# Capítulo 1. A água é a mãe da Terra

Do disco protoplanetário à Terra pré-Theia, a anomalia que precede todas as outras, e por que cada seta deste livro terá água no rótulo

> **Modelo de trabalho**
>
> A Terra reuniu a distância que permite água líquida, massa suficiente para reter voláteis e caminhos distintos para receber hidrogênio. Parte veio incorporada à matéria do Sistema Solar interno; parte nasceu da reação entre H□ nebular e o oceano de magma; parte chegou em planetesimais carbonáceos. Uma vez incorporada, a água modificou fusão, deformação, produção de continente, circulação hidrotermal e habitat. Este livro acompanha a recorrência desse trabalho até os Andes. Moléculas, fluidos e aquíferos mudam; a função geológica retorna.

linha de neve · condritos de enstatita · ingassing · D/H · komatiítos hidratados · serpentina · TTG · escapolita · massa ótima

## Resumo

Toda narrativa escolhe um começo. Esta começa antes da Terra, no disco de gás e poeira que girava em torno de um Sol jovem. Ali, tempe-

ratura e distância separavam dois domínios. Perto da estrela, onde os planetas rochosos cresciam, o calor mantinha a água sobretudo como vapor e impedia que o gelo participasse livremente da construção. Mais longe, além da linha de neve, a água condensava e se tornava parte abundante dos sólidos. A Terra nasceu dentro dessa geometria paradoxal: no setor pobre em gelo e, ao mesmo tempo, na faixa orbital onde um oceano líquido poderia durar.

A travessia ocorreu por caminhos complementares. Hidrogênio acompanhou minerais e vidros semelhantes aos dos condritos de enstatita; o embrião terrestre capturou H□ da nebulosa e o dissolveu no oceano de magma, onde a reação com o óxido de ferro produziu água e enviou ferro metálico para o centro; planetesimais carbonáceos espalhados para o Sistema Solar interno trouxeram outra parcela do inventário. A contribuição de cada fonte permanece em debate. Sua convivência resolve melhor o problema do que a procura por um fornecedor único.

Depois veio a segunda condição: massa suficiente para guardar voláteis durante bilhões de anos. Marte e Vênus mostram caminhos vizinhos. Um perdeu grande parte da atmosfera e da água; o outro conservou massa, mas recebeu energia solar demais para repetir a história terrestre. Na interseção entre órbita, massa, composição e acaso de acreção, a Terra reteve um agente que mudaria continuamente de ofício. A água participou da diferenciação, favoreceu fusão e deformação, entrou na fabricação dos primeiros continentes, circulou por bacias e falhas e sustentou os ambientes em que a vida transformou o planeta. Por isso cada grande seta deste livro carrega água. As moléculas e os aquíferos mudam; a função geológica retorna.

Um dos circuitos alcança o centro do planeta. Parte do hidrogênio acompanhou o ferro durante a diferenciação, e a subducção parece continuar entregando água à fronteira com o núcleo até hoje. Elementos leves dissolvidos no metal abaixam seu ponto de fusão, ampliam a faixa em que o núcleo externo permanece líquido e alimentam a convecção que gera o campo magnético. Esse campo desvia parte do vento solar e reduz a perda de atmosfera para o espaço. A água ajuda a mover o motor que produz o escudo que a protege.

O capítulo termina na Terra pré-Theia: úmida, diferenciada, coberta por uma primeira casca e pronta para receber o impacto que formará a Lua. Chamar a água de mãe da Terra é uma licença poética. O restante do livro tentará demonstrar seu conteúdo mineralógico.

## 1. A anomalia, lida pela água

O Sistema Solar oferece muitos lugares com água. Ela forma oceanos sob o gelo de luas distantes, integra cometas e asteroides, aparece em minerais e ocupa reservatórios profundos. A singularidade terrestre está na combinação: um planeta rochoso manteve água líquida na superfície, armazenou outra parte no interior e ligou os dois domínios por ciclos capazes de atravessar quase toda a sua história.

Essa combinação nasceu de uma dificuldade geométrica, ou melhor, geográfica. A região onde a temperatura permite oceanos superficiais ocupava a parte quente do disco protoplanetário. O gelo, excelente transportador de água, condensava além da linha de neve. Dentro dela, os grãos que alimentaram Mercúrio, Vênus, Terra e Marte eram dominados por silicatos e metal. O planeta que hoje possui oceanos cresceu num aparente deserto, sem gelo.

A linha de neve também se movia. Conforme o disco esfriava e a taxa de acreção diminuía, a fronteira da condensação migrava em direção ao Sol. Corpos eram espalhados por perturbações gravitacionais, colidiam, fragmentavam-se e mudavam de vizinhança. O mapa de temperatura fornecia a estrutura; a dinâmica embaralhava parte do conteúdo. Foi nesse disco móvel que a Terra reuniu seus voláteis.

Há, portanto, duas anomalias. A primeira é que a água chegou a uma zona relativamente seca do Sistema Solar. A segunda é que permaneceu aqui. Receber e reter pertencem ao mesmo problema e obedecem a mecanismos diferentes. Tudo começa antes de existir qualquer planeta.

## 2. Do gás ao grão

Convém imaginar o começo. Uma nuvem molecular de gás e poeira, contendo matéria fabricada por antigas estrelas e talvez enriquecida por uma supernova próxima, começou a colapsar sobre si mesma. Era muito maior que o Sistema Solar de hoje. Quase toda a sua matéria era hidrogênio e hélio, os elementos mais leves e abundantes do universo, e quase toda ela caiu para o centro por gravidade. Ali, pressão e temperatura subiram até acender a fusão nuclear, e o Sol nasceu levando consigo mais de noventa e nove por cento da massa disponível. O restante carregava momento angular: enquanto caía, girava cada vez mais depressa e se achatava num disco ao redor da estrela jovem.

