Capítulo 11. A quilha que sobreviveu

Diamantes de Carajás, raízes cratônicas e as janelas que levaram o manto aos rios

Modelo de trabalho

Os diamantes aluvionares registram uma quilha cratônica preservada em retalhos sob Carajás e Rio Maria. O estoque pode reunir gerações arqueanas distintas. Sua entrega principal permanece sem idade. O rifte toniano do Araguaia é o candidato preferido, e o colapso cambriano, uma alternativa. Morfologia, inclusões, geofísica e drenagem definem testes e áreas, sem substituir a descoberta do corpo primário. A sobrevivência da quilha em retalhos, as gerações propostas e a entrega toniana são hipóteses deste livro.

diamante · quilha · regra de Clifford · kimberlito · inclusões · Rio Maria · gravimetria · tomografia · Araguaia · São João do Araguaia · Sereno · bateia

Resumo

Carajás registra perdas de raiz, ruptura de placa e magmatismo pós-colisional, tudo o que destrói diamante. Diamantes exigem o contrário.

Litosfera espessa, fria e estável por tempo suficiente para formá-los e conservá-los. As ocorrências nos rios da região resolvem parte do paradoxo. A remoção de raiz foi localizada em corredores; porções da quilha sobreviveram entre eles. Rio Maria é o candidato mais claro a núcleo preservado, e Carajás conserva litosfera de alta velocidade sísmica e estrutura térmica de cráton.

O registro dos rios contém histórias distintas. São João do Araguaia produziu diamantes de longa circulação sedimentar e forneceu inclusões compatíveis com manto peridotítico. Ocorrências nos rios Itacaiúnas, Parauapebas e Sororó e na grota do Sereno incluem cristais pequenos, claros e pouco desgastados, que indicam transporte limitado, embora ainda permitam uma fonte sedimentar próxima. A geração e a entrega pertencem a relógios diferentes. Diamantes podem ter se formado em mais de um episódio arqueano; o transporte à superfície exige magma profundo e rápido, e nenhum magma assim foi datado na província.

O capítulo termina com uma estratégia. Separar populações, subir drenagens, caracterizar inclusões e minerais indicadores, datar diques, mapear a espessura da litosfera e modelar o retrabalhamento. A tese fornece um mapa de probabilidade. O corpo primário continua desconhecido.

1. A regra de Clifford

Em 1966, o geólogo sul-africano Tom Clifford percebeu uma coincidência no mapa da África. Todas as minas de diamante que valiam a pena ficavam dentro dos crátons arqueanos, as peças mais antigas do continente, ou em suas bordas imediatas. Fora deles, kimberlitos existiam, mas vinham vazios (Clifford, 1966). A observação virou regra, e a regra até hoje orienta a prospecção no mundo inteiro. Diamante econômico pede crosta de mais de 2,5 bilhões de anos embaixo.

A razão é física, e os capítulos 2 e 3 já a prepararam. O diamante é carbono cristalizado sob pressão muito alta, e só é estável no manto

abaixo de cerca de cento e cinquenta quilômetros de profundidade, e apenas se a temperatura ali for baixa para a profundidade. Essa combinação, fundo e frio, só existe sob uma quilha cratônica, a raiz de manto empobrecido, espesso e frio que o capítulo 2 descreveu nascendo junto com os primeiros continentes e o capítulo 3 viu se consolidar. Sob um oceano ou sob um continente jovem, o manto a cento e cinquenta quilômetros é quente demais, e o carbono fica como grafite. A quilha é a geladeira do diamante.

A geladeira também guarda por bilhões de anos. Um diamante pode se formar no Arqueano e permanecer no manto, intacto, até hoje, porque nada ali o perturba. Mas pode desaparecer em horas se o magma que o transporta para cima subir devagar ou for rico em oxigênio, caso em que o diamante queima e vira CO□. Formar, guardar e entregar são três exigências separadas, e o capítulo as examina uma a uma.

