Capítulo 5. Da tectônica à zona fótica

Como as bacias de 2,76 a 2,65 Ga transformaram ferro, enxofre, luz e tempo de residência em províncias minerais distintas

Modelo de trabalho

A ruptura da placa abriu a bacia e organizou a circulação. Basaltos e intrusões profundas forneceram ferro e sílica; cinza, rios e intemperismo levaram fósforo, enxofre e elementos-traço à superfície; a estratificação guardou Fe^{2}□ abaixo da quimioclina; a luz e o metabolismo microbiano processaram os fluxos. O BIF gigante surgiu onde a bacia espalhou ferro e manteve baixo o sulfeto livre. VMS, níquel, ouro e IOCG registram outros modos de concentrar ou retrabalhar sistemas aparentados. A janela de enxofre como controle da escala gigante e a comparação causal entre os reatores de 2,7 Ga são hipóteses deste livro; as idades, as rochas e os traçadores que elas encadeiam são medidos.

jaspilito · BIF · Carajás · Kostomuksha · código de barras · tempo de residência · zona fótica · ciclo Fe–S · VMS · tipo A · margens coevas · Neoarqueano · ca. 2,76–2,65 Ga

Resumo

O capítulo anterior entregou uma bacia extensional aberta entre 2,76 e 2,73 Ga sobre a sutura de Carajás, com manto hidratado embaixo e uma descarga térmica capaz de ligar a base da crosta à superfície. Aqui a pergunta muda. Já sabemos como o recipiente foi forjado. Falta entender como esse recipiente fabricou uma das maiores acumulações de ferro do planeta.

A resposta exige uma cadeia inteira. Fontes máficas e hidrotermais carregam ferro e sílica para a água profunda. Terras emersas, cinza vulcânica e rios entregam fósforo, enxofre e elementos-traço à superfície. A geometria da bacia separa os dois reservatórios e aumenta o tempo que a água fica guardada. A zona fótica organiza a frente onde o ferro dissolvido vira ferro sólido. Soterramento, metamorfismo, fluidos tardios e intemperismo transformam o precipitado em minério. Cada elo é conhecido; a escala gigante vem da coincidência de todos.

Carajás faz parte de uma família de bacias formadas entre 2,76 e 2,65 Ga. Kostomuksha, na Carélia russa, produziu outro BIF gigante quase na mesma janela, e serve de gêmeo e de controle. Abitibi e Wawa, no Canadá, concentraram sulfetos em caldeiras permeáveis. Yilgarn, na Austrália, favoreceu níquel e, depois, ouro. Rio das Velhas, em Minas Gerais, guardou pouco ferro e concentrou ouro quando a bacia fechou. Os ingredientes se repetem; a arquitetura decide se eles serão espalhados numa plataforma ferrífera, focalizados num conduto sulfetado, capturados por um magma ou reutilizados por falhas muito depois.

1. O jaspilito na mão

Pegue uma amostra de jaspilito de Carajás. É uma rocha listrada, pesada para o tamanho, com faixas de milímetros a centímetros que alternam vermelho e preto. O vermelho é sílica, um chert tingido por partículas finas de hematita. O preto é óxido de ferro, hematita e magnetita, a mesma magnetita do capítulo 1, que faz a amostra puxar a agulha de uma bússola. Cada faixa é um pulso. A rocha inteira é um

arquivo de pulsos, e a pergunta deste capítulo é o que os produziu.

Jaspilito é o nome local de uma classe de rocha que a literatura chama de formação ferrífera bandada, ou BIF, da sigla em inglês. BIFs são sedimentos químicos. Não foram carregados por rios como areia. Precipitaram da água do mar, camada a camada, num tempo em que o oceano carregava ferro dissolvido. Hoje isso é impossível, porque o oxigênio da atmosfera oxida o ferro e o retira da água em horas. No Arqueano, o oceano ferruginoso do capítulo 3 guardava ferro em solução por tempo suficiente para que ele viajasse, se acumulasse e, no lugar certo, precipitasse em escala de província.

A escala é o problema. Formações ferríferas dentro de sucessões vulcânicas arqueanas costumam receber o rótulo Algoma, de um distrito canadense. Em sua expressão comum, são lentes de dezenas de metros, descontínuas, próximas de centros vulcânicos e hidrotermais. Carajás e Kostomuksha quebram esse padrão. Seus distritos contêm bilhões de toneladas de ferro em intervalos de centenas de metros de espessura, repetidos e extensos por dezenas de quilômetros. Basalto, komatiito e água hidrotermal explicam a entrada de ferro e sílica. A escala regional exige mais. Exige um volume de água capaz de receber milhares de pulsos, guardar o ferro abaixo da frente de oxidação e devolvê-lo à superfície sem perder o reservatório inteiro a cada evento.

Há ainda uma segunda família, mais jovem, que vale apresentar desde já para não confundir as duas. Por volta de 2,5 Ga, grandes formações ferríferas se depositaram em plataformas de margem passiva, sem vulcanismo por perto, na Austrália, na África do Sul e em Minas Gerais, onde a Formação Cauê é o exemplo. São os BIFs do tipo Superior, de outro distrito canadense. Pertencem a outra configuração tectônica e a outro estado do oceano, na antessala do Grande Evento de Oxidação. Carajás e Kostomuksha fizeram, em bacias vulcânicas e duzentos milhões de anos antes, o que as plataformas fariam depois em escala continental. Foram reatores precoces.

2. Seis condições para um reator

A tonelagem de um depósito integra quatro coisas. O fluxo de material que entra, a duração do processo, o volume de água processado e a eficiência com que o produto é preservado. Um conduto hidrotermal entrega muito ferro num instante e pode deixar apenas uma crosta de exalação no fundo. Uma bacia aberta demais exporta o fluido para o oceano. Uma caldeira permeável canaliza descarga quente, cobre, zinco e enxofre para um depósito de sulfeto. Uma bacia estratificada, parcialmente fechada e abastecida por muito tempo acumula Fe²□ em profundidade e o devolve à luz em pulsos. O tamanho está na soma dos ciclos e na área percorrida por essa frente.

Duas palavras técnicas resumem o que uma bacia precisa ter, e ambas cabem numa banheira. Acomodação é o espaço disponível para encher. Uma bacia que afunda enquanto recebe sedimento cria acomodação continuamente; uma que para de afundar logo transborda. Tempo de residência é quanto tempo a água fica dentro antes de ser trocada. Numa banheira com a torneira aberta e o ralo fechado, a água fica muito tempo e se concentra no que a torneira traz. Com o ralo aberto, ela passa e leva tudo embora. Soleiras, altos de embasamento, ilhas e plataformas são os ralos meio fechados de uma bacia marinha.

