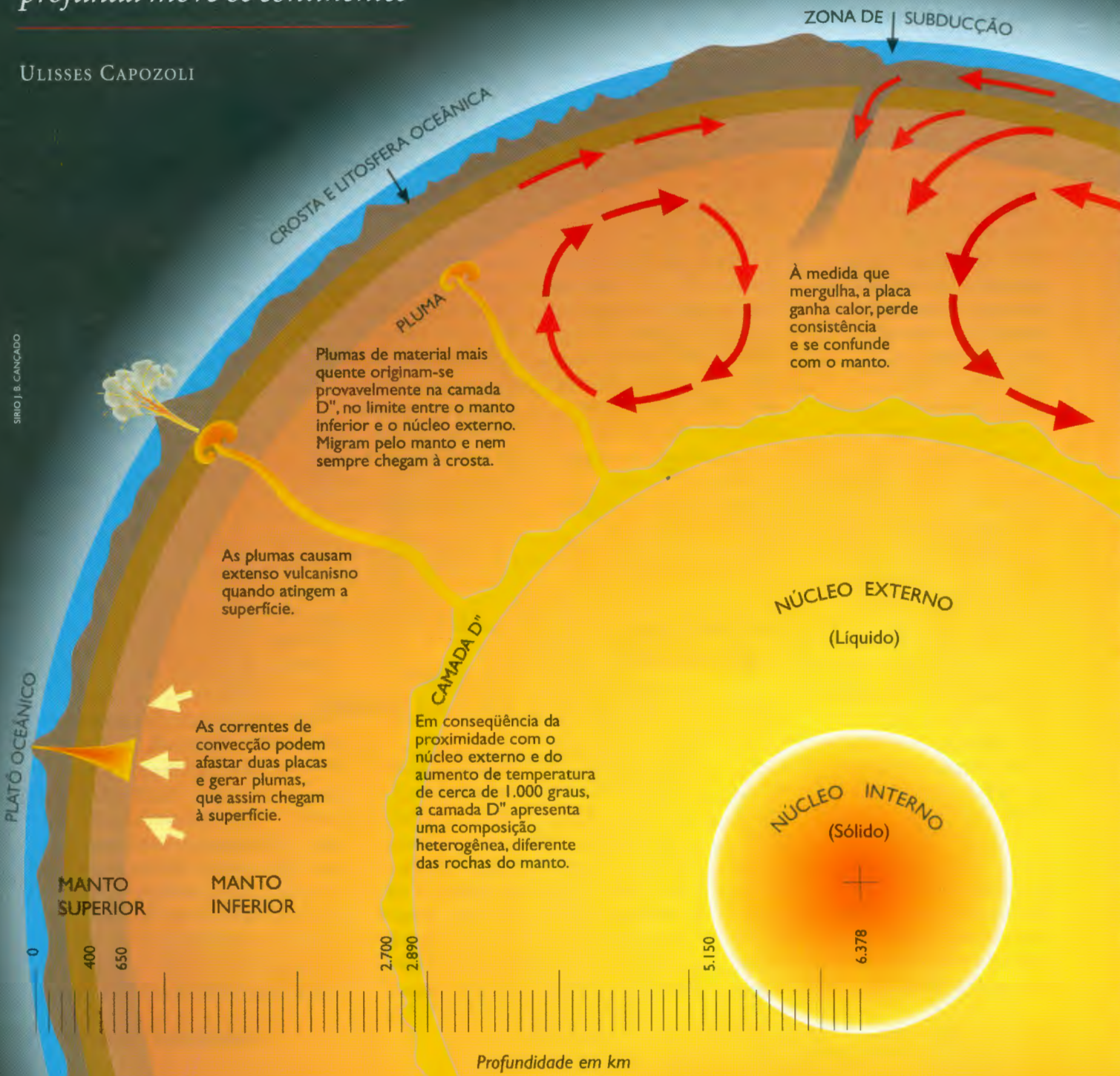


ATERRA

Descoberta reforça a idéia de que convecção profunda move os continentes

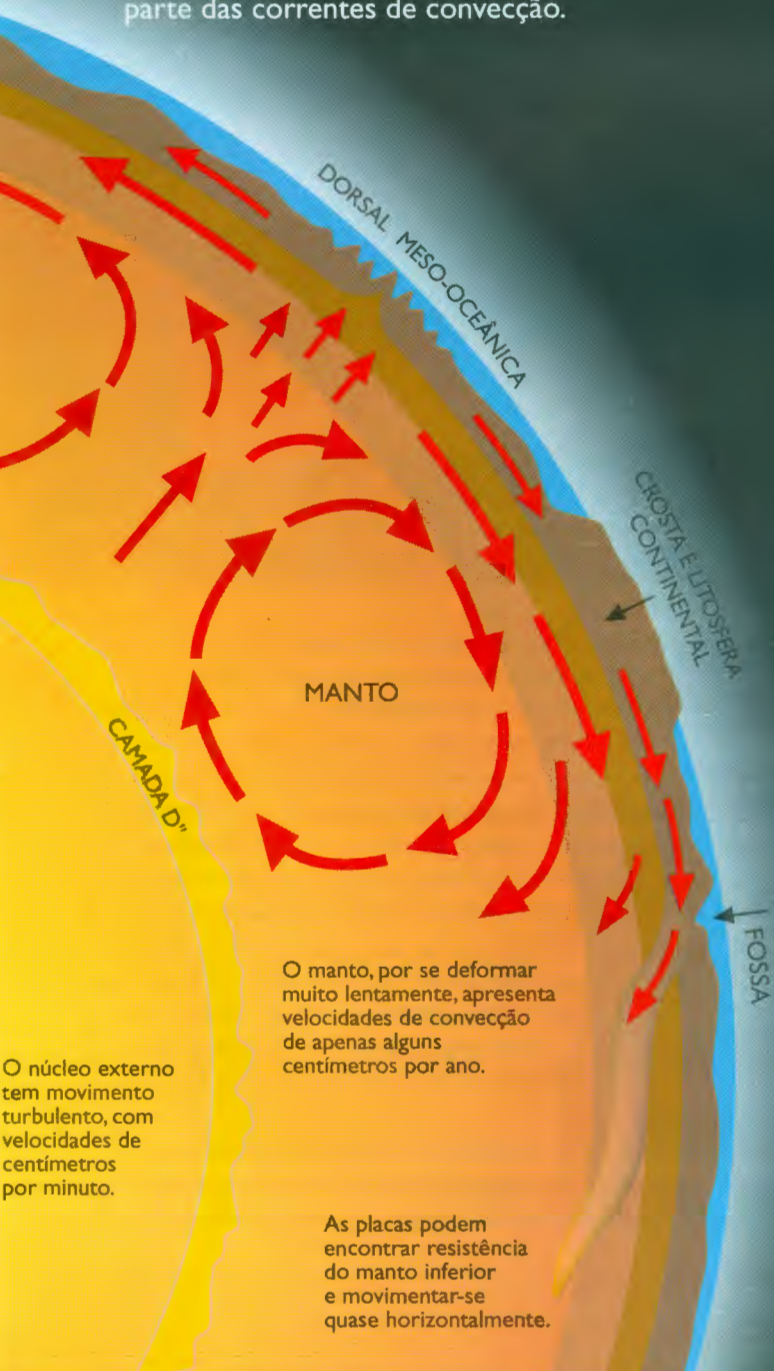
ULISSES CAPOZOLI



SIRIO J. B. CANÇADO

INQUIETA

Sob ação do resfriamento e do próprio peso, as placas tectônicas afundam no manto e acabam fazendo parte das correntes de convecção.



O manto, por se deformar muito lentamente, apresenta velocidades de convecção de apenas alguns centímetros por ano.

O núcleo externo tem movimento turbulento, com velocidades de centímetros por minuto.

As placas podem encontrar resistência do manto inferior e movimentar-se quase horizontalmente.

Após estudar durante mais de uma década os movimentos das placas tectônicas, os imensos blocos de rochas que formam a superfície terrestre, o físico Marcelo Sousa de Assumpção chegou a uma conclusão importante. Já se sabia que os continentes, a parte visível das placas tectônicas, não se deslocam por deriva, como uma jangada sem velas. A energia que os move é, sim, o calor contido no interior do planeta. As placas tectônicas se encontram ou se afastam, portanto, por convecção, como numa panela de água em fervura, produzindo deslocamentos na superfície. Professor do Instituto Astronômico e Geofísico (IAG) da Universidade de São Paulo (USP), Assumpção coordenou uma equipe que descobriu: esse movimento pode ser mais profundo do que se pensava. Segundo ele, todo o manto superior, a camada abaixo da crosta, move-se com as placas da superfície, a uma profundidade que, pelo menos no Brasil, pode chegar a 700 quilômetros – não apenas a 100 ou 200, como já se sabia. Esse movimento agora de limites ampliados envolve tanto o manto superior, mais próximo da crosta, quanto o inferior, mais profundo (ver ilustração ao lado).