O disco funcionou como uma destilaria. Nas regiões mais quentes, perto do centro, a temperatura ultrapassava mil e quinhentos graus e quase nenhum material volátil sobrevivia em estado sólido; longe do centro, o frio permitia que até a água congelasse. A gravidade recolhia, enquanto o calor selecionava. Some-se a isso o atrito com o gás, que fazia as partículas sólidas perderem momento angular e espiralarem em direção ao Sol, e a dispersão posterior do gás pelo vento e pela radiação da estrela recém-acesa. Dessas operações resulta a arquitetura geral que observamos hoje: planetas pequenos e densos, feitos sobretudo de metal e silicato, na parte interna do Sistema Solar; planetas grandes e ricos em gás e gelo, na parte externa.

Na região mais quente em que os materiais terrestres circularam, a matéria mineral podia estar vaporizada. Não era um plasma uniforme no sentido estrito, mas um gás de átomos e moléculas, parcialmente ionizado conforme a temperatura e a radiação. Ferro, silício, magnésio, alumínio, cálcio e oxigênio circulavam em espécies químicas incapazes de sustentar cristais duradouros. A organização começou quando o resfriamento permitiu que as ligações sobrevivessem aos choques.

Para entender a arquitetura que nasceu desse resfriamento, a mineralogia utiliza uma contabilidade formal de cargas. Ela não descreve íons livres encontrando-se um a um no disco, mas permite reconhecer como as ligações se equilibram dentro do cristal. Nessa contabilidade, o si-

lício assume carga formal Si□□ e o oxigênio, O²□. Quatro oxigênios ao redor de um silício formam a unidade SiO□□□. A soma fecha a geometria e deixa quatro cargas negativas a serem compensadas.

Esse conjunto tem forma e nome. Os quatro oxigênios dispõem-se ao redor do silício como os vértices de um tetraedro, com o silício no centro. É o tetraedro de sílica, a peça de montagem da matéria rochosa. A carga é compensada quando tetraedros compartilham oxigênios ou se ligam a cátions de magnésio, ferro, cálcio, alumínio, sódio e potássio. O silício, um semi-metal da família do carbono, tende a organizar-se em cadeias, mas diferentes das cadeias de matéria orgânica. Tetraedros isolados formam a base da olivina; cadeias simples, a dos piroxênios; cadeias duplas, a dos anfibólios; folhas, a das micas; redes tridimensionais, a dos feldspatos e do quartzo. Na escala molecular, a repetição é periódica e governada por simetria. Em escalas maiores, porém, a mesma solução geométrica reaparece com recorrência fractal: poucas regras produzindo muitas formas. Silicato é o nome coletivo desse clã mineral.

Óxido é uma combinação mais direta, na qual o oxigênio se liga a outro elemento sem a intermediação do tetraedro de sílica. O ferro forma os óxidos mais importantes deste livro, e a diferença entre eles depende do estado de oxidação. Em condições muito redutoras, o ferro permanece ferroso, Fe²□, e pode formar FeO, a wüstita, rara na superfície e estável em ambientes quentes e pobres em oxigênio. Em condições mais oxidantes, passa ao estado férrico, Fe³□, e forma Fe□O□, a hematita. A magnetita, Fe□O□, guarda os dois estados na mesma estrutura. A diferença importa mais do que parece agora. Em águas anóxicas, sem oxigênio dissolvido, o ferro ferroso pode dissolver-se e viajar; oxidado a ferro férrico, tende a perder solubilidade e precipitar. Toda a história do ferro deste livro, das formações ferríferas gigantes ao Grande Evento de Oxidação, passa por essa troca de elétrons.

A magnetita oferece ainda um bônus. Em sua estrutura específica, Fe³□ ocupa sítios tetraédricos, enquanto Fe²□ e Fe³□ dividem sítios octaédricos. Os momentos magnéticos do Fe³□ nas duas sub-redes se orientam em sentidos opostos e praticamente se cancelam; sobra a contribuição

do $Fe^{2}\square$ octaédrico, que dá ao mineral seu forte ferrimagnetismo (Jiang et al., 2016). Por isso a magnetita registra campos magnéticos no interior do cristal como uma pequena bússola. A hematita é um antiferromagneto levemente inclinado e muito mais fraco; a wüstita também é antiferromagnética. Algumas bactérias descobriram a utilidade da magnetita antes de nós: fabricam cristais dentro das próprias células e os usam para se orientar no campo terrestre. Quando morrem, esses cristais entram no sedimento como magnetofósseis.

Com esse vocabulário na mão, a condensação do disco pode ser lida na ordem em que aconteceu. Ela tem uma escada, e cada degrau depende da pressão, da composição e de quanto calor a fase suporta. Os primeiros sólidos foram ricos em cálcio, alumínio e titânio, formados acima de aproximadamente mil e quinhentos graus. Em temperaturas um pouco menores condensaram ligas de ferro e níquel e silicatos magnesianos como forsterita e enstatita; depois vieram feldspatos e, mais abaixo, sulfetos como a troilita, onde o $S^{2-}$ domina a ligação com os metais no lugar do $O^{2-}$. Minerais contendo água na sua estrutura, preservados em meteoritos, formaram-se em grande parte mais tarde, por reação entre água e rocha dentro dos corpos parentais. O gelo, mais volátil que todas essas fases, só se tornou estável além da linha de neve. A mesma escada térmica que separa refratário de volátil explica por que os planetas internos nasceram dominados por silicato e metal (Lodders, 2003).

