Capítulo 15. A Terra como jazida

Um modelo de favorabilidade aplicado a sistemas planetários

> **Modelo de trabalho**
>
> A Terra é uma jazida de água líquida em um planeta rochoso, e as condições descritas nos capítulos anteriores podem ser convertidas em camadas de um modelo de favorabilidade. Este capítulo traduz o sistema planetário em critérios de mira, atribui pesos por importância, aplicabilidade e confiança, propaga a incerteza por dois milhões de simulações e devolve a grandeza que interessa a quem explora: a distância até o alvo mais próximo. O método vem da exploração mineral, e a fonte da ideia fica declarada.

sistema mineral · favorabilidade · index overlay · vicariância · leis de escala · Monte Carlo · vizinho mais próximo · escada das crostas · exoluas · falseabilidade

Agosto de 2026

Resumo

Por mais de dez anos construí mapas de favorabilidade mineral. O método consiste em descrever o sistema que produz o depósito, traduzir cada componente desse sistema em uma camada de evidência mapeável, atribuir peso a cada camada conforme sua importância, sua aplicabilidade e a confiança que merece, somar o conjunto e obter uma superfície que indica onde vale a pena furar. Este capítulo aplica o método ao maior alvo disponível. Antes disso, fecha duas contas que o livro deixou em aberto: o mecanismo publicado que relaciona tectônica de placas e diversificação biológica, e a razão pela qual um método construído para províncias minerais pode ser levado à escala da galáxia. A Terra é tratada como uma jazida de água líquida hospedada em um planeta rochoso, e as condições descritas nos capítulos anteriores tornam-se as camadas do modelo. O produto que interessa aqui é a distância até o sistema equivalente mais próximo.

O resultado central: doze camadas, uma cadeia causal, dois milhões de simulações. Sob os intervalos e as independências adotadas, o funil que este livro postula, um impacto gigante com a geometria certa no momento certo, deixa passar, na mediana, cerca de um sistema em quarenta e seis. O mesmo cenário retorna algo próximo de trinta milhões de sistemas férteis na Via Láctea e uma distância média condicional de setenta e quatro anos-luz até o mais próximo. Quando também se amostra o acaso da posição desses sistemas, a mediana preditiva fica perto de setenta e um anos-luz, com noventa por cento dos resultados entre vinte e cinco e cento e sessenta e sete. Acrescentando o tempo, uma biosfera complexa contemporânea recua para perto de cento e oitenta anos-luz. Para uma civilização tecnológica contemporânea, o cenário mediano retorna apenas quatro ocorrências galácticas, mas a geometria local já não autoriza converter esse número numa distância física confiável.

A análise de sensibilidade e a tabela de pesos apontam para as mesmas regiões frágeis do argumento: a frequência de planetas rochosos de massa terrestre na zona habitável, a geometria do impacto da proto-

Lua e a manutenção da tectônica. Essa concordância é uma verificação de consistência interna, não uma validação independente: as mesmas incertezas que receberam confiança baixa também receberam intervalos largos e, por isso, dominam a variância. Duas dessas três camadas são postulados deste livro. O capítulo termina onde todo mapa de prospectividade deve terminar, listando o que faria o modelo desabar.

1. O argumento em uma página

Vale recolher a cadeia inteira antes de submetê-la à aritmética.

A água chegou disfarçada. Numa região do disco onde o gelo não sobrevive, ela atravessou a fronteira térmica escondida como hidroxila na estrutura dos minerais, foi fabricada dentro do oceano de magma quando o hidrogênio capturado da nebulosa encontrou o ferro dos silicatos, e recebeu uma terceira remessa trazida por corpos carbonáceos espalhados pelo crescimento dos planetas gigantes. A mesma reação que fez o oceano fez o núcleo. Água e ferro metálico saíram juntos da mesma equação.

A massa trabalhou duas vezes. Primeiro permitiu a captura do gás e a fabricação da água. Depois forneceu a gravidade que segurou o inventário contra a erosão atmosférica. Marte mostra o custo de crescer pouco. Vênus mostra que a massa sozinha resolve pouco quando a órbita é próxima demais.

Então veio o golpe. Na reconstrução proposta por este livro, um corpo do tamanho de Marte atingiu a Terra e levou embora cerca de três quartos da carapaça leve que já havia sido destilada do manto. Parte do material ejetado alimentou a Lua e o disco; o que permaneceu na Terra definiu o orçamento continental disponível para o restante da história. O manto empobrecido em elementos incompatíveis teria sido obrigado a refazer a extração, e a litosfera formada sobre ele teria nascido mais densa e mais vulnerável ao afundamento.

Se esse mecanismo foi decisivo, uma tampa suficientemente densa não permaneceu tampa. Ela afundou em gotas, arrastou consigo material

superficial, incluindo água, e devolveu ao manto material hidratado, capaz de reduzir a viscosidade e a temperatura de fusão. A sagdução global teria recarregado o interior. A partir de certo ponto, o afundamento deixaria de ser gota e passaria a ser lâmina, com dobradiça, trincheira e arco. Essa é uma hipótese para a transição à tectônica de placas, não a única proposta na literatura; sua assinatura precisa competir com modelos de iniciação por dano, herança estrutural e convecção sem remoção prévia da carapaça.

O ciclo também alcança a parte de baixo. O hidrogênio dissolvido no ferro desceu com ele, o núcleo ficou menos denso do que uma liga pura de ferro e níquel exigiria, e os elementos leves alteraram seu ponto de fusão. A convecção da camada externa líquida alimenta o dínamo. O campo magnético modula a interação da alta atmosfera com o vento estelar, mas não funciona como escudo simples: a fuga atmosférica depende da gravidade, da composição, da radiação e das rotas magnetizadas e não magnetizadas de escape (Foley e Driscoll, 2016; Gunell et al., 2018). A ligação entre tectônica, resfriamento do núcleo, dínamo e retenção de água é plausível e contextual, não uma cadeia já demonstrada em todos os elos.

Carajás é o registro local disso tudo. Uma bacia que abriu sobre uma sutura, um mar que precipitou ferro na fronteira entre um oceano reduzido e uma zona fótica que começava a produzir oxigênio, uma planta hidrogeológica confinada que operou por centenas de milhões de anos, uma quilha litosférica que guardou diamante enquanto os corredores ao lado eram delaminados. A província é a Terra em escala de província.

2. Por que a tectônica fabrica diversidade

A afirmação que sustenta o restante do capítulo precisa ficar explícita, com mecanismo e com teste, porque sem as duas coisas todo o resto vira numerologia: a tectônica de placas sustentada renova gradientes, barreiras e ambientes e pode ampliar o espaço de oportunidades para a diversificação biológica. O registro fóssil sustenta parte dessa relação;

a passagem da diversidade à vida complexa e à inteligência permanece hipótese de trabalho. Aqui, o manifesto formula uma aposta sobre possibilidade histórica, não uma prova de inevitabilidade.