Seis condições precisam coincidir para um BIF gigante. Uma fonte persistente de ferro e sílica. Acomodação suficiente para manter a bacia durante milhões de anos. Uma barreira física ou química que prolongue o tempo de residência da água profunda. Uma interface entre água reduzida e água iluminada, a quimioclina do capítulo 3, que alcance a luz. Um fluxo de enxofre e de nutrientes capaz de sustentar o metabolismo sem converter toda a coluna em água sulfetada. E uma história de soterramento e enriquecimento que conserve o produto. Cada condição aparece isoladamente em muitos cinturões de rochas verdes. Carajás e Kostomuksha reuniram o conjunto.

Uma dessas condições merece mais uma palavra, porque ela vai e volta neste capítulo. O magmatismo félsico. Em Carajás, granitoides e rochas vulcânicas evoluídas de 2,76 a 2,68 Ga registram fusão da crosta

inferior sob fluxo térmico alto, e muitos pertencem a uma classe que a literatura chama de tipo A, granitos ricos em ferro e pobres em água, que só se formam quando a base da crosta é aquecida com força, tipicamente em extensão (Feio et al., 2012; Dall'Agnol et al., 2017). O tipo A é a impressão digital do motor térmico. Mas o félsico também trabalha na superfície. Erupções subaéreas ou rasas dispersam vidro, cinza, dióxido de enxofre e elementos-traço; superfícies félsicas expostas ampliam o intemperismo e o aporte fluvial. Em Kostomuksha, riolitos de afinidade de arco cumprem parte da mesma função ambiental por outra petrogênese. A biosfera não lê o rótulo do granito. Responde ao material lançado na água.

3. O código de barras de 2,76 a 2,65 Ga

Este livro usa com frequência uma ferramenta que convém apresentar com calma, porque ela organiza todos os capítulos seguintes. Um bloco de crosta guarda os eventos que sofreu como idades medidas em minerais, sobretudo em zircão. Alinhe essas idades numa escala de tempo e cada evento vira uma linha, mais grossa quanto mais volumoso, mais fina quanto mais breve. O resultado parece um código de barras, e é assim que o chamo. Dois blocos que viveram juntos têm barras iguais. Dois blocos que nunca se encontraram têm barras diferentes. O código de barras é a certidão de cada cráton, e a comparação de códigos é a base de toda reconstrução.

A expressão 2,7 Ga comprime processos tectônicos opostos dentro da mesma etiqueta, e o código serve justamente para descomprimi-la. A resolução atual das idades U-Pb separa construção crustal, extensão, deposição, fechamento e mineralização por intervalos de poucos a dezenas de milhões de anos. Um granito mais jovem pode cortar a bacia e parecer parte de sua origem; uma falha aurífera pode reativar a estrutura que antes controlou o vulcanismo; um BIF de plataforma de 2,5 Ga pertence a outro mundo tectônico. Idade, posição na pilha e relação de corte vêm antes da semelhança entre rochas.

Entre 2,80 e 2,77 Ga, vários crátons prepararam a janela neoarqueana.

Em Carajás, os domínios Rio Maria e Sapucaia e a crosta do Complexo Xingu já carregavam a história longa de diferenciação dos capítulos 3 e 4. Na Carélia, núcleos mesoarqueanos e cinturões de rochas verdes preexistentes forneciam embasamento e detrito. Uma bacia instalada junto dessa crosta madura recebe margem emersa, superfícies intemperizadas e uma subsidência diferente da de um arco oceânico efêmero.

A primeira barra crítica vai de 2,76 a 2,73 Ga. Um riolito do Grupo Grão Pará cristalizou por volta de 2.759 Ma; basaltos da Formação Parauapebas registram idades próximas de 2.745 Ma; tufos e unidades associadas colocam o BIF da Formação Carajás em torno de 2,74 Ga. Luanga e os outros corpos acamadados do capítulo 2 pertencem à mesma descarga. Granitos e charnockitos, entre eles Planalto e Estrela, foram alojados entre 2,75 e 2,68 Ga e incluem as assinaturas de tipo A (Feio et al., 2012; Dall'Agnol et al., 2017; Martins et al., 2017). A barra reúne extensão, magmatismo do manto, fusão da crosta, acomodação e deposição de ferro no mesmo intervalo. É o reator ligando.

Kostomuksha ocupa praticamente a mesma barra. Os BIFs do Grupo Gimoly formaram-se por volta de 2,76 a 2,74 Ga. Metarriolitos em soleiras e diques fornecem idades de 2.759 a 2.743 Ma; zircões das metagrauvacas intercaladas ao BIF concentram-se perto de 2.753 Ma e se ligam aos riolitos por forma e química (Slabunov et al., 2021). A bacia recebia material félsico enquanto o ferro sedimentava. As reconstruções variam entre arco, retroarco e prisma acrescionário, sempre numa margem sobre subducção, junto de crosta mais antiga.

Entre 2,73 e 2,65 Ga, o registro se amplia e muda de produto. Abitibi e Wawa constroem ciclos vulcânicos, caldeiras e bacias entre arcos, e o conjunto é rico em sulfetos maciços (Jackson e Cruden, 1995; Ayer et al., 2002). Rio das Velhas passa do vulcanismo félsico de 2.772 Ma à intrusão de granitoides entre 2.712 e 2.698 Ma e ao ouro principal entre 2.698 e 2.670 Ma (Lobato et al., 2001; Baltazar e Lobato, 2020). No Yilgarn, magmatismo de arco se sobrepõe a komatiitos e basaltos, e a deformação posterior concentra ouro (Witt et al., 2020). Yellowknife registra máficos de 2,72 a 2,70 Ga, félsicos de 2,67 a 2,66 Ga e mineralização tardia (Cousens et al., 2002). A sucessão das barras mostra

duas etapas metalogenéticas recorrentes. Extensão e descarga magmática e hidrotermal durante a bacia; ouro e parte dos grandes sistemas hidrotermais durante a inversão, a sutura e a reativação.