A água merece uma parada aqui, porque se comporta de maneira diferente de quase tudo o mais que condensou. Sua molécula tem dois átomos de hidrogênio ligados a um de oxigênio num ângulo aberto, perto de cento e cinco graus. Essa assimetria deixa um lado levemente positivo e outro levemente negativo, e moléculas assim se atraem entre si. Daí vem muito do que a água tem de estranho. Ela permanece líquida numa faixa ampla de temperatura, enquanto substâncias de massa molecular semelhante são gases. Absorve muito calor antes de esquentar, o que ajuda a estabilizar climas. Atinge densidade máxima acima do ponto de congelamento, de modo que o gelo flutua e os oceanos congelam pela superfície. E dissolve sais com grande eficiência,

carregando íons de um lugar para outro. Dissolvida em rochas fundidas, baixa suas temperaturas de fusão; isso será decisivo na geração de magmas e na evolução do manto e da crosta nos próximos capítulos.

A água também se desmonta. Uma fração minúscula das moléculas reage consigo mesma o tempo todo, produzindo H□O□ e OH□; esse par ajuda a atacar minerais, remover cátions das estruturas e construir minerais novos no lugar. Intemperismo, alteração hidrotermal e formação de minério dependem desse comportamento. A hidroxila, OH, possui ainda outra propriedade decisiva: pode alojar-se em estruturas cristalinas, defeitos, vidros e fundidos. Foi assim que parte do hidrogênio atravessou a região quente do disco sem precisar viajar como gelo. Materiais semelhantes aos condritos de enstatita, formados no Sistema Solar interno, conservam hidrogênio suficiente para ter contribuído de modo importante para a água terrestre (Piani et al., 2020). A rocha aparentemente seca já carregava água em potência.

Ferro e oxigênio combinam-se com facilidade. O hidrogênio também disputa esse oxigênio. Sob certas condições de um oceano de magma, a reação pode ser representada por:

$$H\square + FeO \rightleftharpoons H\square O + Fe$$

O hidrogênio é oxidado a água, enquanto o ferro ferroso é reduzido a metal. Essa troca atravessa toda a história que vem pela frente. Oxidação e redução não são nomes para ganho ou perda de oxigênio apenas, mas para transferência de elétrons: quem perde elétrons é oxidado; quem os recebe é reduzido. A água, o minério, a atmosfera e a respiração das primeiras formas de vida obedecem a essa mesma contabilidade.

Segurar hidrogênio foi a parte mais difícil da história. Ele é o elemento mais leve que existe e, em forma de gás, escapa com facilidade de um corpo pequeno ou quente. O vento e a radiação da estrela jovem removeram grande parte do envelope que não foi incorporado. Os oceanos atuais correspondem a cerca de 0,023% da massa da Terra em água; o manto acrescenta um reservatório de tamanho incerto, e a fração correspondente apenas ao hidrogênio é ainda menor. A quantidade pre-

servada é pequena diante do que circulou pela nebulosa.

O que ficou, perdeu mobilidade por reação. Preso como hidroxila na estrutura de um mineral, dissolvido como água num silicato fundido ou incorporado ao metal que descia para o núcleo, o hidrogênio deixou de se comportar como um gás fugitivo. A química produziu reservatórios, então a gravidade ajudou a conservá-los. No modelo de interação entre a atmosfera primordial de H□ e o oceano de magma, a reação com FeO converte parte do gás em água e envia ferro reduzido para o núcleo (Young et al., 2023). Nesse sentido preciso, o ferro ajudou a salvar a água.

## 3. Os primeiros corpos

Os primeiros sólidos do Sistema Solar ainda existem e podem ser segurados na mão. São as inclusões refratárias de cálcio e alumínio, encontradas dentro de meteoritos primitivos, com idade de 4.567,3 milhões de anos. Elas marcam o zero da nossa contagem, e tudo o que este livro narra aconteceu depois delas (Connelly et al., 2012). Junto delas viajam os côndrulos, esférulas de silicato geralmente milimétricas, fundidas por pulsos rápidos de calor e resfriadas em horas ou dias, guardando na forma arredondada a memória de terem sido gotas. Meteoritos formados por essa mistura de côndrulos, inclusões refratárias, grãos metálicos e poeira fina recebem o nome de condritos. São rochas que nunca fundiram por inteiro e continuam sendo as melhores amostras disponíveis da matéria que construiu os planetas.

O passo seguinte foi juntar tudo isso. Grãos de poeira colidiam a baixa velocidade e ficavam aderidos por forças fracas entre as superfícies, como poeira numa tela. Esse mecanismo funciona para partículas pequenas e perde eficiência conforme o agregado cresce. A superação desse limite parece ter vindo da concentração de enormes quantidades de partículas em enxames densos. Instabilidades produzidas pela interação entre sólidos e gás reuniram o material até que a própria gravidade provocasse o colapso e formasse planetesimais rapidamente (Johansen et al., 2007). A partir desse tamanho, a gravidade assume o

comando e a acreção acelera. Primeiro as superfícies reúnem a matéria; depois a massa reunida passa a atrair o resto.

Planetesimais com dezenas a centenas de quilômetros já retinham calor, embora muitos continuassem irregulares, longe de esferas perfeitas. E havia calor de sobra. A nuvem original continha alumínio-26, um isótopo radioativo de vida curta, com meia-vida de aproximadamente 0,72 milhão de anos. Os corpos que se formaram cedo herdaram uma dose generosa desse combustível e puderam fundir por dentro. Ao fundir, obedeceram à densidade: o ferro-níquel metálico migrou para o centro e formou um núcleo; o silicato mais leve permaneceu por cima como manto e crosta. Alguns desses núcleos estavam prontos antes de a Terra existir. A diferenciação, que este livro acompanha na escala planetária, começou em corpos comparáveis, em diâmetro, às manchas urbanas de grandes cidades.