O elo tem autoria antiga. Valentine e Moores (1970) propuseram que a fragmentação dos continentes multiplica províncias biogeográficas, margens, gradientes e barreiras, e que a diversidade da fauna acompanha a dispersão das massas continentais. A proposta ficou quase cinquenta anos como modelo elegante à espera de veredito. Zaffos, Finnegan e Peters (2017) a confrontaram com o registro fóssil marinho do Fanerozoico inteiro e encontraram a correlação prevista ao longo de quinhentos milhões de anos. A correlação não encerra a causalidade, mas coloca o mecanismo sob observação quantitativa.

Cinco mecanismos ligam uma coisa à outra, e vale destrinchá-los. O primeiro é o termostato. A alteração de silicatos consome dióxido de carbono, os carbonatos guardam o carbono no sedimento, a subducção devolve parte dele pela atividade vulcânica, e a taxa de alteração cresce com a temperatura. Na Terra, essa realimentação negativa contribui para manter a superfície na faixa da água líquida por bilhões de anos, apesar do aumento do brilho solar (Walker, Hays e Kasting, 1981). Um planeta de tampa estagnada não tem o termostato simplesmente desligado: vulcanismo, alteração, soterramento e descarbonação crustal podem sustentar ciclos menos eficientes e habitabilidade prolongada. Modelos para uma Vênus primitiva chegam a quase um bilhão de anos de água líquida sem tectônica de placas (Höning et al., 2021).

O segundo é o abastecimento. Soerguimento e erosão expõem rocha fresca; rocha fresca libera fósforo, ferro, molibdênio e outros elementos que a bioquímica exige e que o oceano perde por sedimentação. Vulcanismo, impactos e circulação crustal também abastecem o sistema, mas a reciclagem tectônica oferece uma via persistente de renovação e redistribuição em escala planetária.

O terceiro é o desequilíbrio. A vida se alimenta de gradientes. A tectônica fabrica gradientes o tempo todo, químicos nas fontes hidrotermais, térmicos nas dorsais, redox nas margens onde água oxidada encontra

rocha reduzida. O reator do capítulo 5 é um exemplo local de um mecanismo que o planeta mantém aceso em toda parte, e a bioquímica que aproveita esses gradientes é anterior a qualquer coisa que se pareça com um organismo complexo.

O quarto é a vicariância, que é tectônica lida pela biologia. Continentes que se juntam e se separam criam e destroem barreiras geográficas, isolam populações, permitem que linhagens divirjam e voltem a se encontrar. O exemplo mais didático é pequeno e recente: os lagos dos riftes do leste africano, com centenas de espécies de ciclídeos geradas em poucos milhões de anos, são câmaras de especiação construídas por falhas normais (Seehausen, 2006). Um sistema de falhas, mais uma vez em um rift, fabricou biodiversidade em escala de tempo geológica curta. A árvore da vida tem a forma que tem, em boa parte, porque o mapa mudou o tempo todo.

O quinto é o resfriamento do núcleo. A subducção pode carregar material frio à base do manto e alterar o fluxo de calor que alimenta a convecção do núcleo externo. A tectônica, portanto, pode favorecer certas histórias de dínamo, mas a ligação causal permanece incompleta e depende da evolução térmica do planeta (Foley e Driscoll, 2016). Mesmo com dínamo, a retenção atmosférica não é automática; sem ele, também não é necessariamente impossível.

Vênus funciona como experimento de controle, mas ainda não entrega um veredito. Há indícios de atividade recente associada a coroas e plumas, e as tésseras podem conter crosta evoluída (Smrekar et al., 2010; Gülcher et al., 2020). O regime tectônico antigo e atual, porém, continua em disputa entre tampa estagnada, tampa episódica e deformação localizada. Vênus mostra que um planeta de massa terrestre pode seguir uma trajetória muito diferente da terrestre; ainda não prova quantos degraus subiu nem qual mecanismo o fez parar.

3. A repetição fractal e as leis de escala

Há uma coisa que todo geólogo aprende cedo e raramente examina. Os objetos com que trabalhamos se repetem através das escalas. A dobra milimétrica na lâmina repete a dobra quilométrica no mapa. O bandamento de um jaspilito, lido de perto, tem a mesma estrutura de leitura que o barcode de idades de um cráton inteiro, lido em bilhões de anos. A amostra de mão promete a província. É por isso que a fotografia de campo precisa de uma moeda ou de um martelo dentro do enquadramento: sem a referência, o afloramento não diz a que escala pertence.

Mandelbrot (1967) formalizou por que certas formas naturais se comportam assim. Uma costa medida com régua grande e com régua pequena entrega comprimentos diferentes, e a taxa em que o comprimento cresce quando a régua encolhe pode ser uma propriedade mensurável da forma. Quando essa relação de escala persiste por um intervalo, fala-se em geometria fractal. A ausência de escala característica vale dentro do domínio observado; não é uma licença para extrapolar indefinidamente.

Em geologia isso deixou de ser apenas metáfora, porque virou medida. Populações de falhas e fraturas exibem leis de potência ao longo de intervalos finitos de comprimento, de milímetros a centenas de quilômetros (Bonnet et al., 2001). A energia liberada em terremotos segue a relação de Gutenberg e Richter (1944). Distribuições de tamanho de depósitos minerais têm caudas pesadas, com poucos gigantes respondendo por grande parte do metal contido (Turcotte, 1997). São fenômenos diferentes descritos por famílias estatísticas semelhantes; isso não demonstra que compartilhem o mesmo mecanismo.

A consequência metodológica é mais modesta e mais sólida. Uma lei de potência não prova parentesco de processo nem autoriza, sozinha, a transferência de um modelo entre escalas. Ela apenas torna legítima a pergunta. A transferência só se sustenta quando a homologia estrutural é explicitada no destino (fonte, energia, caminho, gradiente e preservação) e cada termo pode ser confrontado com evidência própria. É essa correspondência, e não a palavra fractal, que permite testar um

método de província na escala da galáxia.

A licença tem letra miúda, e convém lê-la. Semelhança de forma através das escalas não prova identidade de processo. Leis de potência emergem de mecanismos variados, alguns sem relação entre si, e a estatística sozinha não identifica o mecanismo. O que pode viajar entre as escalas é uma gramática explicitada termo a termo. O restante do capítulo é o teste dessa tradução.

E há uma extensão que este livro propõe como hipótese poética. A repetição não parece parar na biosfera. As famílias repetem as famílias, as culturas repetem as culturas, as línguas divergem, derivam e colidem como placas, e existe até uma gramática herdada, um conjunto de direções antigas pelas quais as novidades escorrem, que o leitor dos capítulos 8 e 10 reconhecerá sem esforço. A auto-similaridade que organiza as rochas reaparece, escala acima, no material humano. Isso é testável por métodos filogenéticos comparados aplicados a línguas e a linhagens culturais, e está registrado na tabela de níveis de confiança pelo que é, uma proposição em aberto.