2. O paradoxo da raiz perdida

Carajás parece hostil a essa conservação. O modelo deste livro inclui a queda da raiz depois da colisão mesoarqueana, no capítulo 4, a ruptura da placa em ca. 2,76 Ga e a reorganização paleoproterozoica. Cada um desses eventos retira ou aquece a litosfera, e litosfera removida leva seus diamantes embora. O Cráton do Norte da China é o exemplo extremo. Sua quilha foi destruída no Mesozoico, e com ela foi a estabilidade que Clifford exigia (Zhu e Xu, 2019). A pergunta é por que Carajás tem diamantes nos rios.

A resposta mais econômica é que a destruição foi guiada. Delaminação e ruptura seguem suturas e corredores, e podem escavar canais e bordas enquanto deixam blocos frios entre eles. A ocorrência de diamante demonstra que alguma janela de estabilidade existiu; não determina sua extensão nem sua continuidade atual. A formulação adotada aqui é sobrevivência em retalhos. Rio Maria estabilizou cedo e preserva a arquitetura arqueana de domos e quilhas, a amostra que ficou fora do reator, como o capítulo 4 disse. Itacaiúnas ocupa uma zona mais reativada. Bacajá acrescenta crosta retrabalhada. O mapa profundo deve

reunir núcleos espessos, bordas afinadas e corredores removidos. A prospectividade seguirá os primeiros e evitará, em princípio, os últimos.

A litosfera também pode se regenerar por baixo, quando manto empobrecido esfria e se cola à base de um bloco depois de um episódio de afinamento. Essa regeneração não recompõe automaticamente uma quilha com diamantes nem devolve diamantes destruídos. Por isso o capítulo a trata como processo auxiliar. A sobrevivência parcial continua sendo a hipótese principal.

3. O que os diamantes observados dizem

O Baixo Tocantins foi uma província produtora importante no século XX, e seus diamantes podem ser lidos como qualquer outra amostra. São João do Araguaia forneceu gemas de alto valor, pedras grandes e um lote cuja forma registra duas histórias. Corrosão pelo magma que os trouxe e desgaste por transporte em rio. Dodecaedros amarelos, arestas arredondadas e superfícies trabalhadas pertencem a uma população capaz de ter atravessado mais de um ciclo de erosão e deposição (Höhn, 2000; Höhn e Costa, 2022).

A Formação Poti, um arenito carbonífero da Bacia do Parnaíba, é um redistribuidor regional plausível para parte dessa população. Sua drenagem antiga pode ter reciclado depósitos mais antigos ainda, inclusive sucessões ligadas à Chapada Diamantina, na Bahia, uma das grandes fontes históricas de diamantes do Brasil (Gonzaga e Tompkins, 1991). O caminho exato entre essas bacias e o Baixo Tocantins ainda precisa de proveniência sedimentar e paleodrenagem. A conexão publicada é um modelo regional, não identidade grão a grão.

Aqui entra o instrumento próprio deste capítulo. Quando um diamante cristaliza no manto, ele às vezes aprisiona cristais minúsculos da rocha ao redor, as inclusões, lacradas há bilhões de anos num cofre que nada atravessa. São amostras diretas do manto profundo, e dizem em que rocha o diamante cresceu. Olivina e cromita rica em

magnésio apontam para peridotito, o manto comum, e em particular para harzburgito, o peridotito mais empobrecido, típico das quilhas arqueanas. Granada e clinopiroxênio de certas composições apontam para eclogito, a crosta oceânica transformada do capítulo 2, enterrada sob o cráton por subducção (Stachel e Harris, 2008). O lote de São João contém inclusões de olivina e cromita magnesiana. A associação é peridotítica, e a cromita sugere substrato harzburgítico. Essa conclusão vale para os cristais analisados. Para definir a população inteira serão necessários mais grãos, química quantitativa das inclusões e comparação com os campos composicionais de diamantes férteis.

Itacaiúnas, Parauapebas, Sororó e a grota do Sereno acrescentam outra observação. Diamantes pequenos, transparentes, octaédricos ou de formas simples, com arestas vivas e faces pouco trabalhadas (Höhn et al., 2018). O aspecto reduz a probabilidade de transporte longo e de múltiplos ciclos. Não fixa distância em quilômetros, porque a resistência do diamante, a energia do rio, o tempo de residência e o armazenamento local variam. A fonte pode ser um corpo primário próximo ou um conglomerado pouco retrabalhado.