Depois vieram as colisões, e elas quebraram parte desses corpos. Por isso os meteoritos chegam até nós em tipos distintos que representam essas gerações, cada uma registrando um estágio. Os condritos preservam matéria que nunca fundiu por inteiro, com côndrulos e grãos de metal dispersos na matriz. Os meteoritos metálicos são fragmentos de núcleos de planetesimais diferenciados; o entrelaçamento geométrico de suas ligas de ferro e níquel exige resfriamento lento no interior de um corpo grande. Os pallasitos misturam cristais de olivina e metal e registram a reunião de materiais mantélicos e metálicos em corpos diferenciados (Greenwood et al., 2006). Os acondritos são rochas magmáticas sem côndrulos, derivadas de mantos e crostas que já haviam fundido e se separado.

Uma coleção de cortes polidos mostra essa história sem precisar de um diagrama. Num condrito, esferas de silicato permanecem na matriz ao lado de grãos metálicos, matéria que nunca chegou a ser planeta e que carrega, na mesma superfície, a química que produziria oceanos e a que produziria núcleos. Nos meteoritos metálicos, pallasitos e acondritos, a mesma matéria aparece já separada, fundida e reorganizada. Muito do que sabemos sobre as camadas internas da Terra vem da observação desses fragmentos-fósseis da criação planetária. A rocha pri-

mordial é a base deste livro inteiro.

## 4. Quem trouxe o quê

As rotas já estão descritas. Falta pesá-las. A pergunta muda de forma neste ponto e deixa de perguntar como a água atravessou a fronteira térmica, passando para quanto veio por cada caminho. A resposta depende de uma ferramenta que a natureza forneceu junto com a própria água.

O hidrogênio possui dois isótopos estáveis. O mais comum tem apenas um próton no núcleo. O outro, chamado deutério, carrega também um nêutron e possui aproximadamente o dobro da massa. A proporção entre os dois, escrita como razão D/H, varia entre os reservatórios do Sistema Solar. Em temperaturas muito baixas, reações de troca isotópica favorecem a concentração de deutério em moléculas que contêm hidrogênio. A água formada ou processada longe do Sol tende, por isso, a ser mais rica em deutério que aquela associada às regiões internas. A razão D/H preserva parte dessa história térmica. É um termômetro imperfeito do percurso da água, pois diferentes fenômenos podem modificar a marca original, mas mostra tendências interessantes.

O gás da nebulosa, herdado da nuvem molecular, possuía D/H muito baixo, aproximadamente sete vezes menor que o dos oceanos atuais. A água de muitos condritos carbonáceos, formados em regiões mais frias, ocupa uma faixa próxima à terrestre. Os cometas variam muito mais: alguns possuem valores semelhantes ao dos oceanos; outros, várias vezes maiores. A água que bebemos guarda uma assinatura intermediária, distante do extremo nebular e sobreposta a parte da faixa carbonácea (Alexander et al., 2012). A coincidência não identifica sozinha um fornecedor, mas restringe a lista de candidatos.

Esse arranjo é compatível com uma mistura. Um componente interno, incorporado à matéria que construiu o planeta e ampliado pela reação entre o envelope de hidrogênio e o oceano de magma, carregava

D/H baixo. Um componente externo, entregue sobretudo por material carbonáceo, trouxe água relativamente enriquecida em deutério e contribuiu para a assinatura final. A proporção entre ambos não pode ser calculada diretamente a partir dos oceanos atuais, porque o próprio planeta fracionou hidrogênio ao longo do tempo. O manto profundo preserva uma possível evidência do primeiro componente. Lavas da ilha de Baffin, no Canadá, e da Islândia, derivadas de fontes mantélicas pouco processadas, apresentam valores muito baixos de D/H, interpretados como vestígio de hidrogênio herdado da nebulosa protossolar (Hallis et al., 2015). A Terra guarda, em rochas jovens, um sinal recebido antes de terminar de crescer.

Falta explicar como o material externo chegou até aqui, e a resposta pertence à mecânica celeste. Durante o crescimento e a migração dos planetas gigantes, as perturbações gravitacionais de Júpiter e Saturno desestabilizaram populações inteiras de planetesimais formados além da linha de neve e lançaram parte delas para o interior do Sistema Solar. Alguns desses corpos atingiram os embriões rochosos e acrescentaram material rico em voláteis ao seu inventário (Morbidelli et al., 2000; Walsh et al., 2011; Raymond e Izidoro, 2017). A entrega foi irregular por natureza. Um pequeno número de impactos tardios envolvendo corpos grandes poderia alterar profundamente o estoque final de um planeta. Essa loteria talvez explique parte da diferença entre mundos vizinhos.

Uma segunda família de assinaturas permite testar essa procedência. Isótopos de elementos como o molibdênio dividem os meteoritos em dois grandes reservatórios: o não carbonáceo, associado ao Sistema Solar interno, e o carbonáceo, associado ao externo. As duas populações permaneceram amplamente separadas durante os primeiros milhões de anos, possivelmente porque o crescimento precoce de Júpiter criou uma barreira dinâmica entre elas. O molibdênio possui ainda uma vantagem: durante a diferenciação planetária, tende a acompanhar o ferro em direção ao núcleo. Grande parte do molibdênio preservado no manto registra, portanto, fases relativamente tardias da acreção. Seus isótopos não medem água. Medem procedência e permitem perguntar

quando material do reservatório externo entrou na Terra.