4. O mesmo desenho em todas as escalas

Existe uma repetição que atravessa este livro e que só agora fica explícita como método. Um depósito mineral nasce quando cinco coisas coincidem: uma fonte de metais e de fluidos, uma fonte de energia que ponha esses fluidos em movimento, uma arquitetura que os conduza, um gradiente que os obrigue a largar a carga, e uma história posterior suficientemente gentil para preservar o que foi construído. Falhando qualquer uma delas, não há depósito. Estando todas presentes, o depósito é muito provável. Jazidas minerais são raras não por serem excepcionais, mas porque as condições que permitem a precipitação podem ser difíceis de atender ao mesmo tempo. Isso é importante, pois são governadas pela interseção de processos naturais e, muitas vezes, isoladamente comuns. A convergência é rara.

A Terra pode ser descrita pelo mesmo desenho. A fonte é o disco pro-

toplanetário e a matéria que ele condensou. A energia vem da acreção, do decaimento radioativo e do impacto de Theia. A arquitetura envolve massa, órbita e litosfera. O gradiente separa o interior quente do espaço frio, mediado por uma tampa que aprendeu a se mover. A preservação depende de tectônica sustentada, inventário de voláteis, atmosfera e de uma história dinâmica que não esterilizou o sistema; o campo magnético é uma das variáveis dessa história, não sua garantia.

Chamar isso de fractal seria elegante e impreciso. O que se repete é a gramática. Um sistema hidrotermal em Carajás e um sistema planetário na Via Láctea obedecem à mesma sintaxe de fonte, energia, caminho, gradiente e preservação, porque essa sintaxe descreve como a matéria se concentra em qualquer escala em que haja transporte e um lugar onde parar.

Uma vez percebida a gramática, o resto é trabalho de mapeamento.

5. Sistemas minerais, e de onde vem esta ideia

A abordagem de sistemas minerais foi formulada para a exploração mineral australiana no início dos anos 1990, quando ficou claro que procurar depósitos por analogia com depósitos conhecidos tinha alcance curto, e que valia mais a pena descrever o processo que os produz e depois procurar as evidências desse processo (Wyborn, Heinrich e Jaques, 1994). A ideia amadureceu ao longo das duas décadas seguintes, ganhou uma teoria para geração de alvos exploratórios e para tomada de decisão (Hronsky e Groves, 2008) e um protocolo de tradução, que ensina a converter cada componente do sistema em critérios que possam ser efetivamente mapeados com os dados disponíveis (McCuaig, Beresford e Hronsky, 2010).

A versão que uso na prática, e transportada aqui para o céu, organiza o sistema em quatro componentes: fonte de metais, fluidos e ligantes; fonte de energia; arquitetura e caminhos de fluido; gradientes de deposição (Skirrow et al., 2009; Dulfer et al., 2016). É a formulação adotada no trabalho que ajudei a conceber sobre a geração de alvos de cobre e

ouro no leste da Província Mineral de Carajás (Martins, Seoane e Tavares, 2022). Cada critério de mira recebeu três notas, de importância, aplicabilidade e confiança, das quais saiu um peso global, e a soma ponderada das camadas produziu o mapa de favorabilidade. O mesmo esqueleto sustentou a avaliação da zona de cisalhamento Cinzento.

Este capítulo repete o procedimento com outro alvo. A província é a Via Láctea. O depósito procurado é água líquida estável na superfície de um planeta rochoso, mantida por tempo geológico. As camadas de evidência são as condições que os capítulos anteriores descreveram. O produto sai como uma distribuição de distâncias.

6. A Terra como jazida de água: o teor

Convém levar a metáfora até o fim, porque ela produz um resultado inesperado.

Os oceanos somam cerca de $1{,}34 \times 10^{21}$ quilogramas. A massa da Terra é $5{,}97 \times 10^{2}\square$ quilogramas. O teor superficial é de 0,022 por cento. Somando as estimativas de água armazenada no manto, entre meia e três massas oceânicas, o teor total do planeta fica entre 0,03 e 0,09 por cento.

Um depósito de cobre em Carajás pode ser lavrado com menos de um por cento de cobre. Comparada apenas a água superficial, a Terra tem um teor cerca de quarenta vezes menor; incluindo as estimativas do manto, a diferença cai para algo como dez a trinta vezes. Em teor, Europa e Encélado nos humilham, com vários por cento da massa em água. O que faz da Terra um depósito extraordinário é a tonelagem absoluta, o estado físico e a persistência de água líquida em contato com rocha e atmosfera.

E aqui aparece a inversão que a linguagem da exploração ajuda a ver. Em geologia econômica, teor alto costuma ser melhor. Neste sistema, água demais pode eliminar o alvo específico: continentes expostos, interação entre oceano, rocha e atmosfera e ciclagem comparável à terrestre. O limiar depende da topografia, da gravidade e da capacidade do manto de armazenar água; mundos oceânicos não são necessaria-

mente estéreis e podem permanecer habitáveis (Cowan e Abbot, 2014; Kite e Ford, 2018). O sistema procurado aqui tem uma janela operacional de teor, com piso e teto. A Terra ocupa uma faixa intermediária dessa janela, que a maioria das contas de habitabilidade não explicita.

7. As camadas do modelo e seus pesos

A tabela abaixo traduz o sistema planetário em critérios de mira, na mesma convenção do trabalho em Carajás. Importância mede o quanto o critério é essencial ao processo. Aplicabilidade mede o quanto ele pode ser observado ou mapeado com o que existe hoje. Confiança mede o crédito que merece, considerando a qualidade da evidência. O peso global é a média geométrica das três notas, para que uma nota baixa puxe o conjunto para baixo. Esses pesos funcionam como auditoria qualitativa do modelo; não entram como multiplicadores na Monte Carlo da Seção 10.

Tabela 15.1. Camadas de evidência do sistema planetário produtor de água superficial estável.

Cód.	Camada de evidência	Imp	Apl	Conf	Peso
S1	Estrela FGK na sequência principal, estável por bilhões de anos	9	10	9	9,3
S2	Metalicidade suficiente para formar planeta rochoso de massa terrestre	8	9	8	8,3
S3	Entrega de voláteis: hidrogênio nos condritos, captura nebular, corpos carbonáceos	10	5	6	6,7
S4	Teor de água dentro da janela útil, oceano sem afogar o continente	9	4	6	6,0
E1	Calor radiogênico e residual capaz de sustentar convecção por bilhões de anos	9	7	8	8,0
A1	Massa próxima de uma massa terrestre, para reter atmosfera e voláteis	10	10	9	9,7

Cód.	Camada de evidência	Imp	Apl	Conf	Peso
A2	Órbita na zona habitável, janela térmica da água líquida	10	9	8	9,0
A3	Impacto gigante com remoção postulada de grande parte da carapaça leve	10	3	5	5,3
G1	Impacto dentro da janela temporal, com as câmaras primordiais já destiladas	9	2	4	4,2
G2	Tectônica de placas iniciada e sustentada por tempo geológico	10	4	6	6,2
G3	Dínamo ativo e campo magnético modulando a interação atmosférica	8	6	7	7,0
G4	Sobrevivência dinâmica do sistema, sem esterilização por eventos externos	8	4	5	5,4

A leitura da tabela é imediata e desconfortável. As camadas de maior peso, A1, S1 e A2, são exatamente aquelas que a astronomia já sabe medir, e por isso ganham nota alta em aplicabilidade e confiança. As camadas de menor peso, G1, A3, G4 e G2, são as que carregam o argumento original deste livro. Elas têm importância máxima e confiança baixa. É assim que deve ser. Um modelo que atribuísse confiança alta a um postulado não testado estaria mentindo sobre si mesmo.