“Portanto, podemos descartar uma das hipóteses admitidas anteriormente, que sugeria que o movimento de convecção estaria inteiramente confinado no manto superior”, comenta Assumpção, que faz parte de um grupo internacional de pesquisas nessa área, formado também por especialistas da Carnegie Institution of Washington, Estados Unidos, e da Universidade de Montpellier, da França. Essa descoberta contribuiu para o refinamento da teoria das placas tectônicas, formulada no início do século pelo geofísico alemão Alfred Lothar Wegener (1880-1930). Até que Wegener publicasse seu estudo *Origem dos Continentes e Oceanos*, em 1915, tinha-se como certo que a superfície da Terra era imóvel – e não havia como explicar de modo cientificamente razoável, por exemplo, os terremotos, hoje vistos como uma consequência do encontro das placas. Morto na última das três expedições à Groenlândia, o geofísico alemão propôs que, no passado geológico, existiu um continente único, batizado de Pangea, envolto por um oceano, chamado Talassa. A ruptura do Pangea produziu blocos menores e um deles, o Gond-

Uma história geológica comum ...

África e América do Sul apresentam estruturas que tiveram a mesma origem, em consequência ...

1 A África e a América do Sul formam um só continente, Gondwana, e movem-se no mesmo sentido. A pluma sob o interior da Terra e atravessa o manto (à direita).



145 milhões de anos

2 A pluma se espalha por cerca de 1.500 km sob a litosfera, derrete a placa de Gondwana e provoca os derrames basálticos da atual Bacia do Paraná e de Etendeka, na África.



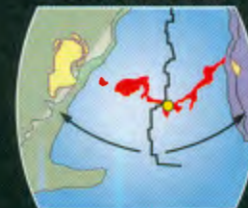
135 milhões de anos

3 África e América do Sul começam a se separar, com a fragmentação de Gondwana. O trecho superior da pluma acompanha a América do Sul e o restante, que continua a subir, inicia a formação da crosta do Atlântico.

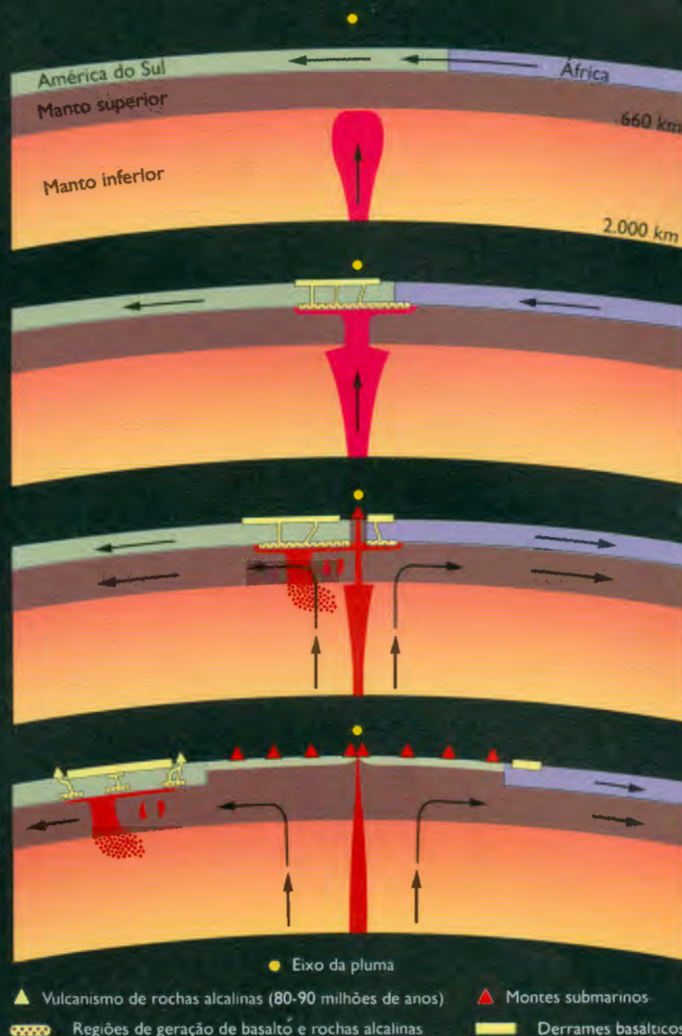


125 milhões de anos

4 O vulcanismo em Tristão da Cunha dá origem a duas regiões elevadas do assoalho oceânico, a Dorsal de Walvis e o Alto Rio Grande.



40 milhões de anos



wana, ao se fracionar, deu origem às atuais África, América do Sul e Antártica (ver ilustração acima).