Aplicada à colisão que formou o sistema Terra-Lua, essa assinatura abre uma quarta possibilidade. A composição isotópica do molibdênio do manto terrestre exige alguma contribuição de material do Sistema Solar externo durante os estágios finais da acreção. No modelo proposto por Budde et al. (2019), Theia – o corpo que colidiu com a proto-Terra e será apresentado no próximo capítulo – poderia ter transportado parte importante desse material. Nesse cenário, o golpe que produziu a Lua também teria acrescentado água ao inventário terrestre. A hipótese é elegante, mas depende de associar a procedência carbonácea indicada pelo molibdênio a uma carga correspondente de voláteis. Continua em teste. O argumento deste livro permanece de pé com ela ou sem ela. Pois hidrogênio na matéria de construção e captura nebular já haviam colocado água no interior do planeta antes do impacto, enquanto os materiais carbonáceos ampliaram a conta ao longo da história.

## 5. A massa que trabalha duas vezes

A massa terrestre operou em dois momentos. Durante o crescimento, permitiu capturar gás nebular. Depois, forneceu gravidade para reduzir a perda de voláteis ao espaço. Entre esses momentos, colisões retiraram material, acrescentaram outros reservatórios e refizeram a atmosfera. A água resultou de um balanço, e a massa controlou boa parte da contabilidade.

Marte mostra o custo de crescer pouco. Sua superfície conserva vales, minerais hidratados e formas produzidas por água antiga, mas a atmosfera atual guarda o sinal da perda. Medidas da razão $^{3}\square\mathrm{Ar}/^{3}\square\mathrm{Ar}$ pela missão MAVEN[1] registram escape prolongado para o espaço (Jakosky et al., 2017). A gravidade menor facilitou a erosão atmosférica por impactos e por processos associados ao vento solar. Em um cenário, colisões arrancaram massa e voláteis durante a acreção (Melosh

[1] Missão da NASA que investiga a atmosfera marciana e sua perda para o espaço.

e Vickery, 1989). Em outro, a migração de Júpiter esvaziou a região de alimentação e deixou Marte como embrião incompleto (Walsh et al., 2011). Os mecanismos diferem; ambos conduzem a um planeta pequeno, vulnerável e progressivamente seco.

Vênus mostra outro limite. Sua massa se aproxima da terrestre e segura uma atmosfera espessa. A proximidade do Sol alterou o destino da água. Modelos de solidificação de oceanos de magma distinguem mundos onde o vapor condensa e chove de mundos mantidos sob uma estufa de vapor. No segundo caso, a radiação quebra moléculas de água e o hidrogênio escapa antes que um oceano duradouro se estabeleça (Hamano et al., 2013). Cenários de habitabilidade venusiana antiga continuam sendo testados (Way e Del Genio, 2020), no entanto nenhum deles transforma Vênus numa segunda Terra.

A comparação evita uma explicação simples demais. Órbita adequada, isoladamente, teria produzido um Marte mais generoso. Massa terrestre, por si, teria produzido outro Vênus. A Terra reuniu a faixa térmica, a gravidade, o inventário e uma história particular de impactos. Essa combinação permitiu ao planeta conservar água na superfície e no manto, formando dois reservatórios ligados pelo tempo geológico.

## 6. A água muda de ofício

Chegar e permanecer constituem apenas o começo. A importância da água aparece no trabalho que realiza dentro da rocha. Dissolvida em magmas, reduz temperaturas de fusão e modifica a cristalização. Incorporada a minerais, altera resistência, densidade e caminhos de reação. Em circulação, transporta calor e elementos. Na superfície, constrói oceanos, intemperismo, sedimento e habitat.

Do ponto de vista da petrologia, a ciência que estuda a origem, a composição, a estrutura e a formação das rochas, pequenas quantidades de água já produzem efeitos grandes. Água dissolvida abaixa a temperatura da faixa de fusão, ou solidus, de rochas mantélicas e crustais, prolonga a evolução de câmaras magmáticas e altera os minerais que

delas cristalizam (Médard e Grove, 2008; Grove et al., 2012). Komatiitos arqueanos, rochas vulcânicas magnesianas muito características daquela época, preservam indícios de um reservatório profundo hidratado (Sobolev et al., 2016). Antes de existir uma tectônica de placas madura, portanto, a água já participava da transferência de massa entre o interior quente e a primeira litosfera.

Para a geodinâmica, as forças e os processos internos e externos que moldam e modificam a estrutura da Terra, ela enfraquece e transforma. A hidratação de rochas mantélicas magnesianas rasas produz serpentina, um mineral hidratado de magnésio, o que modifica atrito e favorece deformação ao longo de interfaces. Fragmentos hidratados que mergulham no manto carregam assim água para profundidade, enquanto reações liberam fluidos aos poucos, alimentam magmatismo, que por sua vez devolve parte da água à superfície. Outra parte alcança reservatórios profundos. Ringwoodita hidratada, uma olivina de alta pressão, preservada como inclusões em diamantes, demonstra que a zona de transição do manto pode armazená-la (Pearson et al., 2014). O ciclo profundo possui escalas muito maiores que o ciclo de chuvas, mas ambos pertencem ao mesmo planeta (Hirschmann, 2006).

Na fabricação dos continentes, a água entra como reagente. Grande parte dos primeiros trondhjemitos, tonalitos e granodioritos arqueanos, ou TTGs, rochas ígneas ricas em feldspatos, deriva da fusão de crosta oceânica, pobre em feldspatos, previamente hidratada (Moyen e Martin, 2012). Ou seja, basalto transformado, fundido e destilado gera rochas mais ricas em sílica e mais leves. Elas flutuam, sobrevivem à reciclagem de crosta oceânica ao longo do tempo e permitem que núcleos continentais cresçam. A plataforma que receberá os mares de Carajás depende dessa longa sequência: água, fusão, diferenciação, continente, emersão e bacia.

A palavra lubrificante costuma resumir esse papel. Ela ajuda, mas empobrece a história se parecer um efeito único. A água muda a termodinâmica, a capacidade de deformação no estado sólido, a mineralogia e o transporte de elementos químicos. Em certos lugares enfraquece, enquanto em outros cria minerais resistentes ou retira calor. Seu poder

vem da capacidade de participar de processos distintos e de circular entre eles.

