Capítulo 9. O terceiro regime: a crosta reaberta, ca. 1,91–1,86 Ga

Granitos tipo A, fluidos salinos e a última grande reativação mineral de Carajás

Modelo de trabalho

O magmatismo ferroano de ca. 1,91 a 1,86 Ga reaqueceu uma crosta fraturada sob aquíferos novos. Águas das coberturas Águas Claras e Caninana-Paredão-Gorotire circularam profundamente, adquiriram salinidade por interação prolongada com a rocha e misturaram-se a fluidos magmáticos. O terceiro regime herdou a arquitetura hidráulica e as fontes metálicas, não a água do Neoarqueano. A terceira ativação como continuação de um sistema provincial, a salinização profunda das águas novas e o Complexo Formiga como fonte dos metais de Serra Pelada são hipóteses deste livro; as idades, as paragêneses e as relações de corte são medidas.

Uatumã · granito tipo A · aquífero · greisen · Breves · Salobo · calcocita · adulária · epitermal · Serra Pelada · Complexo Formiga · Orosiriano · ca. 1,91–1,86 Ga

Resumo

Entre ca. 1,91 e 1,86 Ga, Carajás recebeu granitos tipo A e uma nova circulação hidrotermal, a terceira e última de sua biografia mineral principal. Breves, Alvo 118, Estrela e Gameleira registram a janela em biotita, xenotímio, monazita e minerais associados. A proximidade entre as idades do magma e as dos fluidos, a posição nas cúpulas dos granitos e a associação de urânio, tungstênio, estanho, bismuto, molibdênio e flúor sustentam um regime ligado ao magmatismo paleoproterozoico.

O evento reutilizou uma crosta preparada durante quase novecentos milhões de anos. Falhas, contatos, zonas alteradas e rochas máficas férteis já estavam lá. Os aquíferos eram novos. Águas Claras e as coberturas Caninana-Paredão-Gorotire, depositadas depois do colapso do capítulo 8, forneceram água capaz de penetrar o embasamento fraturado, reagir por longos percursos e virar salmoura. A escapolita e a alteração de sódio e cálcio do capítulo 6 provam circulação salina antiga, sem continuidade física com o fluido paleoproterozoico.

A mineralogia muda com a profundidade e com a fonte. Greisens e veios de elementos granitófilos ocupam as cúpulas; substituições de sulfetos elevam localmente o teor de cobre sem acrescentar cobre; hematita, sericita, clorita e carbonatos marcam condições mais rasas e variáveis. Veios de adulária indicam ambientes tardios de baixa temperatura, embora sua idade ainda precise de datação direta. Serra Pelada testa o alcance da rede numa cobertura sedimentar rica em carbono, e este livro adota o Complexo Formiga, logo abaixo, como fonte de seus metais do grupo da platina.

1. O pulso magmático

A terceira ativação começa com os granitos tipo A da Suíte Serra dos Carajás e corpos correlatos (Dall'Agnol et al., 2005). O capítulo 5 apresentou o tipo A como o granito quente e seco que só se forma quando a base da crosta é aquecida com força, e aqui ele volta em outra escala. Por volta de 1,88 Ga, um episódio de magmatismo félsico varreu o Crá-

ton Amazônico inteiro, de Carajás a Roraima, deixando granitos, riolitos e ignimbritos numa área do tamanho de vários estados. É o evento Uatumã, uma das grandes províncias ígneas silícicas do planeta, as irmãs félsicas das províncias basálticas que fragmentam continentes (Bryan e Ferrari, 2013). Em Carajás, cúpulas rasas, apófises e fraturas puseram esse magma em contato com as coberturas e com os sistemas hidrotermais mais antigos.

A fonte térmica admite mais de um mecanismo. A queda da raiz de um orógeno, como a do capítulo 4, pode trazer manto quente para perto da base da crosta e gerar fusão sem deixar uma província basáltica exposta. Magma máfico acrescentado à base da crosta, extensão dentro da placa e uma anomalia térmica regional do manto também participam dos modelos publicados para o Uatumã. A ausência de basaltos preservados não escolhe sozinha entre eles. A delaminação permanece hipótese eficiente, não solução encerrada.