Essas ocorrências ainda carecem de inclusões caracterizadas. A associação peridotítica de São João não deve ser transplantada para o Sereno. A comparação correta formula uma previsão. Se as populações frescas vêm dos mesmos retalhos de quilha, suas inclusões e seus minerais acompanhantes devem convergir para um manto cratônico semelhante. Se divergirem, Carajás abriga mais de uma fonte.

4. A quilha vista de cima

Não dá para furar cento e cinquenta quilômetros. A quilha é vista de cima, por três métodos que enxergam propriedades diferentes, e vale dizer o que cada um vê.

A gravimetria mede variações minúsculas da gravidade de um lugar para outro, e essas variações refletem a distribuição de massa embaixo. Uma quilha de manto empobrecido é um pouco menos densa que o

manto ao redor e deixa uma marca. Motta et al. (2019) modelaram variações da litosfera a partir do campo de gravidade e sugeriram domínios espessos sob Rio Maria e Carajás, com afinamento relativo para Bacajá, e Oliveira (2018) descreveu as assinaturas gravimétricas dos dois domínios. Os valores de 250 a 275 quilômetros de espessura pertencem ao modelo adotado, não a uma medição direta da base da litosfera. Densidade da crosta, composição do manto e premissas térmicas fazem com que mais de uma arquitetura produza a mesma gravidade.

O campo gravimétrico se parece com uma sombra. Ele denuncia a distribuição de massa, mas objetos diferentes podem projetar contornos semelhantes. A tomografia sísmica acrescenta outra direção de luz. Ela usa as ondas de terremotos distantes, que atravessam o manto mais depressa onde ele é frio e rígido, e monta uma imagem tridimensional de velocidades, como uma tomografia médica monta a do corpo. Anomalias rápidas sob Carajás e Bacajá são compatíveis com manto frio e espesso, e os modelos continentais reconhecem velocidades de cráton em parte da coluna (Costa et al., 2020; Melo et al., 2025). As funções do receptor, um terceiro método, delimitam a base da crosta (Albuquerque et al., 2017). E o fluxo de calor medido em poços, convertido em temperatura com a profundidade, também favorece um domínio antigo e frio (Corrêa et al., 2022). A quilha ganha forma quando sombras independentes convergem para a mesma arquitetura.

A convergência entre métodos sustenta a existência da quilha. Sua geometria detalhada permanece aberta. A continuidade norte-sul da gravimetria pode refletir composição arqueana, suturas paleoproterozoicas, contraste de crosta ou reativação toniana. Chamá-la de ombreira do Araguaia exige modelagem flexural, relações de corte e dados profundos adicionais. Ela será usada como corredor a testar, não como mapa pronto de corpos.

A comparação com Teixeira et al. (2021) deve ser precisa. Aquele modelo e este concordam em quilha, extensão e controle profundo. Divergem no motor do magmatismo neoarqueano. Teixeira privilegia pluma e magma na base da crosta sob uma quilha; este livro privilegia a extensão localizada pela sutura, depois de placa rasa e ruptura, sobre manto

hidratado. A presença da quilha independe dessa divergência.

5. Quando o diamante se formou

As inclusões também datam, quando contêm os minerais certos, e o que elas dizem no mundo é que diamantes em harzburgito costumam ter mais de 3 bilhões de anos, enquanto diamantes em eclogito se tornam comuns depois que crosta oceânica passa a ser reciclada sob os continentes (Richardson et al., 1984; Shirey e Richardson, 2011; Gurney et al., 2010). Shirey e Richardson leram nisso o início do ciclo das placas em 3 Ga, o que combina com o relógio mecânico do capítulo 3. A cronologia global oferece possibilidades, sem datar os cristais de Carajás.

Uma primeira geração pode acompanhar a estabilização e o resfriamento da quilha de Rio Maria depois de ca. 2,87 Ga. Carbono e fluidos do manto teriam precipitado diamante em harzburgitos empobrecidos. A cromita magnesiana de São João é compatível com esse ambiente, mas a idade exige sulfetos ou silicatos inclusos adequados.

Uma segunda geração pode estar ligada à subducção mesoarqueana do capítulo 4. Crosta oceânica introduzida sob a quilha fornece eclogito, carbono e fluidos. O ciclo entre ca. 3,08 e 2,87 Ga e a placa rasa posterior oferecem o substrato mecânico. Encontrar granada ou clinopiroxênio eclogíticos, acompanhados de idades coerentes, distinguiria essa população.