## 7. A água chega ao núcleo

O centro da Terra tem duas partes. O núcleo interno é sólido, uma esfera de liga de ferro e níquel com cerca de mil e duzentos quilômetros de raio, que cresce lentamente por cristalização. Ao redor dele, o núcleo externo permanece líquido ao longo de mais de dois mil quilômetros de espessura. É nesse metal em movimento que nasce o campo magnético terrestre, gerado por um dínamo: correntes elétricas produzidas pela convecção de um fluido condutor em rotação.

A liquidez dessa camada vem da temperatura, que ali supera o ponto de fusão da liga naquelas pressões. A composição, no entanto, participa da conta. O núcleo é aproximadamente dez por cento menos denso que uma liga pura de ferro e níquel nas mesmas condições, e esse déficit exige elementos leves dissolvidos no metal. Enxofre, silício, oxigênio, carbono e hidrogênio disputam a vaga, e a proporção entre eles segue em investigação. Todos abaixam o ponto de fusão da liga, o que amplia a faixa em que o metal permanece líquido.

O hidrogênio ganhou força recentemente entre os candidatos. Experimentos em alta pressão mostraram que ele se comporta como siderófilo nas condições de um oceano de magma, ou seja, prefere o metal ao silicato e desce junto com o ferro durante a diferenciação (Tagawa et al., 2021). A reação entre o envelope nebular e o FeO, discutida na seção 2, produz exatamente esse resultado: água para o manto e ferro reduzido para o centro, com parte do hidrogênio acompanhando o metal. Convém dizer com precisão o que existe lá embaixo. A molécula de água se dissocia naquelas condições. O que permanece é hidrogênio dissolvido na liga metálica.

O achado mais recente diz que essa entrega continua acontecendo. Placas subductadas carregam minerais hidratados para o manto profundo, e imagens de tomografia sísmica mostram fragmentos de litosfera al-

cançando a fronteira com o núcleo, a quase três mil quilômetros de profundidade. Ali a água encontra o ferro líquido e reage. O hidrogênio é absorvido pelo metal, o oxigênio se combina com o silício e forma sílica cristalina, e o resultado previsto pelos experimentos é uma camada de algumas centenas de quilômetros no topo do núcleo externo, enriquecida em hidrogênio e menos densa que o restante. Os sismólogos já registravam ali uma anomalia de velocidade sem explicação, chamada camada E′. O modelo fornece uma causa para o que a sísmica observava (Kim et al., 2023).

Esse detalhe importa para o motor. A convecção que sustenta o dínamo é alimentada por três fontes: o calor residual da formação do planeta, o calor latente liberado quando o núcleo interno cristaliza, e a flutuabilidade composicional. Essa terceira fonte funciona assim: ao cristalizar, o ferro sólido expulsa os elementos leves, que sobem pelo núcleo externo e agitam o fluido. Se o hidrogênio integra esse grupo, ele participa ativamente da agitação que produz o campo magnético.

O campo, por sua vez, protege a superfície. Ele desvia grande parte do vento solar e reduz a taxa com que a atmosfera é arrancada para o espaço. Marte perdeu seu dínamo cedo, e a comparação entre os dois planetas mostra o custo dessa perda. A retenção de água ao longo de bilhões de anos depende, entre outros fatores, de existir esse escudo.

Fecha-se então um circuito que atravessa o planeta inteiro. A água ajudou a formar o núcleo, continua sendo entregue a ele pela tectônica, participa da convecção que gera o campo magnético, e esse campo ajuda a preservar a água que resta na superfície. A mesma reação com o ferro que fabricou o oceano no oceano de magma continua operando, quatro bilhões e meio de anos depois, na base do manto. O ferro salvou a água uma vez e segue ajudando a guardá-la.

Convém marcar o grau de confiança de cada elo dessa cadeia. O déficit de densidade do núcleo é medido. O comportamento siderófilo do hidrogênio em alta pressão é experimental. A camada E′ é observada pela sísmica. A interpretação dessa camada como produto da água subductada é um modelo recente e promissor, ainda em avaliação. A

quantidade de hidrogênio no núcleo permanece incerta, com estimativas que variam bastante. E a proposição de que a água modula o dínamo e, por essa via, ajuda a proteger a si mesma na superfície é uma hipótese de trabalho, oferecida aqui pelo que ela organiza. O circuito é plausível em cada etapa e ainda não foi quantificado como um todo.

## 8. As águas de Carajás

Quando esta narrativa alcançar Carajás, a água aparecerá em quase todas as escalas. A coluna marinha controlará luz, ferro, enxofre e nutrientes. A água que penetrar na pilha vulcânica reagirá com a rocha, ganhará salinidade, carregará calor e metal e retornará pelas zonas permeáveis. Falhas, contatos e horizontes reativos transformarão a bacia num sistema hidrogeológico mineralizante.

No Neoarqueano, água marinha desceu pelo pacote vulcânico e sedimentar. A circulação profunda concentrou sais e produziu modificações nas rochas encaixantes. Escapolita, um silicato de estrutura parecida com a do feldspato que guarda cloro em sua rede cristalina, veios, zonas de reação e sulfetos conservam partes desse trabalho. O registro mineral pode atravessar bilhões de anos; o fluido que o produziu pertence ao seu evento. Essa distinção será decisiva adiante.

Pulsos posteriores encontraram uma crosta preparada. Reutilizaram falhas, volumes alterados, rochas férteis e contrastes de permeabilidade. Em 1,88 Ga, outros aquíferos abasteceram a circulação. Águas das coberturas Águas Claras e Caninana–Paredão–Gorotire penetraram o embasamento fraturado, percorreram trajetos profundos e se tornaram salinas. A arquitetura era herdada; a água, renovada. Carajás guarda a memória de vários sistemas superpostos.