O pulso de 2,51 a 2,45 Ga fica em outra linha, a das plataformas da seção 1. A idade quase idêntica de Carajás e Kostomuksha registra oportunidade global, talvez ligada a uma reorganização do fluxo do manto e das redes de subducção (Barley et al., 2005). Faltam continuidade estratigráfica, paleomagnetismo e reconstrução paleogeográfica para uni-los numa única bacia. Eles valem mais como experimentos independentes sob a mesma atmosfera sem oxigênio e sobre oceanos regionalmente ferruginosos.

4. O recipiente

O reator ferrífero vive de uma combinação estreita. Precisa acomodar uma coluna química espessa e conservar água profunda rica em $Fe^{2}\square$. Precisa trazer esse reservatório até uma zona iluminada. Calor e fluidos entram por baixo; lava e detrito vulcânico deixam espaço para intervalos em que a sedimentação química domina. A conexão com o oceano renova água e nutrientes, enquanto soleiras e altos limitam a troca profunda. A margem permanece tectonicamente ativa e, ao mesmo tempo, oferece superfícies estáveis entre um pulso e outro. Golfos, plataformas vulcânicas, bacias de retroarco e riftes sobre crosta madura conseguem reunir essas condições.

Carajás recebeu esse arranjo como bacia extensional, e o capítulo 4 contou como. A sutura larga, a placa rasa que hidratou o manto, a ruptura de 2,76 Ga e as estruturas verticais que alojaram basaltos, corpos acamadados e granitoides. Entre 2,76 e 2,73 Ga a bacia está abrindo, e a arquitetura é a de um rifte, com falhas normais, subsidência, enxames de diques, vulcanismo volumoso e magma acrescentado à base da crosta. A assinatura de arco que parte dos basaltos carrega pertence à história da fonte, como o capítulo 4 explicou, e sobrevive ao regime extensional em que o magma finalmente sobe. A expressão que uso para essa herança, retroarco sem arco, nomeia a genealogia, desde que o ambi-

ente deposicional continue sendo descrito como extensional. Os níveis de confiança já se separam aqui. São dados a pilha basáltica, o vulcanismo félsico, as intrusões acamadadas, os granitoides, a acomodação e a cronologia. A ruptura da placa é um modelo publicado. A placa rasa anterior é inferência deste livro.

Kostomuksha monta um reator parecido por uma rota mais convencional. Extensão de retroarco gera acomodação e calor junto de crosta mesoarqueana; basaltos e komatiitos fornecem ferro, sílica e energia hidrotermal; riolitos distribuem cinza e detrito; o bloco antigo ao lado oferece relevo e estabilidade. A categoria arco é insuficiente para descrevê-la. Arco oceânico estreito, arco continental, retroarco rifteado e bacia marginal têm profundidades, fontes e tempos de residência diferentes. Kostomuksha chega à escala gigante porque combina a atividade de margem com o volume e a duração de um grande depocentro.

Abitibi e Rio das Velhas mostram o que muda quando a arquitetura muda. No Abitibi, caldeiras, falhas contemporâneas ao vulcanismo e uma pilha permeável canalizam a descarga quente e focalizam sulfetos. Em Rio das Velhas, a sucessão foi mais clástica, instalada sobre crosta continental e invertida depressa; o ferro químico aparece em escala menor, enquanto a estrutura posterior concentra ouro. A tectônica seleciona o minério por meio de geometria, permeabilidade, duração e preservação. O nome do ambiente, isolado, perde justamente os controles que importam.

5. O que a terra emersa manda para o mar

O reator começa fora da água. Entre 3,0 e 2,7 Ga, cresceu a área de terrenos expostos à atmosfera (Liu e He, 2021). Eram arcos compostos, platôs vulcânicos, núcleos cratônicos rasos e ilhas félsicas, bem diferentes dos continentes modernos. A emersão bastava para transferir rocha do circuito hidrotermal para o circuito da chuva e dos rios. Chuva, CO□, dióxido de enxofre, ácidos produzidos por micro-organismos e variação de temperatura atacavam vidro e minerais. Rios, correntes costeiras e queda de cinza levavam o produto para a margem.

A atmosfera sem oxigênio prolongava a mobilidade do Fe²□. CO□ elevado e gases vulcânicos acidificavam a água da chuva e aceleravam a dissolução de silicatos e de apatita, o mineral que guarda o fósforo das rochas. Basaltos e komatiitos forneciam ferro, magnésio, cálcio, níquel, cobalto, sílica e fósforo. Félsicos acrescentavam potássio, sódio, alumínio, fósforo, rubídio, bário, zircônio, vidro e feldspato reativos. A acidez fazia o trabalho de extração e transporte. Mais adiante, a mistura com água do mar, a reação com basalto e carbonato e o consumo biológico de CO□ elevavam o pH e preparavam a precipitação.

O fósforo liga emersão e produtividade, e é o nutriente que decide quanta vida a bacia sustenta. Modelos de intemperismo preveem aumento do fluxo fluvial de fósforo durante o crescimento das terras subaéreas, e cinza fresca pode liberar fosfato em pulsos rápidos (Hao et al., 2020a, 2020b). O próprio ferro limita a fertilização, porque hidróxidos férricos adsorvem fosfato com enorme eficiência e o arrastam para o fundo. Dados da Formação Carajás sustentam, para a água do mar arqueana, concentrações médias próximas de 0,063 micromolar (Rego et al., 2023). O oceano profundo moderno tem cerca de 2 micromolar. Trinta vezes mais. A produtividade arqueana era, portanto, pulsada. O fósforo entrava perto da margem ou da pluma de cinza, estimulava biomassa, aderia às partículas de ferro e afundava; a redução do ferro no sedimento devolvia parte do nutriente à água do fundo.

O enxofre percorre mais de uma rota. Magmas máficos carregam grande inventário de enxofre e alimentam o sistema hidrotermal. Erupções félsicas subaéreas ampliam a dispersão porque lançam dióxido de enxofre, aerossóis e cinza a grande altura, e a química fotoquímica do capítulo 3 faz o resto, produzindo sulfato, sulfito e enxofre elementar com a assinatura independente de massa. Rochas de 3,2 Ga da África do Sul registram mudanças na química atmosférica do enxofre ligadas a vulcanismo félsico subaéreo; baritas e sulfetos arqueanos preservam misturas atmosféricas, marinhas e magmáticas (Philippot et al., 2012; Müller et al., 2016). Uma bacia pode receber esse enxofre a centenas de quilômetros da fonte eruptiva.