Fluidos mais jovens podem ter formado diamantes de outros tipos e rejuvenescido inclusões antigas. Os pulsos de 2,76, 2,57 e 1,88 Ga atravessaram porções diferentes da litosfera. Alguns destruíram estabilidade; outros entregaram fluido com carbono às bordas frias. A datação de sulfetos por rênio-ósmio, de granadas e piroxênios por samário-neodímio e o estudo do nitrogênio dentro do próprio diamante podem separar geração, residência e sobreposição (Bulanova et al., 2010).

6. Quando o diamante subiu

Formação no manto e chegada à superfície são eventos independentes, e o veículo tem nome. Kimberlito é um magma raro, vindo de mais de cento e cinquenta quilômetros, rico em gás e em voláteis, que sobe pela litosfera em horas ou dias, arrancando pedaços das rochas que atravessa. Esses pedaços, os xenólitos, chegam à superfície com os diamantes dentro, e o kimberlito se alojaria numa chaminé estreita, em forma de cenoura, que a erosão depois desmonta. Margens de cráton e ombreiras de rifte favorecem as fraturas profundas de que esse magma precisa, perto de litosfera ainda espessa. A regra de Clifford é, em parte, uma regra sobre onde os kimberlitos conseguem subir cheios (Helmstaedt e Gurney, 1995).

O diamante é o passageiro; o kimberlito, o elevador. A idade de uma inclusão pode alcançar a formação ou a residência do passageiro no manto. A idade da rocha magmática informa quando o elevador subiu. Confundir os dois relógios seria datar uma pessoa pela idade do veículo que a transportou.

A janela toniana do Araguaia é o principal candidato deste livro. Magmatismo alcalino entre ca. 1,05 e 1,0 Ga registra extensão na borda oriental, a rede do capítulo 10. A litosfera de Carajás ocupava a ombreira ocidental desse rifte, a borda levantada que todo rifte produz dos dois lados do vale. Calor, flexura e estruturas herdadas produzem um cenário mecanicamente favorável à ascensão de magmas profundos.

Favorável não significa confirmado. Nenhum kimberlito toniano com diamante foi datado na província. Os diques picríticos de Serra Verde são ultramáficos, ricos em magnésio e cortam as rochas ao redor, portanto merecem petrologia e geocronologia. Mas picrito é um magma de alto grau de fusão do manto, e tem origem diferente da maioria dos kimberlitos. Só a química de elementos-traço, os isótopos, a mineralogia de alta pressão e a idade dirão se ele compartilha o episódio extensional ou qualquer capacidade de transportar diamante.

O colapso cambriano entre ca. 0,54 e 0,48 Ga oferece a janela secun-

dária. Os diques de 535 Ma provam reabertura magmática de Carajás, sem provar magmas kimberlíticos. Corpos tonianos poderiam ter sido deformados durante a inversão brasiliana e expostos à erosão; corpos cambrianos seriam posteriores à inversão ou contemporâneos ao colapso. As relações estruturais permitem separar as hipóteses.

O primeiro resultado decisivo é uma idade de colocação de um corpo. Badeleíta pode datar alguns magmas máficos; perovskita, zircão e flogopita podem servir em rochas kimberlíticas. Até essa idade existir, Toniano permanece previsão.

7. Do corpo ao rio

Entre a entrega e o cascalho atual existem erosão, estocagem e reciclagem. A população distante pode ter passado por coberturas paleozoicas e depósitos mais jovens. Cada ciclo remove os minerais menos resistentes, arredonda superfícies e mistura fontes. Diamante e quartzo sobrevivem a tudo. Piropo, cromita, ilmenita e diopsídio, os minerais que acompanham o diamante no kimberlito e que os prospectores procuram na bateia porque são mil vezes mais abundantes que ele, sofrem seleção química e mecânica. Por isso a ausência de indicadores num cascalho antigo tem pouco poder de exclusão.