A mesma disciplina vale para o ciclo profundo. Falar em água que retorna pelo arco ou por uma pluma descreve um reservatório em circulação, com moléculas, minerais e tempos de residência variados. A continuidade pertence ao processo. A matéria é trocada, misturada e requalificada a cada passagem. A geologia preserva relações, porém

raramente preserva personagens intactos.

Na superfície, a água organizará o laboratório da vida. Profundidade, transparência, mistura e estratificação definirão a zona fótica e a quimioclina. Oscilações no aporte de $Fe^{2}$□ abrirão ou fecharão oportunidades para diferentes metabolismos. Mais tarde, mares epicontinentais cobrirão costuras, riftes formarão lagos e plataformas e o clima redistribuirá gelo, rios e costas. A água deixa de ser apenas substância. Torna-se espaço onde processos se encontram.

O circuito permanece visível hoje na margem andina. A placa oceânica carrega minerais hidratados para a fossa; reações em profundidade liberam fluidos; a cunha do manto funde e alimenta o arco magmático, que forma a cadeia de montanhas (Grove et al., 2012). A Cordilheira cresce a oeste enquanto a plataforma brasileira conserva cicatrizes de ciclos antigos. O veículo tectônico mudou muitas vezes, enquanto o ofício da água continua reconhecível!

## 9. Níveis de confiança

São evidência ou consenso forte a distribuição de voláteis no disco protoplanetário; a existência e a migração da linha de neve; o hidrogênio medido em material semelhante aos condritos de enstatita; a contribuição carbonácea ao inventário terrestre; a perda atmosférica de Marte; o efeito da água sobre fusão, mineralogia e deformação; o armazenamento de água no manto; a participação de crosta máfica hidratada na geração de TTG; o déficit de densidade do núcleo em relação a uma liga pura de ferro e níquel; o comportamento siderófilo do hidrogênio em alta pressão, verificado experimentalmente; a chegada de litosfera subductada à fronteira entre manto e núcleo, imageada por tomografia sísmica; a existência de uma anomalia sísmica no topo do núcleo externo, conhecida como camada E′; e o papel do campo magnético na redução da perda atmosférica.

São modelos publicados a captura de uma atmosfera primordial de H□ e sua reação com FeO no oceano de magma; a entrega de planetesi-

mais carbonáceos associada ao crescimento e à migração dos planetas gigantes; a erosão de atmosfera por impactos; a formação de um Marte pequeno pela redução de sua zona de alimentação; a bifurcação entre oceanos de magma que condensam água e mundos mantidos sob estufa de vapor; o hidrogênio como um dos elementos leves responsáveis pelo déficit de densidade do núcleo; e a origem da camada E′ pela reação entre água subductada e ferro líquido na base do manto (Kim et al., 2023; Tagawa et al., 2021). Esses mecanismos possuem apoio quantitativo e incertezas próprias, e a quantidade de hidrogênio armazenada no núcleo permanece mal determinada.

São leituras integradoras deste livro a massa terrestre como variável que primeiro amplia a captura e depois favorece a retenção; a água como fio entre diferenciação, fusão, tectônica, continente, plataforma, reator e vida; a repetição de sua função em sistemas formados por aquíferos e fluidos diferentes; e o circuito que liga a água ao campo magnético, no qual o hidrogênio entregue ao núcleo participa da convecção que sustenta o dínamo e o campo resultante ajuda a preservar a água que permanece na superfície. Esse último circuito é plausível em cada etapa e ainda não foi quantificado como um todo. A participação de Theia na entrega de água resta como hipótese a ser confirmada.

## Conclusão

A água é a mãe da Terra porque participa das transformações que fazem deste corpo um planeta geologicamente vivo. A frase fala de processo, mas a água não teve intenção, não planejou continentes, placas, minérios ou leitores. Ela apenas alterou as probabilidades em cada etapa, repetidas vezes, durante tempo suficiente.

Sua própria genealogia alcança o hidrogênio, o elemento mais antigo do universo. Nascido nos primeiros minutos do cosmos, ele entrou na nebulosa solar, ligou-se à rocha, foi capturado como gás, reagiu no oceano de magma e terminou em minerais, vapor e oceano. A licença poética sobe, assim, mais uma geração: a Terra é neta do primeiro minuto.

No fim deste capítulo, o planeta está molhado, diferenciado e coberto por uma casca primordial. O interior conserva energia; a superfície começa a guardar um arquivo. Parece um equilíbrio. Então chega Theia.

## Referências

Alexander, C. M. O'D.; Bowden, R.; Fogel, M. L.; Howard, K. T.; Herd, C. D. K.; Nittler, L. R. (2012). The provenances of asteroids, and their contributions to the volatile inventories of the terrestrial planets. Science, 337, 721–723. https://doi.org/10.1126/science.1223474

Budde, G.; Burkhardt, C.; Kleine, T. (2019). Molybdenum isotopic evidence for the late accretion of outer Solar System material to Earth. Nature Astronomy, 3, 736–741. https://doi.org/10.1038/s41550-019-0779-y

Connelly, J. N.; Bizzarro, M.; Krot, A. N.; Nordlund, Å.; Wielandt, D. K. P.; Ivanova, M. A. (2012). The absolute chronology and thermal processing of solids in the solar protoplanetary disk. Science, 338, 651–655. https://doi.org/10.1126/science.1226919

Drake, M. J. (2005). Origin of water in the terrestrial planets. Meteoritics & Planetary Science, 40, 519–527. https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2005.tb00960.x

Greenwood, R. C.; Franchi, I. A.; Jambon, A.; Barrat, J. A.; Burbine, T. H. (2006). Oxygen isotope variation in stony-iron meteorites. Science, 313, 1763–1765. https://doi.org/10.1126/science.1128865