O ponto de partida de Wegener para estabelecer a teoria das placas tectônicas foi a semelhança entre as costas do Brasil e da África Ocidental, que ele viu como peças que se encaixam num enorme quebra-cabeça. Wegener pensou que os continentes se deslocavam à deriva, flutuando como enormes balsas rochosas sobre uma camada de rochas fundidas, que seria o manto. Comprovou-se a idéia de deslocamento dos continentes, mesmo o manto sendo sólido e não fundido (as rochas do manto apenas se comportam de maneira pastosa, quando vistas numa escala de milhões de anos). Desde essa época, pesquisadores de todo o mundo mapeiam as trajetórias das diversas placas, mas somente nas últimas décadas é que as cor-

rentes de convecção no interior da Terra, ligadas diretamente à movimentação das placas, começaram a ser detectadas, por meio da tomografia sísmica, técnica que mapeia as estruturas do interior do planeta atravessadas pelas ondas geradas em terremotos.

A equipe da USP investigou uma área que forma um retângulo de 1.700 quilômetros de comprimento por 1.000 quilômetros de largura, mergulhando a 1.400 quilômetros de profundidade, na Bacia do Paraná e arredores (ver mapa da pág. 24). A primeira fase do trabalho, restrita a um retângulo de 800 quilômetros por 400 quilômetros, terminou em 1995. Foi bem-sucedida a ponto de justificar a etapa atual, que começou em julho de 1997 e deve estar concluída em julho próximo.

Nesse projeto, *Estrutura da Crosta e Manto Superior no Sudeste do Brasil*, com um financiamento de R\$ 173,4 mil da FAPESP, Assumpção conduziu os le-

... iniciada há milhões de anos

... do vulcanismo provocado por uma pluma, que ainda hoje emerge no arquipélago Tristão da Cunha



5 Ainda hoje ocorre vulcanismo em Tristão da Cunha. É o chamado ponto quente: ali, a pluma continua emergindo. As setas indicam o percurso das regiões formadas em Tristão da Cunha. África e América do Sul se distanciam três centímetros por ano.

Fontes: John VanDecar e David James (Carnegie Institution of Washington) e Marcelo Assumpção (Universidade de São Paulo), Seismic evidence for a fossil mantle plume beneath South America and implications for plate driving forces, *Nature*, vol. 378, 1995, p. 29, e Martin Schimmel/IAG-USP

vantamentos de campo e a interpretação de dados com a participação do geofísico alemão Martin Schimmel, que faz pós-doutoramento na USP. No Brasil, os dados coletados durante o projeto têm sido utilizados também em outras pesquisas pela Universidade de Brasília, pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) e pelo Observatório Nacional do Rio de Janeiro.

No início, os pesquisadores da USP e de Carnegie, mais diretamente envolvidos com esse trabalho, utilizaram como fontes de dados as ondas de choque liberadas por terremotos, as ondas P (longitudinais, que chegam primeiro à superfície) e S (transversais), das diferentes regiões do planeta. Publicada na revista *Nature* de 4 de novembro de 1995, essa pesquisa preliminar revelou, entre os municípios de São José do Rio Preto, Ribeirão Preto e Franca, no interior de São Paulo, a existência de uma estrutura interpretada como um antigo conduto vulcânico no manto, causado por

