seguida por Réquia *et al.* (2003) e, mais recentemente, por Melo (2014).

O presente relatório apresenta uma visão claramente divergente daquela proposta por Lindenmayer (2003), por dois motivos principais:

- As associações litológicas metavulcanossedimentares hospedeiras das mineralizações possuem significativa continuidade lateral ao longo do Lineamento Cinzento e também para norte, além da área de estudo aqui abordada, não se restringindo às zonas mineralizadas. Mesmo ao longo do Lineamento Cinzento, litotipos mineralizados e não mineralizados apresentam paragêneses metamórficas semelhantes, sendo eventualmente cortados e/ou obliterados por fases hidrotermais nas regiões dos depósitos. Todas as exposições a norte da Serra dos Carajás exibem consistentemente paragêneses metamórficas de fácies anfíbolito, desde a região do depósito Pojuca, com incremento do grau metamórfico para NE até fácies granulito, observado já em rochas paleoproterozoicas do Domínio Bacajá, como relatado por Tavares e Silva (2013) e Tavares (2015);
- A interpretação de que as mineralizações IOCG são sintectônicas à deformação dúctil principal é incompatível com as feições de caráter extensional reconhecidas nas zonas mineralizadas, assim como as relações de corte e superposição aqui descritas e o empilhamento tectônico ora proposto, que evidenciam a evolução tectono-termal polifásica ressaltada neste relatório. Ademais, a interferência transamazônica no depósito Salobo já foi demonstrada através de datação de magnetita da zona mineralizada, que forneceu idade Pb-Pb de 2.112 ± 12 Ma (Tassinari *et al.*, 2003).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos realizados ao longo de 2015 pela CPRM permitiram um considerável avanço no entendimento dos controles estruturais das mineralizações de Cu-Au do Lineamento Cinzento, além de contribuir para o conhecimento geral da evolução tectônica da porção norte da Província Mineral de Carajás.

Foi possível estabelecer um empilhamento relativo das relações de corte e superposição de estruturas, balizados por dados geocronológicos disponíveis na literatura, que levaram à identificação de três episódios tectônicos de extensão e dois de contração ao longo do Neoarqueano e do Paleoproterozoico. Os depósitos de Cu-Au mais importantes do Cinturão Norte do Cobre possuem características mistas de dois ou mais sistemas mineralizantes superpostos, de épocas metalogenéticas distintas, sugerindo que a recorrência tectônica ao longo do Lineamento Cinzento foi um dos fatores determinantes para a distribuição anômala de grandes depósitos naquela região. Entretanto, estudos geocronológicos de minerais gerados nas diferentes etapas evolutivas se fazem extremamente necessários para o estabelecimento de relações temporais absolutas. Da mesma maneira, a diferenciação entre paragêneses metamórficas e hidrotermais, aqui proposta a partir de descrições de campo e petrografia, deve ser confirmada por estudos de geologia isotópica e de química mineral.

O novo mapa geológico-estrutural do Lineamento Cinzento que acompanha este relatório, na escala de 1:100.000, levou em consideração o uso transversal de diversas ferramentas e metodologias (compilação de trabalhos anteriores, interpretação estrutural funcional de imagens de aeromagnetometria e de sensores remotos, geração de produtos derivados de imagens de gamaespectrometria próprios para o estudo de zonas de alteração hidrotermal, campanhas de campo, análise estrutural multiescala), o que permitiu superar a escassez de afloramentos e gerar uma base geológica consistente e realista. A descrição de testemunhos de sondagem cedidos pela Vale S.A. também foi de grande relevância para a correlação dos dados de campo com as estruturas que afetam as zonas mineralizadas dos principais depósitos. É necessário, contudo, avançar no estudo dos testemunhos de sondagem para depósitos ainda não amostrados, como Pojuca, Grota Funda e Paulo Afonso.

Conforme apresentado neste relatório, foi possível elencar diversos elementos estruturais e assinaturas geofísicas comuns às principais mineralizações. A partir da caracterização geológico-geofísica dos depósitos conhecidos, foi possível gerar dois tipos de alvos para *follow up* em campo: zonas potenciais para depósitos IOCG, apresentando anomalias muito altas da amplitude do sinal analítico, urânio e potássio; e áreas prospectáveis para depósitos gerados por remobilização tardia, apresentando valores de Fator F, urânio e potássio muito altos, porém sem anomalias magnéticas significativas.