Um tufo dentro do BIF registra tempo e perturbação. Além da idade,

guarda a chegada de vidro reativo, fósforo, metais-traço e diferentes espécies de enxofre. A chuva e a superfície do mar podem se acidificar por um intervalo; a turbidez desloca a profundidade iluminada; o intemperismo da cinza libera solutos depois. Grandes erupções sombreiam a água. Pulsos menores e repetidos fertilizam e reorganizam a coluna. A hipótese pede correlação entre pacotes de cinza, traçadores do continente, isótopos de enxofre e mudanças nas faixas do jaspilito. Dispensa uma erupção para cada banda.

Dois elementos servem de rastreadores dessa transferência, e vale dizer por quê. O rubídio acompanha o potássio, e portanto o vidro félsico, a argila e a alteração potássica. O bário pode vir com o material félsico, precipitar como barita ou seguir fluidos hidrotermais e o ciclo do sulfato. Um valor isolado diz pouco. Perfis camada a camada, combinando rubídio, potássio, bário, zircônio, tório, alumínio, terras raras, mineralogia e isótopos, podem separar cinza, detrito, alteração e precipitação química. A previsão útil é estratigráfica. Pulsos de material vulcânico ou continental devem anteceder ou acompanhar mudanças mensuráveis na fácies ferrífera e na química do enxofre.

No fundo, o componente máfico mantém a torneira principal. Água do mar circula por basaltos, gabros e intrusões quentes, lixivia ferro e sílica e retorna reduzida à bacia. Parte precipita perto das bocas; parte viaja como $Fe^{2}\square$, complexos ou nanopartículas. O oceano sem oxigênio prolonga esse transporte. Uma bacia restrita soma milhares de pulsos e armazena o ferro abaixo da quimioclina. A cadeia fica completa. A tectônica eleva e abre; o vulcanismo lança lava, cinza e gases; o intemperismo extrai; rios e atmosfera entregam; o hidrotermalismo alimenta a profundidade; a circulação interna leva o reservatório à luz.

6. A bacia guarda, mistura e filtra

O oceano arqueano tinha gradientes laterais e verticais fortes. Perto das bocas hidrotermais, temperatura, pH e metais variavam em poucos metros. Em profundidade, água sem oxigênio acumulava $Fe^{2}\square$. Acima, luz, produtividade e pequenos oásis de oxigênio criavam outra quí-

mica. Entre os dois ficava a fábrica de partículas, onde oxidação, adsorção, coagulação e sedimentação operavam numa quimioclina móvel. A área e a persistência dessa fábrica determinavam o tamanho do BIF.

Restrição parcial aumenta o tempo de residência, o ralo meio fechado da seção 2. Soleiras, altos de embasamento, ilhas e plataformas limitam a troca profunda com o oceano aberto. Diferenças de salinidade, temperatura e produtividade sustentam interfaces de densidade que impedem a mistura. Ventos, marés, tempestades e movimentos tectônicos rompem ou elevam a interface e injetam Fe²□ na água iluminada. Se a subsidência acompanha a sedimentação, a geometria se recompõe depois de cada pulso. Em Carajás, a grande acomodação vulcânica abriu intervalo suficiente para a química dominar. Em Kostomuksha, a alternância com grauvacas mantém a proximidade do relevo e, ao mesmo tempo, exige um depocentro maior que um campo hidrotermal isolado.

O balanço entre ferro e enxofre é o filtro, e é a regra que decide o que a bacia fabrica. Redutores de sulfato, sulfito e enxofre elementar produzem sulfeto, H□S ou HS□. O Fe²□ captura o sulfeto como monossulfeto e, depois, como pirita, e o retira da água.

Fe²□ + HS□ → FeS → FeS□

Enquanto a renovação do ferro supera a produção de sulfeto, a água profunda permanece ferruginosa e pobre em sulfeto livre, e o ferro excedente alcança a frente iluminada. Quando enxofre oxidado e matéria orgânica sustentam produção de sulfeto acima do ferro reativo, instala-se a euxinia, o estado de água com sulfeto livre, e o metal é retirado antes de chegar à luz. A deposição migra então para pirita e sedimentos sulfetados. Imagine duas torneiras despejando reagentes num mesmo ralo. Enquanto chega mais ferro do que sulfeto, o sulfeto é capturado no ponto de encontro e ainda sobra ferro para subir até a luz. Quando a produção de sulfeto supera a renovação do ferro, o filtro se inverte. O ferro é retirado antes de chegar à luz, muda a química da água e muda o sedimento produzido (Canfield, 1999; Reinhard et al., 2009).

BIF e VMS ocupam posições diferentes nesse balanço, e aqui entra o segundo tipo de depósito do capítulo. VMS é a sigla de sulfeto maciço vulcanogênico. O análogo moderno é visível em filme. São as fumarolas negras do fundo do mar, chaminés de onde sai água a trezentos e cinquenta graus carregada de ferro, cobre, zinco e enxofre, que precipita sulfetos ao encontrar a água fria (Hannington et al., 2005, 2011). Um sistema VMS entrega metais e enxofre juntos, em descarga quente e focalizada, e o depósito fica junto do conduto. O BIF depende do contrário, do desacoplamento entre ferro e enxofre no espaço ou no tempo. O ferro se dispersa, permanece em solução e precipita numa frente regional. Uma mesma bacia pode ter sulfetos perto das bocas e formação ferrífera longe delas. Qingyuan, no norte da China, com cerca de 2,55 Ga, registra essa zonação, com BIF associado a hidrotermalismo difuso e VMS concentrado onde a extensão foi máxima (Peng et al., 2022).

O lago Matano, apresentado no capítulo 3, mostra a plausibilidade ecológica do filtro. Pouco sulfato sustenta redução microbiana intensa; o ferro remove o sulfeto produzido; a água profunda conserva ferro; a transparência leva luz a mais de cem metros e sustenta fotoferrotrofia (Crowe et al., 2008). Em Kostomuksha e em Temagami, no Canadá, os isótopos de enxofre acrescentam a prova geológica. Enxofre atmosférico e marinho foi processado por micro-organismos dentro de sistemas cujo ferro permanecia majoritariamente hidrotermal (Diekrup et al., 2018; Vysotskiy et al., 2023).

7. A zona fótica trabalha

A palavra algas esconde a ecologia que interessa. O reator abriga bactérias e arqueias com metabolismos acoplados. Fotoferrotrofos, que oxidam Fe²□ com luz pela equação do capítulo 3; cianobactérias, que produzem oxigênio; oxidadores que vivem de traços de oxigênio; redutores de ferro férrico; redutores das espécies de enxofre; fermentadores; produtores de metano. Reações sem vida também precipitam ferro. A vida organiza a posição das interfaces, a disponibilidade de doadores e aceptores de elétrons, o retorno dos nutrientes e a quantidade de ma-

téria orgânica que chega ao sedimento.