A comparação com a província de Gawler, na Austrália, é útil. Ali, granitos ferroanos de ca. 1,59 Ga, a suíte Hiltaba, acionaram uma crosta fértil e produziram Olympic Dam, o maior IOCG do mundo, com alteração de sódio e cálcio semelhante à de Carajás. O paralelo mostra que magmas graníticos pobres em cobre podem produzir depósitos gigantes quando estrutura, salmoura e fonte de metal convergem. Sustenta possibilidade de processo; não estabelece identidade de ambiente tectônico nem de fonte.

2. Aquíferos novos, caminhos antigos

A permanência de Carajás está na planta, não na água. Em 1,88 Ga, a erosão e a sedimentação já tinham criado algo que faltava aos regimes anteriores. Aquíferos, camadas de rocha porosa e permeável que armazenam e transmitem água, como as que abastecem poços hoje. Águas Claras e o conjunto Caninana-Paredão-Gorotire, arenitos e conglomerados depositados sobre o edifício neoarqueano depois do colapso riaciano, funcionavam como reservatórios de água de chuva e de rio. Falhas profundas ligavam essas coberturas ao embasamento e às cúpulas

dos granitos novos.

É como um prédio antigo que recebe água nova pelo mesmo encanamento. Os tubos, as conexões, as curvas e os pontos de vazamento permanecem. A água que passa hoje não é a que circulou no dia da inauguração. Em Carajás, a arquitetura hidráulica sobreviveu. Cada ciclo abasteceu a rede com aquíferos, águas, temperaturas e composições próprias.

Água que desce por aquíferos e por um embasamento fraturado aumenta o tempo de residência e a superfície de reação. Dissolve minerais, troca íons, incorpora cloro e outros solutos e pode evoluir para salmoura, pelo mesmo caminho que o capítulo 6 descreveu para a água do mar. Aquecimento e mistura com voláteis magmáticos ampliam sua capacidade de transportar metais. O fluido de 1,88 Ga pertence a esse circuito novo. A arquitetura, as fontes de metal e os volumes reativos constituem a herança.

A escapolita arqueana conserva o recibo de uma salmoura anterior. Ela demonstra que a crosta já havia hospedado circulação salina e registra parte da alteração que o novo fluido encontrou pelo caminho. Pode liberar componentes durante reações posteriores, mas o terceiro regime não precisa dessa contribuição. A salinização profunda dos novos aquíferos basta para fechar o balanço de água.

O estilo é mais raso e mais quebradiço que o dos regimes neoarqueanos. Sericita, clorita, epidoto, carbonato e veios tardios, minerais de temperatura mais baixa, atravessam setores extensos. Associações mais específicas alinham-se a falhas e cúpulas. A frequência regional dessas fases demonstra sobreposição ampla; atribuir cada grão ao pulso paleoproterozoico exige relação de corte, química mineral ou idade. Alteração fria também pode registrar resfriamento prolongado e eventos ainda mais jovens.

3. A assinatura granitófila

Breves oferece a expressão mais direta. A mineralização ocupa rochas da Formação Águas Claras e o teto alterado de uma intrusão. Quartzo e mica substituíram o granito e sua capa, formando o que se chama greisen, a alteração que um granito faz em si mesmo e em seu teto quando seus últimos fluidos, ricos em flúor, escapam. Tungstênio, estanho, molibdênio, bismuto e flúor acompanham cobre e ouro. É a associação dos depósitos de estanho do mundo inteiro, posta a serviço de um sistema de cobre. Skarn, o outro tipo de depósito de teto de granito, exige reação com encaixante carbonática e pertence a outro arranjo.

As idades unem depósitos e magmatismo, e vale dizer como foram medidas. A biotita, a mica escura, guarda o argônio produzido pelo decaimento do potássio desde que esfriou abaixo de uns trezentos graus; o método argônio-argônio lê esse relógio. Xenotímio e monazita, fosfatos de terras raras que crescem do fluido hidrotermal, guardam chumbo produzido pelo urânio e pelo tório e são lidos pelo método urânio-chumbo. A biotita registra 1.885 ± 4 Ma no Alvo 118, 1.886 ± 5 Ma em Breves, 1.896 ± 7 Ma em Estrela e 1.908 ± 7 Ma em Gameleira (Pollard et al., 2019). Os cronômetros medem coisas diferentes, cristalização, alteração ou resfriamento, e a concentração entre 1,91 e 1,86 Ga, somada às relações de campo, define o regime.

A proporção entre o componente do granito e a rocha atravessada explica a carga. Trajetos curtos a partir de cúpulas evoluídas preservam urânio, tungstênio, estanho, bismuto, molibdênio e flúor. Circuitos que percorrem maior volume de vulcânicas máficas adquirem mais cobre, ferro e ouro. A regra da fertilidade do caminho, do capítulo 6, opera como mistura, não como oposição entre granito estéril e basalto fértil.