8. Um único ponto de treinamento

Há duas famílias de métodos em prospectividade. Os métodos guiados por dados aprendem os pesos a partir dos depósitos conhecidos, comparando o que existe onde há minério com o que existe onde não há. Regressão logística, pesos de evidência, redes neurais e *Random Forest* pertencem a essa família. Os métodos guiados por conhecimento atribuem os pesos a partir do entendimento do processo, sem treinamento, e são a escolha obrigatória quando os depósitos conhecidos são poucos demais para representar a variedade do alvo.

O caso planetário leva essa situação ao limite. Existe um único exemplo positivo conhecido, e estamos dentro dele; não há uma coleção representativa de negativos rotulados. Com uma amostra assim, nenhum algoritmo de aprendizado tem base para estimar generalização: um ajuste reproduziria a Terra e confundiria ajuste com previsão. O método guiado por conhecimento deixa de ser preferência e passa a ser a opção explicitamente auditável.

Duas consequências decorrem disso, e as duas são boas. A primeira é que a coluna de confiança da Tabela 15.1 vira a parte mais importante do modelo. Sem depósitos para calibrar, o que resta é declarar abertamente quanto crédito cada camada merece, e deixar que o leitor discorde de cada linha isoladamente.

A segunda é o viés de seleção que nenhum método guiado por dados corrigiria de qualquer maneira. Nós observamos a Terra porque a Terra produziu observadores. A amostra única não é uma amostra aleatória. É por isso que a conta a seguir usa distribuições de probabilidade em vez de valores pontuais, e é por isso que ela produz intervalos largos em vez de uma resposta.

9. O que os astrônomos já fazem sem usar a palavra

Nada disso é estranho à astronomia. É a mesma prática com outro vocabulário.

A equação de Drake (Drake, 1965) é uma cadeia de fatores multiplicativos que vai do número de estrelas ao número de civilizações detectáveis. Estruturalmente, é um modelo de favorabilidade com sete camadas e sem pesos. Seus termos podem ser escritos como frações condicionais, mas aplicações simplificadas frequentemente estimam cada um à parte e deixam dependências implícitas. Num sistema mineral, fonte, arquitetura, caminho, gradiente e preservação são declaradamente encadeados. Ganha-se a capacidade de dizer por que cada termo está ali e, sobretudo, a possibilidade de localizar onde o modelo pode falhar.

A zona habitável galáctica (Lineweaver, Fenner e Gibson, 2004) é uma sobreposição de camadas: metalicidade suficiente para formar planetas, ambiente radiativo menos hostil e tempo para evolução são combinados num mapa da galáxia, cujo resultado é uma faixa anelar mais favorável sob as premissas adotadas. É um mapa de prospectividade galáctico, feito por astrônomos que provavelmente nunca leram Wyborn.

Os índices de similaridade planetária, como o índice de similaridade com a Terra (Schulze-Makuch et al., 2011) e o índice de habitabilidade para planetas em trânsito (Barnes, Meadows e Evans, 2015), são sobreposições ponderadas explícitas, com parâmetros normalizados e pesos atribuídos por julgamento. São index overlay com outro nome.

Portanto a transferência que este capítulo propõe é menos ousada do que parece. A comunidade que procura planetas já usa o método. O que a exploração mineral acrescenta é a disciplina de separar importância, aplicabilidade e confiança em colunas distintas, e o hábito de terminar todo mapa com uma declaração do que ele não pode dizer.

10. A conta

Multiplicar os valores mais pessimistas de cada camada produz um número minúsculo; multiplicar os mais otimistas produz um número enorme; nenhum dos extremos isolados descreve o problema. Um procedimento transparente é atribuir a cada camada uma distribuição que represente o estado de ignorância e propagar a incerteza até o fim, como se faz com estimativas de recurso mineral. Sandberg, Drexler e Ord (2018) fizeram isso com a equação de Drake e mostraram como distribuições amplas alteram a leitura do paradoxo de Fermi. O resultado, porém, continua condicionado às distribuições escolhidas.

Cada camada recebeu uma distribuição log-uniforme entre um piso e um teto. Essa escolha é adequada quando se quer dar peso comparável a ordens de grandeza, mas não é uma prior objetiva. As camadas foram tratadas como independentes, simplificação discutida adiante, e foram

sorteados dois milhões de conjuntos. Uma reprodução independente, com novas sementes e dois milhões de sorteios, recuperou todos os percentis e coeficientes publicados até o arredondamento. A cadeia probabilística usada foi:

$$q = f_{FGK} \times f_Z \times \eta_\oplus \times f_{imp} \times f_{lua} \times f_{jan} \times f_{sob} \times f_{tec}$$

$$N_{fértil} = N_\square \times q$$

$$n_{fértil} = \rho \times q$$

Tabela 15.2. Intervalos adotados.

Camada	Símbolo	Intervalo	Origem
Estrelas na Via Láctea	$N_\square$	1×10^{11} a 4×10^{11}	contagens estelares e modelos de massa galáctica
Densidade estelar local	ρ	0,08 a 0,12 $pc_\square^{-3}$	censo de sistemas dentro de 10 parsecs
Fração de estrelas FGK	f_{FGK}	0,15 a 0,30	função de massa inicial
Metalicidade suficiente	f_Z	0,40 a 0,90	distribuição de [Fe/H] no disco fino
Planeta rochoso de massa terrestre na zona habitável	$\eta_\oplus$	0,05 a 0,60	Kepler (Hsu et al., 2019; Bryson et al., 2021)
Impacto gigante tardio	f_{imp}	0,10 a 0,60	simulações de impactos formadores de satélites; faixa ampliada (Elser et al., 2011)
Geometria capaz de remover três quartos da carapaça	f_{lua}	0,10 a 0,50	postulado geométrico adicional deste livro
Impacto dentro da janela temporal	f_{jan}	0,20 a 0,80	postulado deste livro

Camada	Símbolo	Intervalo	Origem
Sobrevivência dinâmica do sistema	f_sob	0,60 a 1,00	estabilidade orbital de longo prazo
Tectônica iniciada e sustentada	f_tec	0,20 a 0,80	prior de cenário deste livro

Tabela 15.3. Resultados, em percentis.

Grandeza	p5	p25	p50	p75	p95
Funil do impacto (f_imp × f_lua × f_jan)	1 em 172	1 em 81	**1 em 46**	1 em 26	1 em 12
Cadeia completa por estrela	2,1 × 10□□	6,5 × 10□□	**1,5 × 10□□**	3,4 × 10□□	1,1 × 10□³
Sistemas férteis na Via Láctea	3,7 × 10□	1,3 × 10□	**3,0 × 10□**	7,2 × 10□	2,4 × 10□
Distância média condicional ao sistema fértil mais próximo	38 al	56 al	**74 al**	98 al	143 al

Sob essas premissas, o funil é estreito, mas não fechado. Na mediana, cerca de um sistema em quarenta e seis passa pelas três exigências postuladas para o impacto: acontecer, ter a geometria capaz de remover grande parte da carapaça leve e ocorrer depois que as câmaras primordiais já destilaram material suficiente. Mesmo com esse estrangulamento, o cenário mediano retorna dezenas de milhões de sistemas férteis, porque o número de estrelas é enorme. O cálculo não estima diretamente a frequência real; mostra a consequência quantitativa das faixas adotadas.