A fotoferrotrofia liga luz e ferro diretamente. Os produtos hidrolisam, agregam, adsorvem fósforo e carbono e afundam. Experimentos, modelos e análogos mostram fluxos compatíveis com parte importante da deposição de BIF (Thompson et al., 2019). A exigência de luz põe a fábrica na zona fótica, onde ressurgência, mistura ou migração da quimioclina entregam o Fe^{2}□ guardado embaixo.

As cianobactérias oferecem a rota complementar. Tapetes ou populações flutuantes podiam produzir oxigênio localmente muito antes de ele se acumular na atmosfera. O gás era consumido quase no ponto de origem pelo ferro e por outros redutores. A participação relativa de cada grupo em 2,75 Ga continua debatida. O modelo funciona com mosaicos. Fotoferrotrofia nas águas ferruginosas, oásis de oxigênio em superfícies produtivas e nichos de baixo oxigênio na transição. O capítulo 7 volta a essa competição.

A descida das partículas inverte o ciclo. Matéria orgânica associada aos precipitados alimenta redutores de ferro férrico, que devolvem Fe^{2}□ à água dos poros e favorecem magnetita, siderita, greenalita e outras fases formadas no sedimento. Redutores de enxofre produzem sulfeto e pirita. Fermentação e produção de metano ocupam os níveis em que os aceptores mais energéticos se esgotam. O fósforo adsorvido retorna à água intersticial e pode alimentar nova produtividade. A biomassa criada na luz continua trabalhando depois de soterrada e conecta BIF, metano, clima e atmosfera (Konhauser et al., 2017; Dreher et al., 2021).

O sistema responde com atraso, e esse atraso tem nome. Uma cinza rica em nutrientes primeiro aumenta a produtividade e a oxidação; depois aumenta a respiração e a redução de enxofre. Um pulso hidrotermal de ferro restaura condições ferruginosas ao capturar o sulfeto. Uma queda prolongada no ferro permite que o sulfeto se acumule. Chama-se histerese a propriedade de um sistema cujo estado depende do caminho percorrido, e não só das condições do momento. Condições químicas iguais podem levar a resultados diferentes conforme a direção do ciclo. Bandas de óxido, carbonato, silicato, pirita e chert podem guardar

parte dessas oscilações, embora o soterramento e o metamorfismo tenham refeito a mineralogia original.

O material primário variava. Hidróxidos férricos podem resultar de oxidação biológica ou não. Um hidróxido misto de ferro ferroso e férrico, verde e instável, chamado green rust, se forma em meios sem oxigênio; greenalita, um silicato de ferro, precipita em água rica em Fe^{2}□ e sílica; siderita, o carbonato de ferro, cresce em ambientes carbonáticos e durante o soterramento. Experimentos permitem até que hidróxido ferroso se desproporcione, produzindo ferro férrico, ferro metálico, hidrogênio e green rust (Dodd et al., 2022). Lâminas vizinhas podem ter começado com conjuntos minerais diferentes. O traço comum é a transferência repetida de ferro entre estados de oxidação e fases minerais, a troca de elétrons que o capítulo 1 anunciou.

Compactação, redução microbiana e recristalização transformam o precipitado. A magnetita nasce da reação entre Fe^{2}□ e Fe^{3}□; a siderita incorpora carbono; a pirita fixa sulfeto; a sílica vira chert. O bandamento combina escalas. Lâminas milimétricas podem registrar produtividade, ressurgência, marés ou diagênese; pacotes de metros a dezenas de metros respondem a subsidência, vulcanismo e circulação da bacia. Ler cada banda como um ano empobrece um arquivo construído por ritmos diferentes.

BIF e minério de alto teor pertencem a etapas diferentes, e a distinção importa para quem lê a serra de hoje. O jaspilito original alterna ferro e sílica em proporções perto de meio a meio. O minério que se lavra em Carajás passa de 65 por cento de ferro porque a sílica foi removida, muito depois, por fluidos, deformação e intemperismo. A tonelagem guarda o funcionamento da bacia; o teor e a forma econômica guardam a história posterior. IOCG e ouro entram ainda mais tarde, e o capítulo 6 começa por eles. Kostomuksha formou BIF gigante sem repetir essa especialização e funciona como controle natural.

8. Carajás e Kostomuksha, convergência funcional

A comparação começa pelo observável. Os dois distritos contêm BIFs gigantes em sucessões vulcanossedimentares de 2,76 a 2,74 Ga. Ambos registram félsicos contemporâneos, componente máfico e circulação hidrotermal. Ambos se instalaram junto de crosta arqueana preexistente e receberam material sedimentar ou vulcanoclástico. Atmosfera sem oxigênio, transporte fotoquímico de enxofre e ecossistemas capazes de processar ferro, enxofre e carbono completavam a condição de fundo. Esse conjunto define uma classe funcional antes de qualquer reconstrução paleogeográfica.

Carajás representa o membro termicamente mais extremo. A Formação Parauapebas registra a pilha basáltica; termos intermediários e félsicos chegam à superfície; intrusões acamadadas e granitoides ligam manto, base da crosta e níveis rasos. A sutura reativada distribui os condutos. Magma acrescentado à base da crosta sustenta hidrotermalismo e fusão crustal. A bacia extensional acumula água ferruginosa enquanto terras emersas e erupções entregam cinza, enxofre e nutrientes. O tipo A funciona como impressão digital desse motor.

Kostomuksha chega ao mesmo resultado por um sistema sobre subducção. Basaltos e komatiitos alimentam o reservatório de ferro. Riolitos de 2.759 a 2.743 Ma e grauvacas derivadas deles demonstram transferência félsica direta para o depocentro. A crosta antiga adjacente fornece relevo e estabilidade. Uma bacia de arco ou retroarco oferece acomodação e circulação com fusão crustal menos intensa e petrogênese félsica distinta. A função converge; a genealogia magmática diverge.

Cinco fatores explicam a escala, e valem como lista de verificação para qualquer bacia da família. Crosta madura aumenta a área emersa e a duração. Magmatismo máfico volumoso sustenta ferro, sílica e calor. Félsicos contemporâneos acrescentam cinza, enxofre dispersável e um marcador da atividade crustal. A bacia ampla e parcialmente restrita separa fonte e frente de precipitação. E o fluxo de ferro excede a produ-

ção de sulfeto durante tempo suficiente. Cada fator aparece em outros terrenos; a tonelagem gigante nasce da coincidência.