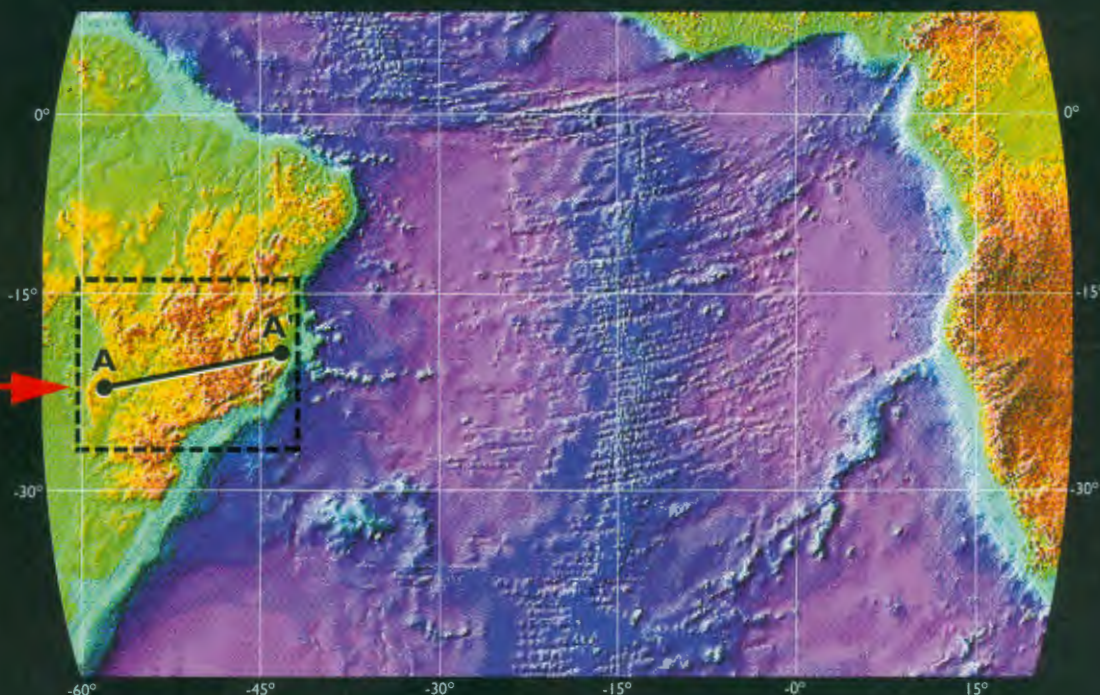
uma pluma. Deduzidas a partir de estudos em computador e em escala reduzida de laboratório, as plumas são colunas de rocha quente que se originam a grandes profundidades no manto, sobem à superfície e causam extenso vulcanismo. Nos últimos anos, as plumas estão sendo finalmente detectadas, como a que dá origem à Ilha da Islândia no Atlântico Norte. Segundo Assumpção, esse material vindo do interior da Terra pode perfurar a crosta, como enormes projéteis, e teve um papel importante no processo de ruptura do supercontinente Gondwana.

O pedaço de pluma fóssil – não mais ativa, portanto – do interior paulista situa-se entre 200 e 700 quilômetros de profundidade e tem a largura aproximada de 300 quilômetros. A temperatura dessa estrutura, de acordo com os dados obtidos, está em torno de 1.700 graus Celsius, pelo menos 200 graus Celsius acima da região a seu redor. Segundo Assumpção, essa estrutu-

Retrato atual da superfície e do ...

A topografia do fundo oceânico evidencia a cordilheira Meso-Atlântica, no limite das placas tectônicas ...

O retângulo representa a área estudada pela equipe da USP, e a linha A - A', um corte detalhado na página à direita.



A área central em azul, que corre de alto a baixo da imagem, indica a Dorsal Meso-Atlântica, uma cordilheira submersa formada no limite das placas Sul-Americana e Africana, respectivamente à esquerda e à direita, em rosa. Na América do Sul e na África, o marrom indica as áreas mais elevadas, o verde as altitudes médias e o azul, as mais baixas.

Fonte: Eder Malina/IG-USP

ra já esteve no meio do oceano Atlântico, associada ao arquipélago de Tristão da Cunha, território do Reino Unido, de origem vulcânica, no meio do Atlântico Sul.

Em seguida, a ruptura do Gondwana, que originou os atuais territórios da África e América do Sul, fez nascer o Oceano Atlântico, há 130 milhões de anos. Evidentemente, as placas tectônicas ainda não se aquietaram. Ainda hoje, no assoalho marinho, onde a crosta é menos espessa, o deslocamento das placas produz fraturas por onde brota material quente do manto. Esse é o mecanismo responsável pela Cordilheira Meso-Oceânica ou Dorsal Atlântica, de que o arquipélago Tristão da Cunha é parte. Trata-se de uma área em que as plumas ainda se encontram ativas – o chamado *hot spot* ou ponto quente.