Grove, T. L.; Till, C. B.; Krawczynski, M. J. (2012). The role of H□O in subduction zone magmatism. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 40, 413–439. https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105310

Hallis, L. J.; Huss, G. R.; Nagashima, K.; Taylor, G. J.; Halldórsson, S. A.; Hilton, D. R.; Mottl, M. J.; Meech, K. J. (2015). Evidence for primordial water in Earth's deep mantle. Science, 350, 795–797. https://doi.org/10.1126/science.aac4834

Hamano, K.; Abe, Y.; Genda, H. (2013). Emergence of two types of terrestrial planet on solidification of magma ocean. Nature, 497, 607–610. https://doi.org/10.1038/nature12163

Hirschmann, M. M. (2006). Water, melting, and the deep Earth H□O cycle. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 34, 629–653. https://doi.org/10.1146/annurev.earth.34.031405.125211

Jakosky, B. M.; Slipski, M.; Benna, M.; Mahaffy, P.; Elrod, M.; Yelle, R.; Stone, S.; Alsaeed, N. (2017). Mars' atmospheric history derived from upper-atmosphere measurements of $^{3}$□Ar/$^{3}$□Ar. Science, 355, 1408–1410. https://doi.org/10.1126/science.aai7721

Jiang, Z.; Liu, Q.; Zhao, X.; Roberts, A. P.; Heslop, D.; Barrón, V.; Torrent, J. (2016). Magnetism of Al-substituted magnetite reduced from Al-hematite. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121, 4195–4210. https://doi.org/10.1002/2016JB012863

Johansen, A.; Oishi, J. S.; Mac Low, M.-M.; Klahr, H.; Henning, T.; Youdin, A. (2007). Rapid planetesimal formation in turbulent circumstellar disks. Nature, 448, 1022–1025. https://doi.org/10.1038/nature06086

Kim, T.; O'Rourke, J. G.; Lee, J.; Chariton, S.; Prakapenka, V.; Husband, R. J.; Giordano, N.; Liermann, H.-P.; Shim, S.-H.; Lee, Y. (2023). A hydrogen-enriched layer in the topmost outer core sourced from deeply subducted water. Nature Geoscience, 16, 1208–1214. https://doi.org/10.1038/s41561-023-01324-x

Lodders, K. (2003). Solar System abundances and condensation temperatures of the elements. The Astrophysical Journal, 591, 1220–1247. https://doi.org/10.1086/375492

Médard, E.; Grove, T. L. (2008). The effect of H□O on the olivine liquidus of basaltic melts: experiments and thermodynamic models. Contributions to Mineralogy and Petrology, 155, 417–432. https://doi.org/10.1007/s00410-007-0250-4

Melosh, H. J.; Vickery, A. M. (1989). Impact erosion of the primordial atmosphere of Mars. Nature, 338, 487–489. https://doi.org/10.1038/338487a0

Morbidelli, A.; Chambers, J.; Lunine, J. I.; Petit, J. M.; Robert, F.; Valsecchi, G. B.; Cyr, K. E. (2000). Source regions and timescales for the delivery of water to the Earth. Meteoritics & Planetary Science, 35, 1309–1320. https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2000.tb01518.x

Moyen, J.-F.; Martin, H. (2012). Forty years of TTG research. Lithos, 148, 312–336. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.06.010

Pearson, D. G.; Brenker, F. E.; Nestola, F.; McNeill, J.; Nasdala, L.; Hutchison, M. T.; Matveev, S.; Mather, K.; Silversmit, G.; Schmitz, S.; Vekemans, B.; Vincze, L. (2014). Hydrous mantle transition zone indicated by ringwoodite included within diamond. Nature, 507, 221–224. https://doi.org/10.1038/nature13080

Piani, L.; Marrocchi, Y.; Rigaudier, T.; Vacher, L. G.; Thomassin, D.; Marty, B. (2020). Earth's water may have been inherited from material similar to enstatite chondrite meteorites. Science, 369, 1110–1113. https://doi.org/10.1126/science.aba1948

Raymond, S. N.; Izidoro, A. (2017). Origin of water in the inner Solar System: planetesimals scattered inward during Jupiter and Saturn's rapid gas accretion. Icarus, 297, 134–148. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.06.030

Sobolev, A. V.; Asafov, E. V.; Gurenko, A. A.; Arndt, N. T.; Batanova, V. G.; Portnyagin, M. V.; Garbe-Schönberg, D.; Krasheninnikov, S. P. (2016). Komatiites reveal a hydrous Archaean deep-mantle reservoir. Nature, 531, 628–632. https://doi.org/10.1038/nature17152

Tagawa, S.; Sakamoto, N.; Hirose, K.; Yokoo, S.; Hernlund, J.; Ohishi, Y.; Yurimoto, H. (2021). Experimental evidence for hydrogen incorporation into Earth's core. Nature Communications, 12, 2588. https://doi.org/10.1038/s41467-021-22035-0

Walsh, K. J.; Morbidelli, A.; Raymond, S. N.; O'Brien, D. P.; Mandell, A. M. (2011). A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration. Nature, 475, 206–209. https://doi.org/10.1038/nature10201

Way, M. J.; Del Genio, A. D. (2020). Venusian habitable climate scena-

rios: modeling Venus through time and applications to slowly rotating Venus-like exoplanets. Journal of Geophysical Research: Planets, 125, e2019JE006276. https://doi.org/10.1029/2019JE006276

Young, E. D.; Shahar, A.; Schlichting, H. E. (2023). Earth shaped by primordial H□ atmospheres. Nature, 616, 306–311. https://doi.org/10.1038/s41586-023-05823-0