



A 600 km abaixo da superfície

Mapeamentos redefinem limites de estruturas rochosas mais antigas e profundas da América do Sul

CARLOS FIORAVANTI

Técnicas de tomografia semelhantes às usadas para examinar o interior do corpo humano expuseram uma inesperada fragmentação das camadas a até 600 quilômetros (km) abaixo da superfície terrestre. As imagens levaram à redefinição de limites, evidenciaram estruturas profundas sobre as quais havia apenas indícios e reforçaram a ideia de que mapeamentos superficiais não bastam para desenhar o esqueleto rochoso da América do Sul.

As imagens em diferentes profundidades são feitas a partir das análises de vários tipos de ondas geradas pelos tremores de terra, também chamados de sismos. Captadas inicialmente por aparelhos chamados sismógrafos, elas atravessam o interior da Terra em velocidades que variam de acordo com a densidade das rochas: a velocidade

é maior onde a litosfera – a camada sólida mais externa da Terra – é mais espessa e fria e menor onde é mais fina e quente. É uma forma de ver os limites dos chamados crátons, blocos de rochas com centenas a milhares de quilômetros de extensão, às vezes encobertos por rochas sedimentares ou solo. Formados geralmente entre 1 bilhão e 2 bilhões de anos, quando a Terra ainda era muito quente, constituem o arcabouço da estrutura geológica dos continentes, ao redor do qual se agregam outras estruturas rochosas (*ver Pesquisa FAPESP nº 188*).

Em um dos levantamentos mais recentes e abrangentes, detalhado em artigo publicado em novembro na revista *Gondwana Research*, a física mineira Bruna Chagas de Melo e colegas do Instituto de Estudos Avançados de Dublin, na Irlanda, mostraram que o cráton amazônico, até agora visto como uma estrutura única, ovalada,



O pico de Cabugi, em Angicos (RN), preserva a forma original de um vulcão que não teve forças para liberar o magma que subiu por frestas da litosfera mais fina

em meio ao qual corre o rio Amazonas, pode na realidade ter duas unidades, separadas lateralmente a cerca de 200 km abaixo da superfície.

Também de acordo com esse trabalho, os limites de outro cráton, o do São Francisco, são mais amplos e estão mais a sudoeste do que mapeamentos anteriores indicavam. Três unidades antigas da estrutura geológica continental, propostas pelo geólogo Umberto Cordani, do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc-USP), no início dos anos 1980, ganharam contornos mais nítidos: o cráton do rio de la Plata, que abarca partes do estado do Rio Grande do Sul, do Uruguai e da Argentina e dois blocos cratônicos, assim chamados por estarem cobertos por bacias sedimentares, Parnaíba, no Piauí, e Paraná (ou Paranapanema), sob a bacia do rio Paraná, nos estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul.

Conhecer melhor – em profundidades maiores – essa estrutura rochosa mais antiga ajuda a detalhar a evolução tanto geológica quanto biológica do continente, já que a cordilheira dos Andes, a oeste, à medida que se formava, inverteu o sentido dos rios, moldou a superfície e barrou a umidade do Atlântico, favorecendo o surgimento de novas espécies de plantas e animais, principalmente na região amazônica (ver Pesquisa FAPESP nº 334). Também ajuda a explicar a origem de províncias minerais, incluindo as áreas mais prováveis para encontrar diamantes, que se formam a pelo menos 150 km de profundidade, e reforça a história de paisagens, como as associadas ao vulcanismo, que ocorre em regiões de litosfera mais fina.

Principalmente a leste do Amazonas e sul do Pará, há quase 2 bilhões de anos havia dezenas de vulcões e rios de lava correndo sobre a superfície (ver Pesquisa FAPESP nºs 81, 174, 250). Em épocas mais recentes, o magma subiu também nas regiões ocupadas pela ilha de Marajó, no Pará, e Dourados, em Mato Grosso do Sul, e há canais de magma, embora inativos, sob os arquipélagos de Fernando de Noronha, Trindade e Martin Vaz.

Ainda há sinais explícitos de magmatismo, como o pico de Cabugi, em Angicos, no Rio Grande do Norte, com 590 m, que preserva a forma de um vulcão, e outros mais sutis. O município de Poços de Caldas, em Minas Gerais, por exemplo, cresce à beira da cratera de um vulcão, por onde subiu magma há cerca de 60 milhões de anos.

“A ascensão do magma só foi possível porque nessa região, entre o cráton do São Francisco e o bloco do Paranapanema, a litosfera era e ainda é mais fina. Litosfera mais fina significa que a astenosfera, a camada mais quente logo abaixo da litosfera, estava mais rasa, permitindo a fusão das rochas, entre 100 e 200 km de profundidade”, comenta o físico Marcelo de Sousa Assumpção, do Instituto de Energia e Ambiente (IEE) da USP, e coautor do artigo na *Gondwana Research*. Ele estuda os movimentos da crosta desde meados dos anos 1970 (ver Pesquisa FAPESP nºs 53 e 256), foi o orientador de mestrado de Melo e apoiou para fazer o doutorado em um dos grandes centros internacionais de pesquisa em geofísica, na Irlanda.