Os travessões rochosos do Tocantins, trechos em que o rio corre sobre rocha dura, funcionam como armadilhas hidráulicas, as mesmas que os garimpeiros aprenderam a procurar. Conglomerados ferruginosos locais, conhecidos como mocororó, podem representar armazenamento intermediário e recimentação de cascalhos antigos. Datar cimentos, medir a proveniência dos seixos e comparar a morfologia dos diamantes acima e abaixo dessas unidades ajuda a reconstruir o número de ciclos.

A população fresca exige estratégia diferente. Se a distância sedimentar é curta, indicadores pouco alterados devem acompanhar parte dos diamantes. A drenagem pode ser seguida rio acima com concentrados padronizados de bateia. Uma queda abrupta de abundância, associ-

ada a mineralogia de manto e a uma anomalia geofísica, define um alvo. Se os diamantes persistirem sem indicadores e acompanharem um conglomerado, a fonte imediata será secundária.

8. Sereno e o mapa de procura

A grota do Sereno é atraente porque combina drenagem curta, cristais pouco desgastados e proximidade de estruturas profundas. Isso justifica prioridade, sem autorizar a frase de que a fonte está a poucos quilômetros. O primeiro objetivo é distinguir corpo primário de estocagem sedimentar local.

A campanha começa na água. Amostras de concentrado em intervalos regulares, contagem e medida dos diamantes, química de cromita, piropo, ilmenita e clinopiroxênio, e caracterização das inclusões nos próprios cristais. Prossegue em terra. Mapeamento de diques e brechas discordantes, magnetometria de alta resolução, eletromagnetometria, gravimetria de detalhe e, onde houver alvo, sondagem.

Na escala da província, as ocorrências devem ser cruzadas com os modelos independentes de espessura e temperatura da litosfera da seção 4. A previsão é estatística. Populações próximas de sua fonte tenderão a se concentrar sobre os retalhos frios ou em suas bordas estruturadas, longe dos corredores mais intensamente removidos. Uma distribuição indiferente à quilha enfraqueceria o modelo.

Três resultados podem reorganizar o capítulo inteiro. Uma inclusão datável que fixe a geração; um corpo magmático datado que fixe a entrega; e uma assinatura isotópica que ligue diamante, indicador e retalho de manto. Até lá, o mapa é prospectivo, não demonstrativo.

9. O primeiro minério

A história humana local começou pelo diamante antes de o ferro projetar Carajás no mundo. Relatos atribuem achados no Tocantins a 1610, mas sua localização e sua natureza documental exigem crítica histórica.

A fase comprovada ganhou força entre as décadas de 1930 e 1960, com garimpos no Baixo Tocantins, mergulhadores de escafandro catando cascalho no leito do rio, produção expressiva e concessão de lavra no Canal do Jahu em 1957 (Höhn e Costa, 2022). A represa de Tucuruí depois cobriu parte dos sítios.

Ferro, ouro e cobre vieram em seguida como ciclos econômicos, ainda que seus estoques geológicos tenham outras idades. A coincidência é literária. A exploração começou pelo mineral que nasceu mais fundo e talvez mais cedo. O capítulo 14 retoma essa sequência para discutir território, Estado e fronteira. Aqui ela encerra a viagem do diamante, do manto à bateia.

10. Níveis de confiança

São dados a produção histórica, a morfologia dos lotes descritos, as ocorrências nos rios, as inclusões analisadas em São João do Araguaia, as propriedades geofísicas e térmicas publicadas e a presença de magmatismo toniano e cambriano na região ampliada. Também é dado que o corpo primário permanece desconhecido.

São modelos publicados a estabilidade do diamante sob geotermas de cráton, a associação de diamantes harzburgíticos antigos com quilhas empobrecidas, o crescimento de populações eclogíticas com a reciclagem de crosta, a regra de Clifford e a capacidade de riftes de focalizar magmas profundos. Os modelos gravimétricos e tomográficos sustentam uma raiz espessa, com geometrias e resoluções próprias.

São hipóteses deste livro a sobrevivência canalizada da quilha; as gerações arqueanas propostas; a entrega toniana pela borda do Araguaia; a janela cambriana secundária; a relação dos picritos de Serra Verde com o episódio extensional; a leitura do Sereno como ocorrência próxima da fonte; e a correlação entre diamantes frescos e retalhos da litosfera. Cada hipótese tem amostra, idade ou mapa capaz de contrariá-la.