Uma máquina de café separa o motor da fonte da carga. A máquina fornece calor e pressão. A água quente atravessa o pó e extrai dele o que chegará à xícara. Em Carajás, o granito pode fornecer calor, acidez, enxofre e os agentes que mantêm metais em solução sem fornecer a maior

parte do cobre. A pilha máfica lavada pelo fluido completa a carga. O minério é o produto do motor, da água e do caminho percorrido.

4. Cobre antigo, sulfetos novos

Os três sulfetos de cobre mais comuns formam uma escada de teor, e a escada tem número. A calcopirita, de ferro e cobre, tem cerca de 35 por cento de cobre. A bornita, com mais cobre e menos ferro, tem 63. A calcocita, só cobre e enxofre, tem 80.

CuFeS□ (35% Cu) → Cu□FeS□ (63% Cu) → Cu□S (80% Cu)

Quando um fluido substitui calcopirita por bornita ou calcocita, o teor do minério sobe, quase o dobro num caso e mais que o dobro no outro, sem que entre cobre novo. O que sai é ferro e enxofre. É uma concentração por subtração. A substituição registra mudanças na atividade de enxofre, na temperatura e no estado de oxidação do fluido, e pode incluir entrada ou saída de cobre, mas o ganho de teor, em si, não exige metal novo.

Salobo preserva quatro gerações sobrepostas, e a quarta é desta classe. O sistema exalativo de ca. 2,75 Ga preparou a pilha e seus condutos. Um primeiro regime IOCG operou em ca. 2,70 Ga; um segundo, em ca. 2,57 Ga, reorganizou e ampliou o corpo. O pulso Uatumã de ca. 1,88 Ga voltou a percorrer o depósito, substituiu sulfetos e concentrou o cobre já presente. Nesse quarto estágio, o modelo adotado aqui é melhoria de teor sem adição de metal.

O chumbo sustenta essa leitura, e exige uma palavra sobre o que ele mede. O valor Pb-Pb de 2.705 $\pm$ 42 Ma obtido em calcocita de Salobo (Réquia et al., 2003) é uma idade-modelo de um sistema com componentes misturados. Uma idade-modelo de chumbo misto se parece menos com a data impressa numa fotografia e mais com a genealogia das pessoas que aparecem nela. Ela informa de onde vieram os componentes; não revela quando o grupo se reuniu. O chumbo arqueano da calcocita registra a herança do sistema. Não data a cristalização do mineral, não individualiza as gerações de 2,70 e 2,57 Ga e não mede

o pulso de 1,88 Ga. Sua composição, porém, conserva chumbo arqueano e não acusa entrada de chumbo novo durante a substituição paleoproterozoica. O dado sustenta, assim, uma melhoria Uatumã do estoque antigo sem nova carga de metal. Relações de corte, texturas de substituição e relógios ligados a cada geração de minerais organizam a sequência; o chumbo misto registra a herança.

A troca de magnetita por hematita, que marca muitos setores rasos, também pede mais de uma variável. A hematita é o óxido de ferro mais oxidado, e sua presença no lugar da magnetita indica fluido mais oxidante, temperatura menor, interação com coberturas e com água de chuva, maior razão entre fluido e rocha, ou composição diferente da encaixante. A atmosfera posterior ao Grande Evento de Oxidação ampliou o reservatório de água oxidada na superfície e pode ter influenciado a recarga dos aquíferos. Entre o oxigênio atmosférico e a hematita profunda existe, contudo, um caminho hidrogeológico que precisa ser demonstrado. A mineralogia registra o estado do fluido no sítio, não a atmosfera de forma direta.

5. O andar raso

Veios tardios com adulária e texturas em pente cortam tramas anteriores em Salobo, Furnas, Pojuca e GT-46 (Tavares et al., 2022). A adulária é um feldspato potássico de baixa temperatura, e cristais de quartzo crescendo lado a lado a partir das paredes de uma fratura, como os dentes de um pente, mostram que o veio foi preenchido em espaço aberto, perto da superfície, onde a rocha se parte em vez de se dobrar.