Melo chegou a Dublin em dezembro de 2018 com o propósito de aplicar o método que seu orientador, o geofísico russo Sergei Lebedev, havia desenvolvido para analisar grandes quantidades de dados sísmicos, os registros das ondas geradas pelos tremores de terra. Em poucos meses, ela reuniu informações sobre cerca de 970 mil ondas

sísmicas, resultantes de cerca de 300 mil tremores, registrados por 9.259 estações sismográficas do mundo, incluindo as do Brasil, coletadas desde 1994, em profundidades de até 600 km.

“É uma quantidade de dados assombrosa, nunca vi uma coisa dessas”, admira-se o geólogo Reinhardt Adolfo Fuck, professor emérito da Universidade de Brasília (UnB), que estuda a evolução da litosfera no Brasil há 50 anos (*ver Pesquisa FAPESP nº 122*). “Tiveram um cuidado enorme em fazer as correções necessárias e excluir o que tinha de ser descartado.”

Seis meses depois, em um congresso em Viena, na Áustria, Melo apresentou as primeiras evidências de que o cráton amazônico seriam dois, um ao norte e outro ao sul do rio Amazonas. “Não vi o bloco inteiro em nenhuma profundidade”, ela comentou em novembro, revendo seu trabalho.

Com outra metodologia de análise de ondas sísmicas, menos dados – 112 tremores e 1.311 estações sísmicas – e uma profundidade máxima também menor, de 500 km, o geofísico Caio Ciardelli já havia levantado a possibilidade de as regiões mais profundas de cada lado do cráton terem afinado, em razão de movimentos do interior da Terra, e se rompido, como detalhado em seu doutorado, concluído em 2021 no Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da USP, e em um artigo de janeiro de 2022 na *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. “O resultado de outras tomografias variava, mostrando ora continuidade, ora separação”, comenta Assumpção, que orientou o doutorado de Ciardelli, atualmente em estágio de pós-doutoramento na Universidade Northwestern, nos Estados Unidos. “Bruna desempatou o debate, ao mostrar que

houve um afinamento ou um desgaste ao longo do rio Amazonas.”

O físico da UnB Marcelo Rocha, que trabalha com tomografia da litosfera desde 2001, discorda. “Não desempatou. Qualquer conclusão ainda é prematura, porque temos poucos dados sobre a região, uma das menos estudadas do Brasil. Ali, as estações sismográficas são poucas e estão a 800 ou mil km entre si”, diz. “Na verdade, o cráton amazônico não é um nem dois, mas muitos, com idades diferentes, variando de 3,1 bilhões a 1 bilhão de anos.” O fato de haver rochas com as mesmas idades de cada lado, como verificado há décadas pelos geólogos, indica que o cráton já deve ter sido um bloco único, que, em algum momento, se separou em dois, ao menos na superfície, abrindo um vale que seria ocupado pelo rio Amazonas.

O grupo de Dublin argumenta que o magma pode ter subido em pelo menos dois períodos, entre cerca de 550 milhões e 200 milhões de anos, por uma fenda – ou rift – em uma região de litosfera mais fina, próxima a Manaus, e separado as duas partes do cráton. Rocha, novamente, discorda: “A ruptura não se completou, atravessando todo o cráton, de leste a oeste”. Fuck reforça: “A ruptura não progrediu, formando um mar entre os dois blocos, mas deu origem às bacias sedimentares do Amazonas e do Solimões”.