Uma comparação pela outra ponta ajuda a dimensionar o número. Frank e Sullivan (2016) perguntaram quão improvável a tecnologia teria de ser para que a humanidade fosse a única espécie tecnológica

já produzida no universo observável, e não apenas a única existente agora. O limiar encontrado é da ordem de dez elevado a menos vinte e quatro por planeta em zona habitável. Nenhum gargalo deste livro chega perto desse pedágio. Isso não confirma a cadeia; apenas mostra que um funil de um em quarenta e seis é estreito na escala humana e generoso na escala cosmológica.

11. A distância mínima ao próximo sistema fértil

Contar sistemas na galáxia inteira produz um número impressionante e inútil. A pergunta operacional de qualquer exploração é a distância até o alvo mais próximo.

Para pontos distribuídos como um processo de Poisson homogêneo em três dimensões, com densidade n, a distância média condicional ao vizinho mais próximo é

E[R | n] = Γ(4/3) · (3 / 4πn)^(1/3) ≈ 0,8930 · (3 / 4πn)^(1/3)

P(R ≤ r | n) = 1 − exp(−4πnr³ / 3)

Uma escolha importa muito aqui e merece ser justificada. A densidade usada é a densidade estelar local, entre 0,08 e 0,12 estrelas por parsec cúbico, medida no censo dos arredores do Sol. Usar o número total de estrelas dividido pelo volume do disco daria uma densidade média de galáxia inteira, dominada pelas regiões internas, muito maior do que a densidade da vizinhança solar, e produziria uma distância artificialmente curta. Um mapa de prospectividade é sempre local. A contagem galáctica é uma estimativa de recurso, enquanto a distância é uma decisão de logística de sondagem.

Com a densidade local e as faixas adotadas, a cadeia completa produz na mediana cerca de 1,5 × 10□□ sistemas férteis por parsec cúbico, ou aproximadamente um sistema fértil a cada setenta mil parsecs cúbicos.

A média condicional da distância até o sistema fértil mais próximo fica

em cerca de setenta e quatro anos-luz. Entre os conjuntos de parâmetros, metade dessas médias cai entre cinquenta e seis e noventa e oito anos-luz, e noventa por cento entre trinta e oito e cento e quarenta e três. A Tabela 15.3 descreve incerteza paramétrica, não toda a variabilidade espacial.

Três leituras acompanham esse número. Sob os valores medianos locais, há aproximadamente mil e cem estrelas FGK dentro de setenta e quatro anos-luz. O cenário está dizendo que a expectativa é da ordem de uma ocorrência entre elas.

Os setenta e sete por cento dentro de cem anos-luz e os dezessete por cento dentro de cinquenta, obtidos na primeira versão da conta, medem a fração de conjuntos de parâmetros cuja distância média condicional cai abaixo desses limites. Quando o acaso espacial do processo de Poisson também é amostrado, a previsão muda: a mediana fica em cerca de setenta e um anos-luz, o intervalo de noventa por cento se abre para aproximadamente vinte e cinco a cento e sessenta e sete, e as probabilidades de ao menos um sistema dentro de trinta, cinquenta e cem anos-luz ficam próximas de oito, vinte e oito e setenta e quatro por cento, respectivamente.

O número mediano esperado de sistemas férteis dentro de cem anos-luz é de aproximadamente 1,8. Dentro de cento e cinquenta anos-luz, sobe para cerca de seis. Expectativa não é garantia: a realização espacial pode conter zero, um ou vários sistemas.

Setenta e poucos anos-luz é uma distância caracteristicamente estranha. Longe demais para qualquer visita dentro da engenharia hoje concebível; próxima o bastante para integrar o espaço de projeto de futuros observatórios de caracterização atmosférica. É a faixa em que a pergunta deixa a filosofia e começa a disputar o orçamento de um instrumento.

12. O tempo como camada do modelo

Até aqui o modelo procurou a jazida. Falta perguntar se ela está sendo lavrada agora.

Em exploração mineral, preservação é um critério como qualquer outro. Depósitos são erodidos, oxidados, metamorfizados, cobertos. Um sistema que funcionou perfeitamente há dois bilhões de anos e depois foi destruído não aparece no mapa de hoje. A diferença, no caso planetário, é que a preservação tem relógio: a coisa procurada dura pouco em relação à idade da galáxia, e a nossa observação acontece num instante específico.

Duas camadas novas entram, e ambas têm a forma de uma fração de tempo.

Para uma biosfera complexa contemporânea, a fração é a duração da janela dividida pela idade do disco galáctico. Na Terra, a vida complexa ocupa uma fração recente da história, e estimativas de habitabilidade futura sugerem uma janela limitada pelo aumento do brilho solar. O modelo adota duração entre 0,5 e 5 bilhões de anos, sobre uma idade de disco de 10 bilhões, e probabilidade entre 0,2 e 1,0 de que tectônica sustentada produza uma biosfera complexa.

Para uma civilização tecnológica contemporânea, a fração é a duração da fase tecnológica dividida pela mesma idade. Aqui a ignorância é quase total. O modelo adota uma duração entre cem e dez milhões de anos, cobrindo de uma janela curta a uma estabilidade de longo prazo, e uma probabilidade entre 0,01 e 1,0 de que uma biosfera complexa produza tecnologia. São priors de cenário, não frequências observadas.

Tabela 15.4. O efeito do tempo.

Alvo	Contagem galáctica (mediana)	Distância média condicional	Intervalo de 90%
Sistema fértil, com tectônica sustentada	3,0 × 10□	74 al	38 a 143 al
Biosfera complexa contemporânea	2,1 × 10□	179 al	81 a 396 al
Civilização tecnológica contemporânea	4	14.000 al*	1.800 a 110.000 al*

A degradação é instrutiva. O cenário de água líquida e tectônica sustentada é relativamente abundante e local. Ao exigir uma biosfera complexa contemporânea, a distância média mais que dobra. Para tecnologia contemporânea, a mediana cai para quatro ocorrências em toda a Galáxia. Nesse regime, porém, a aproximação local homogênea e tridimensional já não vale: o disco galáctico é finito e achatado. Os 14 mil anos-luz e seu intervalo, marcados com asterisco, são extrapolações formais da equação local, não previsões espaciais interpretáveis.

A quantidade mais defensável nessa última linha é a contagem. Amostrando também a ocorrência como processo de Poisson, os próprios priors do modelo dão cerca de sessenta e sete por cento de chance de ao menos uma civilização tecnológica contemporânea na Via Láctea e cerca de trinta e três por cento de chance de nenhuma. Isso mede a ignorância embutida nas faixas, sobretudo quanto tempo dura uma fase tecnológica, e não uma propriedade já observada do universo.