A idade compartilhada permanece uma sincronia, não uma ponte geográfica. A hipótese parcimoniosa é convergência funcional, duas margens alcançando soluções semelhantes para o mesmo problema físico. A vida encontrou luz, ferro, enxofre e nutrientes; a tectônica manteve os ingredientes juntos. Esse paralelo permite usar uma bacia como controle da outra. Kostomuksha testa o que sobra do modelo sem tipo A e sem IOCG. Carajás testa o que muda quando o reator se instala sobre uma sutura rompida e recebe uma descarga térmica excepcional.

9. Margens coevas, minérios distintos

O Abitibi mostra que abundância de félsicos e calor não basta para produzir BIF gigante. Sucessivos arcos, retroarcos, caldeiras e falhas contemporâneas ao vulcanismo canalizaram água do mar pela pilha. O fluido reagiu com máficos e félsicos, adquiriu ferro, cobre, zinco e enxofre e voltou ao fundo em descargas concentradas. Enxofre magmático, lixiviação das vulcânicas e redução do sulfato marinho alimentaram sulfetos maciços (Hannington et al., 2010). A segmentação do relevo, a permeabilidade e o alto aporte vulcanoclástico reduziram a área e o tempo disponíveis para uma frente ferrífera regional. Crostas de exalação e BIFs menores ocupam as porções distantes. Quando o Abitibi fechou, grandes zonas de deformação passaram a conduzir fluidos metamórficos e ouro. A sequência importa. VMS acompanha extensão e vulcanismo; ouro acompanha acresção, inversão e metamorfismo. A falha aurífera tardia reutiliza o conduto antigo sem transformar retroativamente a bacia vulcânica.

Wawa oferece um controle dentro da própria margem. Em torno de 2,72 Ga, Manitouwadge concentra VMS em ambiente de arco rifteado, enquanto Shebandowan e setores vizinhos registram maior influência do manto, níquel-cobre e ouro. Geometria, espessura crustal e encanamento magmático distribuem os sistemas minerais ao longo de terrenos da mesma idade (Lodge et al., 2015). Ingredientes regionais seme-

lhantes atravessam encanamentos diferentes.

Rio das Velhas combina máficos-ultramáficos, félsicos, sedimentos e alteração hidrotermal. Sua arquitetura sobre crosta continental e a deformação intensa admitem modelos de arco e retroarco. O ferro químico permaneceu subordinado, talvez por diluição por sedimento terrígeno, curta estabilidade do depocentro e fechamento rápido. O ouro principal chegou durante a convergência e a reativação estrutural. O BIF gigante do Supergrupo Minas, logo ao lado, pertence à plataforma de 2,51 a 2,45 Ga. No mesmo embasamento regional, o cinturão de rochas verdes e a plataforma registram duas idades, duas geometrias e duas metalogêneses.

O Yilgarn justapõe magmatismo de arco, komatiitos, basaltos e bacias posteriores. Komatiitos muito quentes alimentam sistemas magmáticos de níquel-cobre; a reorganização estrutural concentra ouro. Yellowknife separa no tempo a fase máfica de 2,72 a 2,70 Ga e a félsica de 2,67 a 2,66 Ga; a menor sobreposição dos fluxos ajuda a explicar a expressão ferrífera e vulcanogênica mais modesta. Em ambos, o volume de magma por si só perde para sincronia, restrição e permanência da bacia.

Surge uma família de margens, e não um evento tectônico único. Carajás usa extensão sobre sutura e ruptura de placa para produzir BIF gigante e, mais tarde, IOCG. Kostomuksha usa bacia sobre subducção junto de crosta antiga e produz BIF gigante sem a mesma cauda hidrotermal. Abitibi e Manitouwadge focalizam VMS. Shebandowan e Yilgarn favorecem níquel-cobre. Rio das Velhas, Yellowknife, Abitibi e Yilgarn concentram ouro durante o fechamento. O mapa metalogenético é um mapa de geometria, permeabilidade, duração e preservação.

10. O modelo e seus riscos

A sequência causal cabe em cinco movimentos. Primeiro, subducção, colisão e anomalias do manto reorganizam a litosfera e abrem depocentros sobre crosta madura; falhas profundas alimentam basaltos, gabros

e intrusões máfico-ultramáficas; magma na base da crosta e hidratação geram os magmas intermediários e félsicos. Segundo, o hidrotermalismo entrega Fe²□ e sílica em profundidade, enquanto intemperismo, rios, cinza e atmosfera levam fósforo, enxofre e elementos-traço à superfície. Terceiro, a geometria separa os fluxos, guarda ferro abaixo da quimioclina e eleva o tempo de residência. Quarto, a circulação interna leva Fe²□ à luz, fotoferrotrofos oxidam ferro e fixam carbono, oásis de oxigênio completam a frente, redutores de ferro e enxofre reciclam minerais e matéria orgânica, e o ferro excedente mantém baixo o sulfeto livre. Quinto, partículas de hidróxido, green rust, silicatos e carbonatos descem, reagem e recristalizam. A repetição cria o BIF. Metamorfismo, fluidos tardios e intemperismo selecionam o minério de alto teor.

O modelo contém duas janelas, e as duas têm número. Na janela do enxofre, um inventário muito baixo limita parte da reciclagem metabólica; um inventário moderado sustenta o ciclo ferro-enxofre enquanto o ferro captura o sulfeto; abundância de enxofre reativo e matéria orgânica empurra a bacia para pirita e euxinia. O sulfato arqueano abaixo de 2,5 micromolar, do capítulo 3, está do lado baixo dessa janela. Na janela da acidez, CO□ e dióxido de enxofre aceleram extração e transporte, mas a precipitação ocupa a frente neutralizada onde o Fe²□ encontra luz ou oxidantes. O tipo A também muda de lugar entre bacias. Em Carajás ele marca fluxo térmico, fusão profunda e extensão. Outros reatores entregam cinza e enxofre com félsicos de arco.