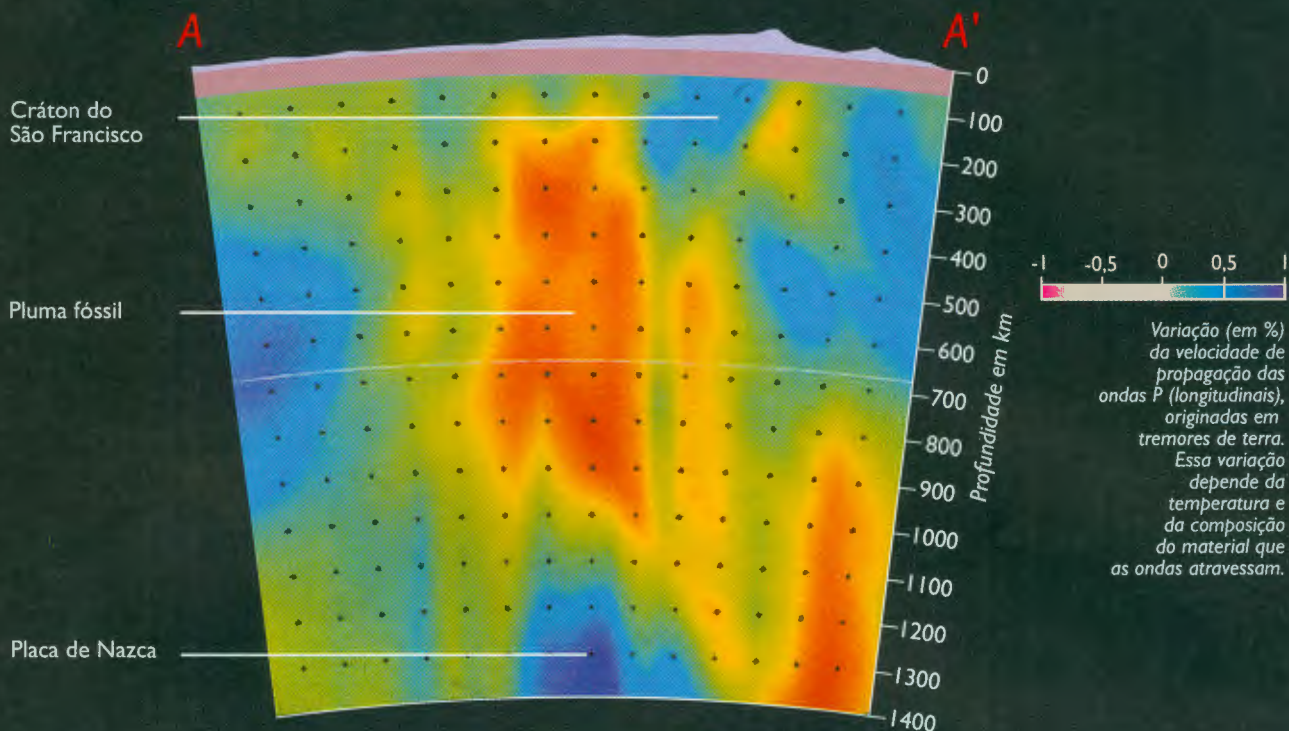
Os dados obtidos na Bacia do Paraná indicam que um pedaço da pluma, a coluna de material quente do manto, desviou-se para oeste e, desse modo, acompanhou o movimento da Placa Sul-Americana, estando hoje inativa e, portanto, fóssil. Na avaliação dos pes-

quisadores, apenas essa descoberta já traz uma importante contribuição ao estudo da dinâmica de placas. O Brasil localiza-se bem no centro da Placa Sul-Americana, que se afasta para oeste à velocidade de 1,5 centímetro ao ano. Como a própria Placa Africana desloca-se para o leste à mesma velocidade, os dois continentes se distanciam entre si à velocidade total de três centímetros ao ano.

Seguindo para oeste, em consequência da movimentação do manto, a pluma do interior paulista manteve-se sob a Bacia do Paraná até hoje. Pouco antes da ruptura do Gondwana, havia sido responsável por extensos derrames de rocha vulcânica (os basaltos), que cobriram a superfície por mais de mil quilômetros, a partir do ponto de origem. Desse modo, os pesquisadores explicam uma característica geológica da Bacia do Paraná, os derrames de basalto. O basalto, rocha vulcânica de cor escura, ao se transformar em solo ao

... movimentado interior da Terra

... enquanto uma tomografia, em corte lateral, ressalta, ao centro, uma região mais quente do manto



A imagem acima representa uma tomografia sísmica de uma área de 1.500 quilômetros, entre Bonito, no Mato Grosso do Sul (ponto A) e Governador Valadares, em Minas Gerais (ponto A'). O azul indica as regiões mais frias, o amarelo as intermediárias e o laranja, as mais quentes. A região central é uma pluma fóssil, localizada no interior paulista. Acima dela, à direita, a área em azul indica o cráton de São Francisco, mais antiga e mais fria. Imagina-se que abaixo da pluma possa estar um pedaço da placa de Nazca, que poderia ter chegado até o Sudeste do Brasil.

Imagem: Martin Shimmel

longo de milhões de anos, deu origem aos solos vermelhos e férteis do Paraná e parte do interior paulista, que ajudam a manter uma das mais produtivas agriculturas do país.