Conclusão

O diamante é o único mineral deste livro que atravessa a história inteira sem mudar. Formou-se numa quilha que o capítulo 2 viu nascer, sobreviveu às perdas de raiz e às rupturas que os capítulos 4 a 9 contaram, subiu, talvez, pela janela que o capítulo 10 abriu, e terminou numa bateia no Tocantins, onde a história humana de Carajás começou. Tudo o que o capítulo não sabe, quando ele se formou, quando subiu, de onde vem o cascalho, está escrito em instruções de busca. É a forma honesta de um mapa que ainda não encontrou o corpo.

O próximo capítulo abre a lente para o maior ciclo de todos, o dos supercontinentes, e pergunta o que a montagem e a ruptura dos continentes fizeram com a crosta e com a vida.

Referências

Albuquerque, D. F.; França, G. S. et al. (2017). Crustal structure of the southeastern Amazonian Craton from receiver functions. Journal of South American Earth Sciences, 79, 431–442.

Bulanova, G. P. et al. (2010). Mineral inclusions in sublithospheric diamonds. Contributions to Mineralogy and Petrology, 160, 489–510.

Clifford, T. N. (1966). Tectono-metallogenic units and metallogenic provinces of Africa. Earth and Planetary Science Letters, 1, 421–434.

Corrêa, R. T. et al. (2022). Thermal structure of the Amazonian Craton. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 127, e2021JB023025.

Costa, I. S. L.; Rocha, M. P.; Klein, E. L.; Vasquez, M. L. (2020). Lithospheric structure beneath southeastern Amazonian Craton from multifrequency seismic tomography. Journal of South American Earth Sciences, 101, 102608.

Gonzaga, G. M.; Tompkins, L. A. (1991). Geologia do diamante. In: Schobbenhaus, C. et al. (eds.), Principais Depósitos Minerais do Brasil, v. 4A. DNPM/CPRM.

Gurney, J. J.; Helmstaedt, H. H.; Richardson, S. H.; Shirey, S. B. (2010). Diamonds through time. Economic Geology, 105, 689–712.

Helmstaedt, H.; Gurney, J. J. (1995). Geotectonic controls of primary diamond deposits. Journal of Geochemical Exploration, 53, 125–144.

Höhn, H. (2000). Diamantes de São João do Araguaia, Pará. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Pará.

Höhn, H. et al. (2018). Catodoluminescência de diamante do rio Tocantins. Boletim do Museu de Geociências da Amazônia, 5(2).

Höhn, H.; Costa, M. L. (2022). Os diamantes de São João do Araguaia no Estado do Pará: histórico, extração, mineralogia e valorização. Boletim do Museu de Geociências da Amazônia, 9(1). https://doi.org/10.31419/ISSN.2594-942X.v92022i1a3HHN

Melo, B. C. et al. (2025). SACI-24: a shear-wave velocity model of the South American lithosphere. Gondwana Research, 138, 139–167.

Motta, J. G.; Souza Filho, C. R.; Carranza, E. J. M.; Braitenberg, C. (2019). Archean crust and lithospheric structure of the Carajás Province from satellite gravity. Scientific Reports, 9, 2565.

Oliveira, R. G. (2018). Gravity signatures of the Rio Maria and Carajás domains. Journal of the Geological Survey of Brazil, 1(3), 101–112.

Richardson, S. H.; Gurney, J. J.; Erlank, A. J.; Harris, J. W. (1984). Origin of diamonds in old enriched mantle. Nature, 310, 198–202.

Shirey, S. B.; Richardson, S. H. (2011). Start of the Wilson cycle at 3 Ga shown by diamonds from subcontinental mantle. Science, 333, 434–436.

Stachel, T.; Harris, J. W. (2008). The origin of cratonic diamonds: constraints from mineral inclusions. Ore Geology Reviews, 34, 5–32.

Teixeira, N. A. et al. (2021). Carajás Mineral Province –- Example of metallogeny of a rift above a cratonic lithospheric keel. Journal of South American Earth Sciences, 108, 103091.

Zhu, R.-X.; Xu, Y.-G. (2019). The destruction of the North China Craton: significance and process. Science China Earth Sciences, 62, 1340–1350.