Essa é a assinatura dos sistemas epitermais, os depósitos formados a menos de um ou dois quilômetros de profundidade e abaixo de trezentos graus, nos quais a água quente chega perto de ferver. Os campos de gêiseres de hoje são epitermais ao vivo, e seus veios de quartzo bandado e adulária são o que resta quando a fonte seca. A adulária pode marcar esses sistemas, sobretudo quando acompanha ebulição, quartzo bandado e zonação vertical. Sozinha, ela não fixa classe nem idade.

Aqui reaparece, perto da superfície, a física da garrafa de água com gás do capítulo 6. A queda de pressão pode produzir ebulição, abrir espaço e precipitar quartzo, adulária e sulfetos. A textura registra o momento em que o fluido deixou de conseguir carregar tudo o que trazia.

Essas ocorrências abrem um alvo real. Datação da adulária, inclusões fluidas, isótopos estáveis e mapeamento da relação com diques e granitos podem verificar se os veios pertencem ao regime de 1,88 Ga. Se pertencerem, Carajás preserva uma coluna que liga cúpulas greisenizadas, em profundidade, a níveis rasos quase de superfície. Se forem mais jovens, revelarão outra ativação da mesma rede. Os dois resultados interessam à exploração.

6. Serra Pelada

Serra Pelada é a imagem mais conhecida de Carajás, e não por sua geologia. Nos anos 1980, dezenas de milhares de homens escavaram ali, à mão, uma cava de dezenas de metros, e as fotografias dessa multidão subindo escadas de madeira com sacos de terra nas costas correram o mundo. O capítulo 14 volta a essa história. Aqui interessa o que havia embaixo dos sacos. Ouro em teores extremos, acompanhado de paládio e platina, numa associação que quase não existe em outro lugar.

O depósito ocupa a charneira de uma dobra reclinada na Formação Águas Claras, isto é, a zona de curvatura máxima de uma dobra deitada de lado. Siltitos ricos em carbono e arenitos dolomíticos hospedam zonas de hematita, de clorita e carbono, de alteração argílica e de silicificação. Carbono hidrotermal e matéria carbonosa participam de uma armadilha redutora. Um fluido oxidante que carregava os metais encontrou rocha rica em carbono, perdeu seu estado de oxidação e largou a carga (Berni et al., 2014, 2016, 2019). É o gradiente do capítulo 6, aqui na forma química mais nítida de toda a província.

O depósito confirma que a rede mineral alcançou rochas sedimentares jovens e armadilhas estruturais afastadas do BIF. Sua ligação exata

ao pulso de 1,88 Ga depende das idades disponíveis e de sua interpretação. Registros paleoproterozoicos em biotita e em minerais hidrotermais favorecem essa associação, mas a história de intemperismo intensa exige separar minério primário, enriquecimento tropical e redistribuição tardia.

A fonte dos metais do grupo da platina está imediatamente abaixo da armadilha. O Complexo Formiga, um corpo máfico-ultramáfico da mesma família de Luanga e Vermelho, ocorre sob a falha basal da unidade. A estrutura percorrida pelo fluido corta o complexo, atravessa o contato e alcança Serra Pelada. Reservatório, conduto e sítio de precipitação pertencem à mesma seção. O modelo deste livro extrai paládio e platina do Formiga, transporta-os num fluido oxidante e os concentra quando a falha encontra a cobertura carbonosa dobrada. Razões entre paládio e platina, isótopos de ósmio, assinaturas de selênio, telúrio e bismuto e inclusões minerais continuam importantes. Seu papel agora é medir a assinatura do Formiga, a eficiência da lixiviação e as mudanças sofridas durante o transporte. A geometria resolve a fonte; a geoquímica deve resolver o caminho.

7. Três regimes, uma planta

Com o terceiro regime, a biografia mineral principal de Carajás fecha, e vale lê-la de uma vez. Um sistema exalativo no fundo do mar, em 2,76 a 2,73 Ga, perfurou o horizonte de ferro e deixou os primeiros condutos. Um primeiro regime de cobre e ouro, em 2,72 a 2,68 Ga, usou as cúpulas graníticas neoarqueanas como motores e a água do mar como salmoura. Um segundo, em 2,61 a 2,45 Ga, reabriu a borda norte e alcançou volumes novos da pilha. Um terceiro, em 1,91 a 1,86 Ga, reaqueceu a crosta com os granitos do Uatumã e usou água de chuva das coberturas novas, salinizada no caminho. Novecentos milhões de anos, três fontes de calor, três águas diferentes, uma única rede de encanamento.