No estudo mais recente, Assumpção e Schimmel delimitaram melhor a coluna de material quente, o pedaço de pluma fóssil, por meio de 38 estações sísmográficas distribuídas ao longo da área de estudo, que se estende de Brasília até parte do Paraná. Tiveram, para isso, de viajar cerca de 20 mil quilômetros nos três anos que a pesquisa já toma. A cada dois meses, os pesquisadores ou os técnicos viajavam até as estações para coletar os dados que eram armazenados pelos sismógrafos computadorizados. Instalados em pequenos abrigos normalmente dentro de fazendas, os sensores registravam as vibrações do solo detectando diariamente terremotos ocorridos no mundo todo. De vez em quando, gravavam também os pequenos tremores, de baixa intensidade, verificados no Brasil.

A velocidade com que as ondas de choque de sísmos chegam às estações depende da temperatura e das rochas que atravessam. Assim, os pesquisadores traçaram um perfil da litosfera (a crosta mais uma pequena parte rígida do manto superior) e do manto até uma profundidade de 1.400 quilômetros. Imagens feitas em computador permitiram também a visualização da pluma, contida no manto (*acima*).

Uma das conseqüências da dinâmica de placas é a formação de montanhas, como acontece no oeste da América do Sul, onde ficam os Andes. Essa cadeia montanhosa, que segue do Chile à Colômbia, origina-se do choque da Placa Sul-Americana com outra placa tectônica, a Placa de Nazca, localizada sob o Oceano Pacífico. O choque faz com que a placa mais pesada (Nazca) mergulhe sob a placa mais leve (América do Sul), que navega em direção oposta. O choque das placas amassa e torna mais espessa a borda da placa mais leve. No caso das placas Sul-Americana e de Nazca, o espessamento da borda ocidental da Placa

Sul-Americana resultou na estrutura dos Andes, um processo ainda ativo, e responsável pelos frequentes terremotos e vulcões dos países andinos como o Equador e a Colômbia.

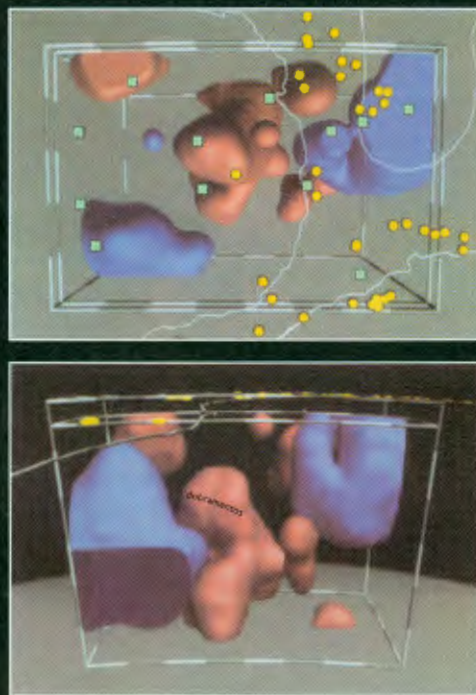
O avanço técnico dos detectores, ao longo dos anos 90, permitiu o salto qualitativo na coleta de dados e o refinamento do modelo de placas tectônicas proposto por Wegener. Com investigações cada vez mais profundas no manto, foi possível saber, por exemplo, que nos processos de subducção – como é chamado o mergulho de uma placa sob a outra – a destruição da placa em mergulho só acontece a grandes profundidades, às vezes a mais de 1.000 ou 2.000 quilômetros.

“**J**á está superado o modelo anterior, que supunha a placa em mergulho se dissolvendo a profundidades de apenas 700 quilômetros”, comenta Schimmel. “Em vez disso, ao mergulhar, mantém-se intacta, sem se dissolver.” Embora constituída pelo mesmo material do manto, a placa é mais fria, mais rígida e mais pesada – portanto, afunda mais facilmente. Os novos recursos tecnológicos permitiram saber também que uma placa pode mudar sua inclinação e, de um mergulho quase vertical, passar a um movimento horizontal. “O que se sabe hoje, com segurança, é que os sismos profundos, que ocorrem até 700 quilômetros abaixo da Placa Sul-Americana, estão ligados ao mergulho da Placa de Nazca”, diz Assumpção. “É provável também que a placa continue mergulhando a maiores profundidades.” A tomografia indicou um bloco de rochas mais frias a aproximadamente 1.300 quilômetros abaixo da região Sudeste do Brasil, numa faixa que se estende de Brasília a Curitiba, que parece ser um pedaço da Placa de Nazca.