Os processos isolados têm precedentes sólidos. A literatura já liga BIF a manto, tectônica, oceano e biosfera; demonstra fotoferrotrofia, redução de enxofre, transporte atmosférico, intemperismo de fósforo e rotas não biológicas de oxidação; e mostra a zonação entre BIF e VMS em bacias extensionais (Bekker et al., 2010; Konhauser et al., 2017; Peng et al., 2022). A contribuição específica deste capítulo está na montagem. Tratar as bacias de 2,76 a 2,65 Ga como reatores da mesma geração, usar Carajás e Kostomuksha como convergência funcional e derivar BIF, VMS, níquel, ouro e IOCG do acoplamento entre arquitetura, fluxo, enxofre, tempo de residência, metabolismo e história posterior.

A hipótese corre riscos claros, e eles são o teste. Em Carajás, níveis de

cinza e pulsos félsicos dentro do BIF devem acompanhar mudanças em rubídio, potássio, zircônio, tório, bário, isótopos de enxofre, fósforo e fácies ferrífera. Perfis laterais devem separar fonte máfica hidrotermal, setores próximos mais sulfetados e plataforma ferrífera distante. A cadeia placa rasa e ruptura prevê hiato ou migração de arco antes da abertura, aquecimento rápido, conexão estrutural entre intrusões e bacia e uma fonte do manto previamente hidratada. Kostomuksha deve conservar o elo entre detrito riolítico, enxofre atmosférico e expansão do BIF com assinatura de margem mais convencional. O Abitibi deve colocar VMS na descarga focalizada e BIFs menores nas posições distantes.

11. Níveis de confiança

São evidência as idades contemporâneas ao BIF em Carajás e Kostomuksha; a coexistência de componentes máficos e félsicos; a arquitetura extensional de Carajás entre 2,76 e 2,73 Ga; intrusões máfico-ultramáficas e granitoides da mesma idade; a transferência de material riolítico para a bacia de Kostomuksha; as assinaturas atmosféricas, marinhas, magmáticas e microbianas de enxofre; a capacidade do ferro férrico de adsorver fósforo; e a separação temporal entre sedimentação, fechamento e enriquecimento mineral.

São modelos publicados a ruptura de placa na abertura de Carajás; bacias sobre subducção para Kostomuksha; fotoferrotrofia e oásis locais de oxigênio; captura de sulfeto em águas ferruginosas; circulação hidrotermal máfica como fonte de ferro e sílica; intemperismo continental como fluxo de fósforo; e zonação entre BIF e VMS em sistemas extensionais.

São hipóteses deste livro a placa rasa anterior em Carajás; a expressão retroarco sem arco para sua herança litosférica; a janela ferro-enxofre como controle da escala gigante; e a comparação causal entre os reatores de 2,76 a 2,65 Ga. O teste exige códigos de barras padronizados com idade, estratigrafia, estruturas, traçadores de cinza, microfácies e isótopos de ferro, enxofre e carbono.

Conclusão

Carajás e Kostomuksha são realizações precoces de um reator que se tornaria comum nas plataformas ferríferas de 2,51 a 2,45 Ga. Em 2,76 a 2,74 Ga, bacias vulcanossedimentares já conseguiam acumular ferro hidrotermal em profundidade, manter a estratificação e alimentar uma frente iluminada por tempo suficiente para construir depósitos gigantes. A sincronia registra uma oportunidade planetária. A escala veio da coincidência entre crosta madura, acomodação ampla, magmatismo persistente, aporte félsico, restrição hidrológica, metabolismo e balanço entre ferro e enxofre.

Em Carajás, essa coincidência nasce da descarga que encerrou o capítulo anterior. A sutura abriu, o manto hidratado fundiu, basaltos e corpos acamadados subiram, a base da crosta gerou félsicos e granitos de tipo A, e a bacia guardou o resultado. A arquitetura é extensional; a memória de subducção pertence à fonte. O tipo A revela o motor térmico e deixa de carregar sozinho uma explicação biológica que nunca lhe pertenceu.

O percurso termina na luz. Rocha emersa vira soluto e cinza; basalto submerso vira fluido ferruginoso; a bacia separa profundidade e superfície; a quimioclina põe ferro, enxofre, carbono e micro-organismos em contato; o sedimento guarda uma imagem transformada dessa atividade. Depois, tectônica e intemperismo escrevem outra história sobre o jaspilito e escolhem BIF preservado, minério de alto teor, VMS, ouro ou IOCG. Os depósitos são a memória mineral dos raros intervalos em que fonte, recipiente, atmosfera e vida trabalharam no mesmo ritmo. O capítulo seguinte desce para dentro da crosta e acompanha o que a água fez com esse recipiente nos trezentos milhões de anos seguintes.

Referências

Ayer, J. et al. (2002). Evolution of the southern Abitibi greenstone belt based on U–Pb geochronology: Autochthonous volcanic construction followed by plutonism, regional deformation and sedimentation.

Precambrian Research, 115, 63–95. https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00006-2

Baltazar, O. F.; Lobato, L. M. (2020). Structural evolution of the Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. Minerals, 10, 983. https://doi.org/10.3390/min10110983

Barley, M. E.; Bekker, A.; Krapež, B. (2005). Late Archean to Early Paleoproterozoic global tectonics, environmental change and the rise of atmospheric oxygen. Earth and Planetary Science Letters, 238, 156–171. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.06.062

Bekker, A.; Slack, J. F.; Planavsky, N.; Krapež, B.; Hofmann, A.; Konhauser, K. O.; Rouxel, O. J. (2010). Iron Formation: The Sedimentary Product of a Complex Interplay among Mantle, Tectonic, Oceanic, and Biospheric Processes. Economic Geology, 105, 467–508. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.467

Canfield, D. E. (1999). The evolution of the sulfur cycle. American Journal of Science, 299, 697–723. https://doi.org/10.2475/ajs.299.7-9.697

Cousens, B.; Facey, K.; Falck, H. (2002). Geochemistry of the late Archean Banting Group, Yellowknife greenstone belt, Slave Province, Canada: Simultaneous melting of the upper mantle and juvenile mafic crust. Canadian Journal of Earth Sciences, 39, 1635–1656. https://doi.org/10.1139/e02-070

Crowe, S. A. et al. (2008). Photoferrotrophs thrive in an Archean Ocean analogue. Proceedings of the National Academy of Sciences, 105, 15938–15943. https://doi.org/10.1073/pnas.0805313105

Dall'Agnol, R. et al. (2017). Mineralogy, geochemistry, and petrology of Neoarchean ferroan to magnesian granites of Carajás Province, Amazonian Craton: The origin of hydrated granites associated with charnockites. Lithos, 277, 3–32. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.09.032