Cada regime acrescentou o que sua química permitia. Níquel e platina ficaram nos cumulatos desde o início. Cobre, ouro e ferro foram

lavados da pilha máfica pelas salmouras. Urânio, tungstênio, estanho e molibdênio chegaram com os granitos. O manganês esperou uma atmosfera com oxigênio e uma plataforma. A planta permaneceu. É por isso que um mapa de Carajás parece um palimpsesto, um pergaminho escrito, raspado e reescrito, em que a mesma linha serve a três textos.

8. Níveis de confiança

São evidência as idades agrupadas dos depósitos ligados aos granitos; cúpulas, greisens e a associação de urânio, tungstênio, estanho, bismuto, molibdênio e flúor; a sobreposição regional de alteração rasa; as substituições entre sulfetos e seus teores; as ocorrências tardias de adulária; a geologia, a mineralogia e os teores de Serra Pelada; e a repetição espacial de estruturas e volumes alterados (Grainger et al., 2008).

São modelos publicados a relação entre depósitos paleoproterozoicos e granitos tipo A, a mistura de fluidos magmáticos e externos, o enriquecimento de teor por substituição de sulfetos e a precipitação de ouro, paládio e platina em armadilhas carbonosas por fluidos oxidantes. A delaminação como fonte de calor e o paralelo com Gawler são modelos comparativos plausíveis.

São hipóteses deste livro a terceira ativação de um sistema provincial contínuo; a salinização profunda de águas das novas coberturas; a influência indireta da atmosfera posterior ao GOE sobre a hematita; a integração dos veios de adulária numa coluna epitermal; e, em Serra Pelada, o Complexo Formiga como fonte dos metais do grupo da platina, sustentado pela conexão estrutural e ainda sem assinatura e balanço de massa que o confirmem.

Conclusão

O terceiro regime encerra a biografia mineral principal de Carajás porque reúne, numa janela datada, as peças que os dois anteriores deixaram. Os granitos do Uatumã deram o calor. As coberturas deram a

água. A rede de falhas e contatos, aberta em 2,76 Ga e reeditada em cada ciclo, deu o caminho. A pilha máfica deu o cobre e o ouro, os granitos deram seus elementos próprios, e o Formiga, talvez, a platina. Nada disso exigiu que o Neoarqueano continuasse. Exigiu que ele tivesse deixado a planta.

A crosta continua ativa depois de 1,86 Ga, mas o distrito mineral deixa de ser o personagem. O próximo capítulo abre a lente para o continente que o contém, e acompanha o que Atlântica fez com sua gramática nos dois bilhões de anos seguintes.

Referências

Berni, G. V. et al. (2016). Ore mineralogy of the Serra Pelada Au-Pd-Pt deposit, Carajás, Brazil, and implications for ore-forming processes. Mineralium Deposita, 51, 781–795. https://doi.org/10.1007/s00126-015-0635-7

Berni, G. V. et al. (2019). Fluid geochemistry of the Serra Pelada Au-Pd-Pt deposit, Carajás, Brazil: exceptional metal enrichment caused by deep-reaching hydrothermal oxidation. Ore Geology Reviews.

Berni, G. V.; Heinrich, C. A.; Lobato, L. M.; Wall, V. J.; Rosière, C. A.; Freitas, M. A. (2014). The Serra Pelada Au-Pd-Pt deposit, Carajás, Brazil: geochemistry, mineralogy, and zoning of hydrothermal alteration. Economic Geology, 109, 1883–1899. https://doi.org/10.2113/econgeo.109.7.1883

Bryan, S. E.; Ferrari, L. (2013). Large igneous provinces and silicic large igneous provinces: progress in our understanding over the last 25 years. Geological Society of America Bulletin, 125, 1053–1078.

Dall'Agnol, R. et al. (2005). Petrogenesis of the Paleoproterozoic, A-type granite suites of the Carajás metallogenic province, Brazil.

Grainger, C. J.; Groves, D. I.; 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 Neo-

proterozoic base- and precious-metal mineralisation. Ore Geology Reviews, 33, 451–489.

Pollard, P. J. et al. (2019). 40Ar-39Ar dating of Archean iron oxide Cu-Au and Paleoproterozoic granite-related Cu-Au deposits in the Carajás Mineral Province, Brazil: implications for genetic models. Mineralium Deposita.

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.

Tavares, F. M. et al. (2022). Adularia occurrences in the Northern Copper Belt of the Carajás Mineral Province, Amazonian Craton, Brazil. Conference abstract.