A descoberta da pluma sob a Bacia do Paraná surpreendeu. Os pesquisadores pretendiam estudar a região para uma comparação com outras áreas consideradas geologicamente muito antigas, como algumas regiões do Canadá. O interesse era descobrir como a litosfera terrestre foi formada nessas áreas conhecidas como crátons, um termo que define as pro-

As ondas P em três dimensões

Técnicas de tratamento de imagens revelam regiões quentes (em marrom) e frias (azul)



Vista superior tridimensional mostra as regiões de baixa (marrom) e alta velocidade (azul) das ondas P.



Os quadrados verdes são as estações sismográficas e os círculos amarelos pontos de emergência de rochas alcalinas.

Vista lateral, das regiões de alta e baixa velocidade, entre 50 e 600 km de profundidade.

Fonte: John VanDecar e David James (Carnegie Institution of Washington) e Marcelo Assumpção (Universidade de São Paulo), Seismic evidence for a fossil mantle plume beneath South America and implications for plate driving forces, *Nature*, vol. 378, 1995, p. 28.

víncias geológicas que sofreram pouca ou nenhuma deformação desde o pré-Cambriano, há pelo menos 600 milhões de anos.

Outro objetivo do trabalho era determinar a espessura da crosta e da placa litosférica no Sudeste, até então desconhecida, e investigar a possibilidade de que elas pudessem conter blocos tão antigos quanto o do cráton São Francisco, na bacia do Rio São Francisco, em Minas Gerais. O cráton São Francisco, com aproximadamente 3 bilhões de anos, é uma das estruturas mais antigas do planeta. Agora, o trabalho da USP definiu a espessura do cráton, que se estende da superfície a até cerca de 300 quilômetros de profundidade. Revelou também a existência da pluma fóssil evidenciando o arraste da crosta pelo manto superior.

Para Assumpção, ainda é cedo para avaliar se a descoberta da pluma fóssil pode auxiliar em trabalhos como a previsão de sismos, especialmente na borda de atrito das placas. A contribuição imediata, a seu ver, é mostrar que o manto superior se desloca com a crosta e assim conhecer os esforços a que está submetida uma placa, mesmo em sua porção interior. Nessas áreas também podem ocorrer sismos frequentes. “Uma razão para os sismos pode ser a concentração de tensões devido a variações de espessura



ALFRED WEGENER. INST. FOR POLAR AND MARINE RESEARCH

Wegener, o formulador da teoria das placas tectônicas, e Schimmel e Assumpção, da USP: a constatação de que o manto se desloca com a crosta pode ajudar na previsão de tremores de terra



FLÁVIO CANNALONGA

da litosfera”, explica. É o que pode estar acontecendo em uma faixa com tremores de terra constantes que corta o Estado de Goiás no sentido sudoeste-nordeste. A região apresenta um comportamento semelhante ao da região central dos Estados Unidos, onde está satisfatoriamente estabelecida a relação entre sismos e menor espessura da litosfera.

Os pesquisadores da USP acreditam que a descoberta da estrutura das plumas, associada à compreensão das grandes profundidades de mergulho das placas, possa levar a um interesse maior na investigação da região de contato entre a base do manto e o núcleo líquido da Terra (a esfera líquida do centro da Terra tem, em seu interior, um núcleo sólido). Essa região limítrofe é a camada D” (*lê-se D duas linhas*), situada a aproximadamente 2.700 quilômetros da superfície. É uma área de reações físicas e químicas bastante complexas entre o núcleo líquido e o manto pastoso, cuja forma lembra os dentes irregulares de uma serra de disco.

Os geofísicos estimam que nessa região esteja localizado o mecanismo básico das correntes de convecção, o mesmo tipo de força que faz a água fervendo circular de baixo para cima em uma panela. “Tudo

que desce tem que subir”, argumenta Schimmel para estabelecer a relação entre o mergulho de placas formado por material frio e as correntes ascendentes de material a elevadas temperaturas. Segundo a teoria em vigor, o calor do núcleo da Terra resulta da enorme energia gravitacional que deu origem ao planeta há 4,6 bilhões de anos, com a importante contribuição adicional da radioatividade natural. Quando a Terra se formou, o calor era tanto que derreteu tudo. O ferro, mais pesado, foi para o centro, onde está até hoje. Pode ser que, nos próximos anos, também essas idéias consagradas sejam revistas, a partir do que agora se sabe a respeito da movimentação das placas tectônicas e da convecção no manto. •

PERFIL:

• MARCELO SOUSA DE ASSUMPTÃO tem 49 anos. Fez a graduação em Física pelo Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP) e o doutorado em Geofísica na Universidade de Edinburg, na Escócia. É professor do Instituto Astronômico e Geofísico desde 1974.

Projeto: *Estrutura da Crosta e Manto Superior no Sudeste do Brasil*

Investimento: R\$ 173.478,14