Apesar do avanço na caracterização dos controles estruturais das mineralizações, o entendimento da geometria das zonas mineralizadas ainda é incipiente, sendo necessários estudos mais aprofundados de geofísica, principalmente de inversão 3D de anomalias da amplitude do sinal analítico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araújo O.J.B., Maia R.G.N., Jorge-João, X.S. Costa, e J.B.S., 1988, A megaestruturação da folha Serra dos Carajás. In: Congresso Latino Americano de Geologia., 7, pp. 324-333.
- Barbosa, J.P.O., 2004, Geologia estrutural, geoquímica, petrografia e geocronologia de granitóides da região de Igarapé Gelado, Norte da Província Mineral de Carajás: Unpublished M.Sc. thesis, Belém, Brazil, University of Pará, 105p.
- Clark, D.A. , 1997. Magnetic properties of rocks and minerals. AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, v. 17(2) -this issue.
- Costa, J. B. S., Siqueira, J. B., 1990. Transtração e transpressão ao longo do Lineamento Cinzento (região da Serra dos Carajás): Ver. Bras. Geoc., v. 20(4): p. 234-238.
- Dall'Agnol, R, Teixeira, NP, Rämö, OT, Moura, CAV, Macambira, MJB, Oliveira, DC, 2005, Petrogenesis of the Paleoproterozoic, rapakivi, A-type granites of the Archean Carajás Metallogenic Province, Brazil. Lithos 80: 101–129. DOCEGEO (1988), Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás - Litoestratigrafia e principais depósitos minerais: Congresso Brasileiro de Geologia, 35th, Belém, Abstracts, p. 11–54.
- Diener, J. F. A., Powell, R., White, R. W., 2008. Quantitative phase petrology of cordierite–orthoamphibole gneisses and related rocks: J. metamorphic Geol., v. 26, p. 795–814.
- DOCEGEO, 1988, Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás – Litoestratigrafia e principais depósitos minerais. XXXV Congresso Brasileiro de Geologia, Belém, SBG, Proceedings, 11-54.
- Gnojek I., Prichystal, A. 1985. A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in northern Moravia (Czechoslovakia). Geoexploration, v. 23: p. 491-502.
- Grainger C.J, Groves DI, Tallarico F.H.B., Fletcher I.R., 2008, Metallogenesis of the Carajás Mineral Province, Southern Amazon Craton, Brazil: varying styles of Archean through Paleoproterozoic to Neoproterozoic base- and precious-metal mineralization: Ore Geology Reviews, v. 33, p. 451–489.
- Groves, D.I., Bierlein, F.P., Meinert, L.D., and Hitzman, M.W., 2010, Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through earth history: Implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits: Economic Geology, v. 105, p. 641–654.
- Lindenmayer, Z.G., Pimentel, M.M., Ronchi, L.H., Althoff, F.J., Laux, J.H., Araújo, J.C., Fleck, A., Bortowski, D.C., Nowatzki, A.C., 2001. Geologia do depósito de Cu-Au do Gameleira, Serra dos Carajás, Pará. In: Jost, H., Brod, J.A., Quieroz, E.T. (Eds.), Caracterização de Depósitos Auríferos Brasileiros, ADIMB-DNPM, Brasília, pp. 79–139.
- Lindenmayer, Z.G., 2003, Depósito de Cu–Au do Salobo, Serra dos Carajás: Uma revisão, in Ronchi L.H., Althoff F.J., eds, Caracterização e modelamento de depósitos minerais, São Leopoldo, Editora Unisinos, p. 69–98.
- Machado N., Lindenmayer D.H., Krough T.E., Lindenmayer Z.G., 1991, U–Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás Area, Amazon Shield, Brazil: Precambrian Research, v. 49, p. 1–26.

- Marschik, R., Mathur, R., Ruiz, J., Leveille, R., e Almeida, A.J. de, 2005, Late Archean Cu-Au-Mo mineralization at Gameleira and Serra Verde, Carajás mineral province, Brazil: Constraints from Re-Os molybdenite ages: *Mineralium Deposita*, v. 39, p. 983–991.
- Melo, G. H. C., 2014. Evolução temporal do depósito de óxido de ferro-cobre-ouro de Salobo, Província Carajás. Dissertação de mestrado, IG-UNICAMP, 81 p.
- Minty, B. R. S., 1997. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry: *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*; v. 17(2), p. 39-50.
- Pinheiro RVL e Holdsworth RE. 2000. Evolução tectonoestratigráfica dos sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento, Cinturão Itacaiúnas, na borda leste do Craton Amazônico, Pará. *Rev. Bras. Geoc.*, 30(4): 597-606.
- Réquia, K., Stein H., Fontboté L., Chiaradia M., 2003, Re–Os and Pb–Pb geochronology of the Archean Salobo iron oxide copper–gold deposit, Carajás Mineral Province, northern Brazil: *Mineralium Deposita* 38:727–738.
- Sánchez, M. G., Allan, M. M, Mortensen, J. K. 2014, Extracting ore-deposit-controlling structures from aeromagnetic, gravimetric, topographic, and regional geologic data in western Yukon and eastern Alaska. *Interpretation*, v. 2(4): p. SJ75–SJ102
- Saunders, D. F., Burson, K. R., Branch, J. F. e Thompson, C. K., 1993. Relation of thorium-normalized surface and aerial radiometric data to subsurface petroleum accumulations. *Geophysics*, v. 58: p. 1417–1427.
- Schwarz, MR, Frantz, JC, 2011. Depósito de Cu-Zn Pojuca Corpo Quatro: IOCG ou VMS?. *Pesquisas em Geociências*, 40 (1): 05-19.
- Silva M.G., Teixeira J.B.G., Pimentel M.M., Vasconcelos P.M., Arielo A., Rocha W.J.S.F., 2005. Geologia e mineralizações de Fe-Cu-Au do Alvo GT46 (Igarapé Cinzento, Carajás), *in* Marini, O.J., Queiroz, E.T., Ramos, B.W. (eds.), *Caracterização de Depósitos Minerais em Distritos Mineiros da Amazônia*, DNPM- FINEP-ADIMB, p. 94-151.
- Spear, F. S. 1980. Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths. *Mineralogical Society of America*, 799 p.
- Tassinari C.C.G., Mellito M.K., Babinski M., 2003, Age and origin of the Cu (Au–Mo–Ag) Salobo 3A ore deposit, Carajás Mineral Province, Amazonian Craton, northern Brazil: *Episodes*, v. 26, p.2–9.
- Tavares, F. M., 2015. Evolução geotectônica do nordeste da Província Carajás. Tese de doutorado. IGEO-UFRJ, 143p.
- Tavares, F. M. e Silva, C. M. G., 2013. Programa Geologia do Brasil – PGB, Serra Pelada - SB.22-X-C-VI, Estado do Pará - Carta Geológica. Belém: CPRM, 2013, 1 mapa colorido, Escala 1:100.000
- VALE, 2012. *Viabilização da mina de cobre do Salobo*. Palestra. V Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, Ouro Preto, MG.