13. A sensibilidade, e a coincidência que interessa

Toda estimativa de recurso termina com uma análise de sensibilidade que mostra qual variável domina o resultado. Foi calculada a correla-

ção de postos entre cada camada sorteada e a distância média condicional obtida.

Tabela 15.5. Sensibilidade da distância média condicional, correlação de Spearman em escala logarítmica.

Camada	Correlação
$\eta_{\oplus}$, rochoso de massa terrestre na zona habitável	−0,60
f_imp, ocorrência do impacto gigante	−0,42
f_lua, geometria capaz de arrancar a carapaça	−0,38
f_tec, tectônica sustentada	−0,33
f_jan, janela temporal do impacto	−0,32
f_Z, metalicidade	−0,19
f_FGK, tipo espectral	−0,16
f_sob, sobrevivência dinâmica	−0,12
ρ, densidade estelar local	−0,09
N□, número de estrelas na galáxia	0,00

A última linha merece uma leitura precisa. O número de estrelas da Via Láctea tem correlação zero com a distância local porque, por construção, ele não entra nessa equação: a distância usa a densidade estelar da vizinhança solar. N□ controla a contagem galáctica; ρ controla a logística local. A pergunta ‘quantos’ e a pergunta ‘a que distância’ são governadas por parâmetros diferentes.

Há uma concordância útil, mas não independente. Depois de $\eta_{\oplus}$, as variáveis que dominam a sensibilidade são f_imp, f_lua, f_tec e f_jan. Elas correspondem às linhas de menor confiança da Tabela 15.1. Isso ocorre em parte porque a baixa confiança levou à escolha de intervalos largos, e intervalos largos dominam a variância de um produto multiplicativo. A tabela qualitativa e a Monte Carlo expressam, por linguagens diferentes, os mesmos julgamentos de entrada.

O modelo é frágil precisamente onde este livro é original. Isso é útil porque a fragilidade está localizada e pode ser atacada. Medir melhor a frequência de impactos formadores de satélites, distinguir impactos

comuns da geometria especial postulada aqui e estimar a fração de planetas rochosos com tectônica sustentada estreitaria a conta. É um programa de pesquisa, com endereço.

14. A escada das crostas

Existe uma comparação observacional disponível na coleção de meteoritos e nas superfícies planetárias discutidas no Capítulo 1. Ela serve como teste de coerência, não como validação estatística independente.

Meteoritos são amostras de outros corpos, não apenas de suas crostas: há materiais indiferenciados, mantélicos, crustais e até metálicos. Lidos com dados orbitais e medições in situ, eles sugerem uma escada heurística de quatro regimes. Os degraus não são perfeitamente aninhados e não exigem sempre as mesmas condições.

O primeiro regime é a crosta basáltica, produzida por fusão parcial de silicatos. Corpos pequenos aquecidos por alumínio-26 puderam alcançá-la muito cedo. Os eucritos de Vesta datam de cerca de 4,56 bilhões de anos: crosta basáltica era possível antes de a Terra terminar de crescer. É um produto disseminado da diferenciação, não literalmente universal.

O segundo regime é a crosta de flotação, representada pelo anortosito lunar. Ela requer um oceano de magma profundo e duradouro no qual plagioclásio flutue enquanto minerais densos afundam (Warren, 1985). Não é simplesmente o degrau seguinte ao basalto: é uma trajetória específica de diferenciação em larga escala.

O terceiro regime é a crosta evoluída, intermediária a félsica. Água favorece a fusão a temperaturas menores e a produção de grandes volumes félsicos, mas não é condição exclusiva: cristalização fracionada e refusão também produzem rochas ricas em sílica. GRA 06128/9 registra crosta asteroidal andesítica e rica em feldspato, formada muito cedo (Day et al., 2009). Marte preserva composições félsicas e granitoides locais (Sautter et al., 2015). Em Vênus, a natureza félsica das tésseras continua hipótese a ser testada.

O quarto regime é a tectônica de placas sustentada: placas rígidas se separam, colidem, subductam e reciclam por bilhões de anos. A Terra é o único corpo conhecido em que esse regime opera hoje de forma inequívoca. Vesta, Lua, Marte e Vênus seguiram histórias diferentes; não formam uma sequência linear em que cada corpo simplesmente parou um degrau antes. A metáfora preserva a tendência geral sem apagar essas bifurcações.

A escada é, portanto, uma heurística observacional. Crosta basáltica é disseminada; diferenciação em escala de oceano de magma é menos comum; grandes volumes de crosta evoluída são mais raros; tectônica de placas sustentada só foi confirmada na Terra. O padrão é compatível com exigências crescentes, mas vieses de amostragem e caminhos não aninhados impedem tratá-lo como prova independente do modelo.

15. Onde apontar o telescópio

O modelo termina em instruções de sondagem. Sondar é caro; priorizar é essencial.

Primeiro critério, o alvo primário. Estrelas FGK na sequência principal, dentro de cem anos-luz, com planeta rochoso entre 0,8 e 1,5 massas terrestres na zona habitável conservadora (Kasting, Whitmire e Reynolds, 1993; Kopparapu et al., 2013). Isso corresponde a S1, A1 e A2, a parte do modelo que a astronomia já sabe executar. Com lançamento planejado para março de 2027, PLATO deverá ampliar o censo de trânsitos de longo período; a espectroscopia de precisão ajudará a fornecer massas.

Segundo critério, a lua. Uma lua grande pode se revelar por variações no instante e na duração do trânsito, causadas pelo movimento do planeta em torno do baricentro comum. Candidatos foram anunciados em Kepler-1625b e Kepler-1708b (Teachey e Kipping, 2018; Kipping et al., 2022), ambos ao redor de gigantes gasosos. Heller e Hippke (2024) atribuíram os sinais ao tratamento dos dados; Kipping et al. (2024) contestaram partes dessa reanálise. O estado da arte permanece: ne-

nhuma exolua confirmada, candidatos disputados e um limite de detecção muito acima do sistema Terra–Lua. Uma lua com um por cento da massa do planeta ao redor de uma Terra está fora do alcance atual.

O que existe de sólido é a prova de que sistemas de satélites se formam. O disco circumplanetário detectado ao redor de PDS 70c (Benisty et al., 2021) mostra material suficiente para formar luas em torno de um planeta ainda em construção. A fábrica existe e foi fotografada.

Terceiro critério, os indícios indiretos de tectônica. Como a lua é inacessível por enquanto, vale procurar as consequências. Uma amostra de planetas pode testar tendências de dióxido de carbono com insolação; continentes podem produzir variações rotacionais de refletância e brilho especular. Em rádio, buscas atuais são mais sensíveis a magnetosferas muito mais fortes que a terrestre, sobretudo em planetas gigantes ou sistemas intensamente irradiados. Um análogo do dínamo terrestre emite em frequências e potências abaixo do alcance prático dos radiotelescópios de solo, portanto ainda não é uma camada observável direta para o SKA. Nenhum sinal isolado demonstraria tectônica; o valor está na convergência.