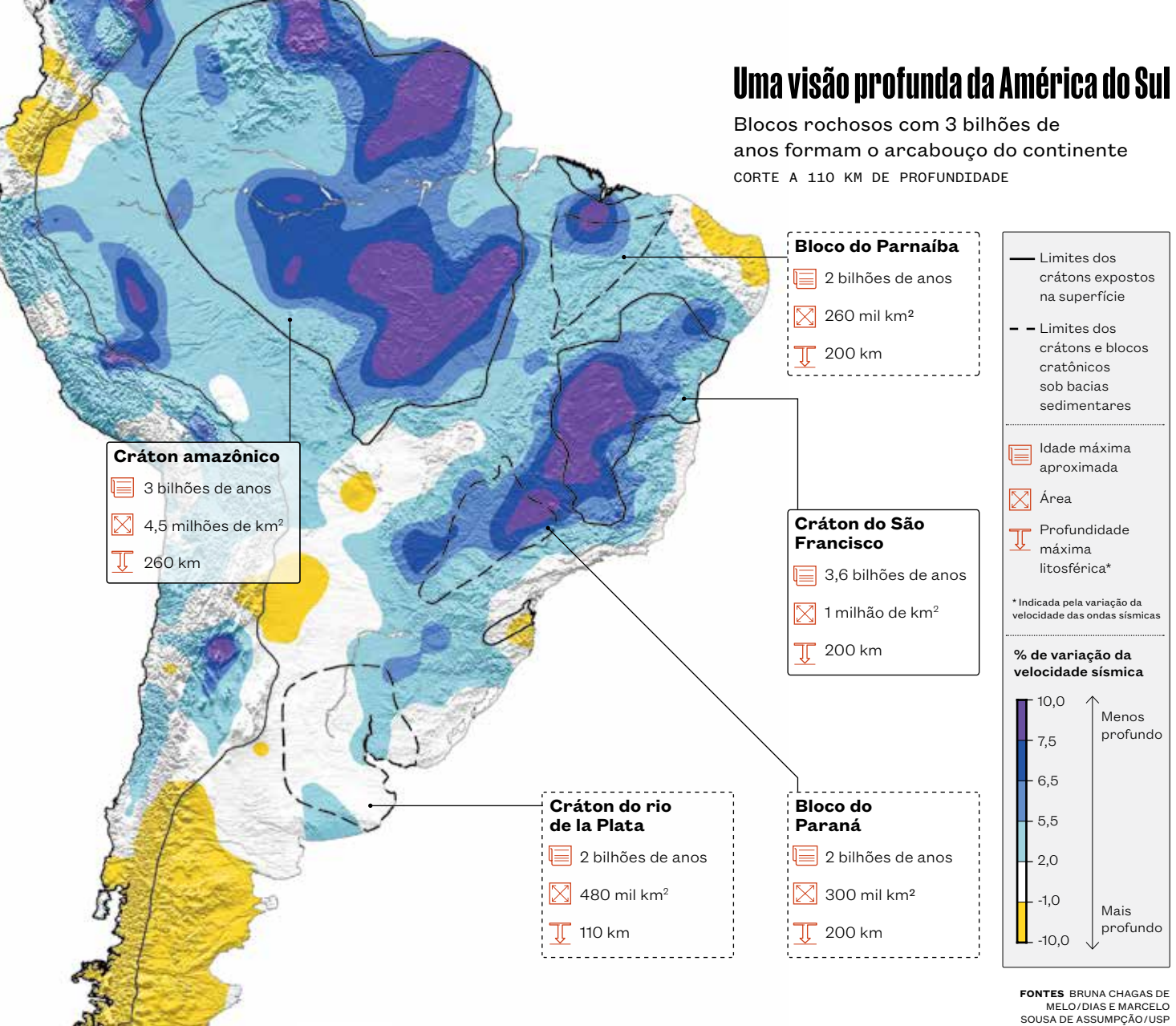
Melo replica: “Não sabemos o formato e a extensão exata do rift ou se a litosfera já era segmentada previamente, facilitando a sua propagação em certa direção”.

A serra do Espinhaço, que se estende por cerca de mil km nos estados de Minas Gerais e Bahia, marca o limite leste do cráton do São Francisco



Uma visão profunda da América do Sul

Blocos rochosos com 3 bilhões de anos formam o arcabouço do continente
CORTE A 110 KM DE PROFUNDIDADE



Com a equipe de Dublin, ela redefiniu também os limites e o formato do cráton do São Francisco, limitado, a leste, pela serra do Espinhaço, que se estende por cerca de mil km nos estados de Minas Gerais e Bahia, com altitude máxima de 2.072 m. Nessa nova versão, em vez de um bloco único, como indicado por medições geológicas superficiais, o cráton aparece mais alongado, com uma região central mais profunda ao centro e duas menores, a nordeste e a sudoeste.

Na tomografia, por causa do limite de resolução, o bloco cratônico Paranapanema poderia estar colado ao cráton do São Francisco, mas ainda não está claro. “O maior bloco logo ao sul do cráton do São Francisco está muito próximo do bloco central para a tomografia conseguir separar os dois”, diz Melo. Nas análises do cráton do São Francisco feitas pelo grupo de Rocha e publicadas em julho de 2019 no *Geophysical Journal International*, os dois blocos aparecem separados.

Outra divergência: Ciardelli identificou o bloco Paranapanema como único, ao passo que Melo o viu fragmentado. As conclusões divergem por causa da abordagem metodológica, já que as análises se apoiaram em diferentes ondas sísmicas, mais adequadas para definir a profundidade ou a largura dos blocos da litosfera. “Provavelmente vamos demorar alguns anos até concluirmos qual é o melhor modelo de análise de dados geofísicos”, contemporiza Rocha.

A despeito das incertezas e das medições indiretas, tais estudos representam um avanço, ao indicar o provável formato de blocos de rochas a centenas de quilômetros da superfície, muito acima da capacidade de observar diretamente o interior da Terra. O poço mais profundo, perfurado de 1970 a 1989 na península de Kola, na Rússia, tem 12,2 km. ●

Os projetos e os artigos científicos consultados para esta reportagem estão listados na versão on-line.