Diekrup, D.; Galić, A.; Valaas Hyslop, E.; Johnson, C. M.; Beard, B. L.; Lavoie, D. (2018). Decoupling of Neoarchean sulfur sources recorded

in Algoma-type banded iron formation. Earth and Planetary Science Letters, 489, 1–7. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.02.022

Dodd, M. S. et al. (2022). Abiotic anoxic iron oxidation, formation of Archean banded iron formations, and the oxidation of early Earth. Earth and Planetary Science Letters, 584, 117469. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117469

Dreher, C. et al. (2021). Microbial processes during deposition and diagenesis of banded iron formations. PalZ, 95, 593–610. https://doi.org/10.1007/s12542-021-00598-z

Feio, G. R. L. et al. (2012). Geochemistry, geochronology, and origin of the Neoarchean Planalto Granite suite, Carajás, Amazonian craton: A-type or hydrated charnockitic granites? Lithos, 151, 57–73. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.02.020

Hannington, M. D.; de Ronde, C. E. J.; Petersen, S. (2005). Sea-floor tectonics and submarine hydrothermal systems. In: Hedenquist, J. W. et al. (eds.), Economic Geology 100th Anniversary Volume, 111–141.

Hannington, M. D.; Jamieson, J. W.; Monecke, T.; Petersen, S. (2010). The geology and metallogeny of volcanic-hosted massive sulfide deposits: Variations through geologic time and with tectonic setting. Economic Geology, 105, 571–591. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.571

Hannington, M. D.; Jamieson, J.; Monecke, T.; Petersen, S.; Beaulieu, S. (2011). The abundance of seafloor massive sulfide deposits. Geology, 39, 1155–1158. https://doi.org/10.1130/G32468.1

Hao, J. et al. (2020a). Cycling phosphorus on the Archean Earth: Part I. Continental weathering and riverine transport of phosphorus. Geochimica et Cosmochimica Acta, 273, 70–84. https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.01.027

Hao, J. et al. (2020b). Cycling phosphorus on the Archean Earth: Part II. Phosphorus limitation on primary production in Archean ecosystems. Geochimica et Cosmochimica Acta, 280, 360–377. https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.04.005

Huston, D. L.; Logan, G. A. (2004). Barite, BIFs and bugs: Evidence for the evolution of the Earth's early hydrosphere. Earth and Planetary Science Letters, 220, 41–55. https://doi.org/10.1016/S0012-821X(04)00034-2

Jackson, S. L.; Cruden, A. R. (1995). Formation of the Abitibi greenstone belt by arc–trench migration. Geology, 23, 471–474. https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023%3C0471:FOTAGB%3E2.3.CO;2

Konhauser, K. O. et al. (2017). Iron formations: A global record of Neoarchaean to Palaeoproterozoic environmental history. Earth-Science Reviews, 172, 140–177. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.012

Kump, L. R.; Barley, M. E. (2007). Increased subaerial volcanism and the rise of atmospheric oxygen 2.5 billion years ago. Nature, 448, 1033–1036. https://doi.org/10.1038/nature06058

Liu, X.-M.; He, H. (2021). Rise of major subaerial landmasses about 3.0 to 2.7 billion years ago. Geochemical Perspectives Letters, 18, 1–5. https://doi.org/10.7185/geochemlet.2115

Lobato, L. M. et al. (2001). Brazil's premier gold province. Part I: The tectonic, magmatic, and structural setting of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. Mineralium Deposita, 36, 228–248. https://doi.org/10.1007/s001260100179

Lodge, R. W. D.; Gibson, H. L.; Stott, G. M.; Franklin, J. M.; Hudak, G. J. (2015). Geodynamic setting, crustal architecture, and VMS metallogeny of ca. 2720 Ma greenstone belts of northern Wawa, Superior Province. Canadian Journal of Earth Sciences, 52, 196–214. https://doi.org/10.1139/cjes-2014-0163

Martins, P. L. G. et al. (2017). Neoarchean magmatism in the southeastern Amazonian Craton, Brazil: Petrography, geochemistry and tectonic significance of basalts from the Carajás Basin. Precambrian Research, 302, 340–357. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.10.013

Müller, É. et al. (2016). Multiple sulfur-isotope signatures in Archean sulfates and their implications for the chemistry and dynamics of the

early atmosphere. Proceedings of the National Academy of Sciences, 113, 7432–7437. https://doi.org/10.1073/pnas.1520522113

Peng, P. et al. (2022). A Neoarchean VMS-BIF metallogenic system in the Qingyuan greenstone belt, North China Craton. Economic Geology, 117, 1275–1298. https://doi.org/10.5382/econgeo.4920

Philippot, P. et al. (2012). Variations in atmospheric sulphur chemistry on early Earth linked to volcanic activity. Nature Geoscience, 5, 668–674. https://doi.org/10.1038/ngeo1534

Rego, E. S. et al. (2023). Low-phosphorus concentrations and important ferric hydroxide scavenging in Archean seawater. PNAS Nexus, 2, pgad025. https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad025

Reinhard, C. T. et al. (2009). A late Archean sulfidic sea stimulated by early oxidative weathering of the continents. Science, 326, 713–716. https://doi.org/10.1126/science.1176711

Rossignol, C. et al. (2023). Neoarchean environments associated with the emplacement of a large igneous province: Insights from the Carajás Basin, Amazonia Craton. Journal of South American Earth Sciences, 130, 104574. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104574

Slabunov, A. I.; Nesterova, N. S.; Egorov, A. V.; Kuleshevich, L. V.; Kevlich, V. I. (2021). Age of the Archean strata with banded iron formation in the Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton: Constraints on the geochemistry and geochronology of zircons. Geochemistry International, 59, 341–356. https://doi.org/10.1134/S0016702921040066

Thompson, K. J. et al. (2019). Photoferrotrophy, deposition of banded iron formations, and methane production in Archean oceans. Science Advances, 5, eaav2869. https://doi.org/10.1126/sciadv.aav2869

Vysotskiy, S. V. et al. (2023). Sulfur isotope sources of sulfides of Neoarchean iron deposits of the Kostomuksha Greenstone Belt of Karelia, Russia. Doklady Earth Sciences, 510, 394–399. https://doi.org/10.1134/S1028334X23600299

Witt, W. K. et al. (2020). The tectonic setting and evolution of

the 2.7 Ga Kalgoorlie–Kurnalpi Rift, Yilgarn Craton: An Archean plume-influenced intra-arc rift. Mineralium Deposita, 55, 601–631. https://doi.org/10.1007/s00126-017-0778-9