Quarto critério, o experimento de controle. Vênus está a quarenta milhões de quilômetros e oferece a comparação mais direta com um planeta de massa terrestre que seguiu outra trajetória. DAVINCI investigará a atmosfera profunda e razões isotópicas; VERITAS, planejada para a década de 2030, mapeará topografia, deformação e emissividade. Se as tésseras forem confirmadas como crosta félsica antiga e se o regime tectônico puder ser reconstruído, o teste se tornará muito mais forte. Por enquanto, Vênus é a pergunta vizinha, não a resposta pronta.

16. Como este modelo morre, e o que ele nunca disse

Um mapa de favorabilidade que não pode ser refutado é decoração. Cinco observações derrubariam este.

Um planeta rochoso sem lua grande exibindo tectônica de placas inequívoca destruiria a necessidade universal da camada A3 e retiraria o impacto do funil geral. Não provaria, sozinho, que o impacto foi irrelevante para a história específica da Terra; para isso seriam necessárias previsões exclusivas do mecanismo.

Modelos de dano, herança e convecção já mostram rotas de iniciação de subducção sem remoção prévia de uma carapaça por Theia (Korenaga, 2013; Bercovici e Ricard, 2014; Weller e Lenardic, 2012). Portanto, A3 já compete com explicações alternativas. Ela só conserva função explicativa forte se produzir consequências exclusivas (no orçamento lunar, na densidade da crosta primitiva ou numa associação observável entre grandes luas e tampas móveis) que as alternativas não produzam.

O fechamento do orçamento de alumínio e de volume da Lua é uma verificação quantitativa que pode falhar. Se determinações melhores da espessura da crosta lunar e da composição do manto lunar exigirem uma carapaça terrestre removida muito diferente de sete a dez quilômetros equivalentes, a aritmética do capítulo do impacto quebra.

Levantamentos de exoluas que mostrem que grandes luas formadas por impacto são comuns elevariam f_lua e f_imp, encurtariam a distância e enfraqueceriam a tese da raridade. Para mim, seria o resultado mais bem-vindo da lista.

E qualquer evidência de tectônica de placas sustentada em Vênus, no passado ou agora, reduziria a necessidade de uma lua grande e de um oceano superficial para alcançar o regime móvel. Isso exigiria reescrever o mecanismo, embora não apagasse automaticamente todos os efeitos possíveis do impacto terrestre.

Faltam as ressalvas de método. Os intervalos da Tabela 15.2 são julgamentos informados; outro pesquisador poderia escolher outros. A distribuição log-uniforme e a independência entre camadas são priors de cenário, não fatos. Massa, metalicidade, arquitetura orbital e frequência de impactos podem ser correlacionadas. A homogeneidade espacial é aproximação local e falha em escala galáctica. Os pesos qualitativos não entram na probabilidade. E o viés de seleção antrópico

permanece sem correção satisfatória com uma única observação positiva.

Feitas as ressalvas, sobra o que sobra em todo mapa de prospectividade, e é bastante.

Na minha experiência profissional, nenhum mapa de favorabilidade acertava exatamente onde estava o minério. Não é para isso que serve. Um mapa de favorabilidade diz onde vale a pena furar, ordena o gasto e transforma uma pergunta vaga numa sequência de decisões com custo conhecido. Quando esses mapas eram entregues para publicação, a garantia possível era mais modesta: a área vermelha merecia a primeira sondagem; a área azul podia esperar.

Este capítulo entrega o mesmo produto em outra escala. Sob os priors adotados, a área vermelha começa na ordem de setenta anos-luz, ao redor de cerca de mil estrelas parecidas com o Sol. A sondagem não é uma viagem: é um programa progressivo de censos, espectros e comparações planetárias. Se houver água líquida sobre rocha, continentes emergindo e talvez uma lua grande no céu, alguma dessas estrelas pode guardar a resposta.

Resta a parte que a estatística não alcança, e que é o assunto do epílogo.

17. Níveis de confiança

O capítulo se encerra como um relatório: separando o que é evidência, o que é modelo publicado adotado como quadro e o que é hipótese deste livro. Um manifesto que não se oferece para teste é um sermão.

Evidência forte. A correlação entre fragmentação continental e diversidade marinha ao longo do Fanerozoico (Zaffos, Finnegan e Peters, 2017). A radiação dos ciclídeos nos lagos de rifte africanos (Seehausen, 2006). A realimentação entre alteração de silicatos, dióxido de carbono e temperatura (Walker, Hays e Kasting, 1981). A ampla ocorrência de planetas rochosos no censo Kepler, embora as taxas exatas na zona habitável dependam do modelo (Hsu et al., 2019; Bryson et

al., 2021). Leis de potência em populações de falhas e em magnitudes de terremotos (Gutenberg e Richter, 1944; Bonnet et al., 2001). E o fato observacional de que nenhuma exolua foi confirmada até hoje.

Modelos e leituras publicadas, adotados como quadro ou contraponto. A relação entre tectônica e diversidade (Valentine e Moores, 1970; Zaffos, Finnegan e Peters, 2017). A abordagem de sistemas minerais e sua tradução em critérios mapeáveis (Wyborn, Heinrich e Jaques, 1994; Skirrow et al., 2009; McCuaig, Beresford e Hronsky, 2010). O tratamento por Monte Carlo de cadeias multiplicativas incertas (Sandberg, Drexler e Ord, 2018). A zona habitável galáctica (Lineweaver, Fenner e Gibson, 2004). O limite empírico de Frank e Sullivan (2016). Modelos de mundos oceânicos, tampas estagnadas e iniciação de placas sem impacto lunar específico (Cowan e Abbot, 2014; Kite e Ford, 2018; Höning et al., 2021; Korenaga, 2013; Bercovici e Ricard, 2014).

Hipóteses de trabalho deste livro, oferecidas para teste. A remoção de grande parte da carapaça leve por Theia como condição importante para a história tectônica terrestre, camada A3 da Tabela 15.1. A janela temporal do impacto, camada G1. Os intervalos adotados para f_lua, f_jan e f_tec. A extensão poética da gramática fractal ao material humano. E a proposição central do manifesto: onde houver tectônica de placas sustentada, o espaço de oportunidades para diversificação e complexidade será continuamente renovado. Que isso conduza à inteligência, mesmo em bilhões de anos, permanece uma hipótese, a mais ousada do capítulo.

O contraponto publicado permanece registrado. A hipótese da Terra Rara (Ward e Brownlee, 2000) sustenta que a conjunção terrestre pode ser excepcional a ponto de nos deixar sozinhos. O desacordo é quantitativo, camada por camada, e também causal: quais condições são necessárias, quais apenas favorecem o processo e quais são acidentes da nossa própria história. O árbitro será uma coleção de planetas, não uma única Terra.

Referências

Barnes, R.; Meadows, V. S.; Evans, N. (2015). Comparative habitability of transiting exoplanets. The Astrophysical Journal, 814, 91.

Benisty, M. et al. (2021). A circumplanetary disk around PDS 70c. The Astrophysical Journal Letters, 916, L2.

Bercovici, D.; Ricard, Y. (2014). Plate tectonics, damage and inheritance. Nature, 508, 513–516.

Bonnet, E. et al. (2001). Scaling of fracture systems in geological media. Reviews of Geophysics, 39, 347–383.

Bryson, S. et al. (2021). The occurrence of rocky habitable-zone planets around solar-like stars from Kepler data. The Astronomical Journal, 161, 36.

Cowan, N. B.; Abbot, D. S. (2014). Water cycling between ocean and mantle: super-Earths need not be waterworlds. The Astrophysical Journal, 781, 27.

Day, J. M. D. et al. (2009). Early formation of evolved asteroidal crust. Nature, 457, 179–182.

Drake, F. D. (1965). The radio search for intelligent extraterrestrial life. In: Mamikunian, G.; Briggs, M. H. (eds.), Current Aspects of Exobiology. Pergamon, 323–345.

Dulfer, H. et al. (2016). Potential for intrusion-hosted Ni-Cu-PGE sulfide deposits in Australia: a continental-scale analysis of mineral system prospectivity. Geoscience Australia, Record 2016/01.

Elser, S.; Moore, B.; Stadel, J.; Morishima, R. (2011). How common are Earth-Moon planetary systems? Icarus, 214, 357–365.

Foley, B. J.; Driscoll, P. E. (2016). Whole planet coupling between climate, mantle, and core: implications for rocky planet evolution. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 17, 1885–1914.

Frank, A.; Sullivan, W. T. (2016). A new empirical constraint on the

prevalence of technological species in the Universe. Astrobiology, 16, 359–362. https://doi.org/10.1089/ast.2015.1418

Gülcher, A. J. P. et al. (2020). Corona structures driven by plume-lithosphere interactions and evidence for ongoing plume activity on Venus. Nature Geoscience, 13, 547–554.

Gunell, H. et al. (2018). Why an intrinsic magnetic field does not protect a planet against atmospheric escape. Astronomy & Astrophysics, 614, L3. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832934.

Gutenberg, B.; Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. Bulletin of the Seismological Society of America, 34, 185–188.

Heller, R.; Hippke, M. (2024). Large exomoons unlikely around Kepler-1625 b and Kepler-1708 b. Nature Astronomy, 8, 193–206.

Höning, D.; Baumeister, P.; Grenfell, J. L.; Tosi, N.; Way, M. J. (2021). Early habitability and crustal decarbonation of a stagnant-lid Venus. Journal of Geophysical Research: Planets, 126, e2021JE006895. https://doi.org/10.1029/2021JE006895.

Hronsky, J. M. A.; Groves, D. I. (2008). Science of targeting: definition, strategies, targeting and performance measurement. Australian Journal of Earth Sciences, 55, 3–12.

Hsu, D. C.; Ford, E. B.; Ragozzine, D.; Ashby, K. (2019). Occurrence rates of planets orbiting FGK stars: combining Kepler DR25, Gaia DR2 and Bayesian inference. The Astronomical Journal, 158, 109.

Kasting, J. F.; Whitmire, D. P.; Reynolds, R. T. (1993). Habitable zones around main sequence stars. Icarus, 101, 108–128.

Kipping, D. et al. (2022). An exomoon survey of 70 cool giant exoplanets and the new candidate Kepler-1708 b-i. Nature Astronomy, 6, 367–380.

Kipping, D. et al. (2024). A Reply to: Large exomoons unlikely around Kepler-1625 b and Kepler-1708 b. arXiv:2401.10333. https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.10333.

Kite, E. S.; Ford, E. B. (2018). Habitability of exoplanet waterworlds. The Astrophysical Journal, 864, 75.

Kopparapu, R. K. et al. (2013). Habitable zones around main-sequence stars: new estimates. The Astrophysical Journal, 765, 131.

Korenaga, J. (2013). Initiation and evolution of plate tectonics on Earth: theories and observations. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 41, 117–151.

Lenardic, A. (2018). The diversity of tectonic modes and thoughts about transitions between them. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 376, 20170416.

Lineweaver, C. H.; Fenner, Y.; Gibson, B. K. (2004). The galactic habitable zone and the age distribution of complex life in the Milky Way. Science, 303, 59–62.

Mandelbrot, B. (1967). How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. Science, 156, 636–638. https://doi.org/10.1126/science.156.3775.636

Martins, T. F.; Seoane, J. C. S.; Tavares, F. M. (2022). Cu-Au exploration target generation in the eastern Carajás Mineral Province using random forest and multi-class index overlay mapping. Journal of South American Earth Sciences, 116, 103790.

McCuaig, T. C.; Beresford, S.; Hronsky, J. (2010). Translating the mineral systems approach into an effective exploration targeting system. Ore Geology Reviews, 38, 128–138.

Sandberg, A.; Drexler, E.; Ord, T. (2018). Dissolving the Fermi paradox. arXiv:1806.02404.

Sautter, V. et al. (2015). In situ evidence for continental crust on early Mars. Nature Geoscience, 8, 605–609. https://doi.org/10.1038/ngeo2474.

Schulze-Makuch, D. et al. (2011). A two-tiered approach to assessing the habitability of exoplanets. Astrobiology, 11, 1041–1052.

Seehausen, O. (2006). African cichlid fish: a model system in adaptive radiation research. Proceedings of the Royal Society B, 273, 1987–1998.

Skirrow, R. G. et al. (2009). Uranium mineral systems: processes, exploration criteria and a new deposit framework. Geoscience Australia, Record 2009/20.

Smrekar, S. E. et al. (2010). Recent hotspot volcanism on Venus from VIRTIS emissivity data. Science, 328, 605–608.

Stern, R. J. (2018). The evolution of plate tectonics. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 376, 20170406.

Teachey, A.; Kipping, D. M. (2018). Evidence for a large exomoon orbiting Kepler-1625b. Science Advances, 4, eaav1784.

Turcotte, D. L. (1997). Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. 2. ed. Cambridge University Press, Cambridge.

Valentine, J. W.; Moores, E. M. (1970). Plate-tectonic regulation of faunal diversity and sea level: a model. Nature, 228, 657–659. https://doi.org/10.1038/228657a0

Walker, J. C. G.; Hays, P. B.; Kasting, J. F. (1981). A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature. Journal of Geophysical Research, 86, 9776–9782.

Ward, P. D.; Brownlee, D. (2000). Rare Earth: Why Complex Life Is Uncommon in the Universe. Copernicus/Springer, New York.

Warren, P. H. (1985). The magma ocean concept and lunar evolution. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 13, 201–240.

Weller, M. B.; Lenardic, A. (2012). Hysteresis in mantle convection: plate tectonics systems. Geophysical Research Letters, 39, L10202.

Wyborn, L. A. I.; Heinrich, C. A.; Jaques, A. L. (1994). Australian Proterozoic mineral systems: essential ingredients and mappable criteria. In: Australian Institute of Mining and Metallurgy Annual Conference Proceedings, 109–115.

Zaffos, A.; Finnegan, S.; Peters, S. E. (2017). Plate tectonic regulation of global marine animal diversity. Proceedings of the National Academy of Sciences, 114, 5653–5658. https://doi.org/10.1073/pnas.1702297114