

A Radioquímica e a Idade da Terra

Daniel Ferreira Araújo e Gerson de Souza Mól

A determinação da idade da Terra é um tema que envolve conhecimentos de radioquímica e que, até que se chegasse a um consenso, foi motivo de grandes debates. Neste trabalho, são apresentadas diferentes visões sobre esse tema, começando pelas ideias vinculadas à religião na Idade Média, passando pelas mudanças na concepção do tempo geológico durante a Revolução Científica até chegar ao desenvolvimento da datação radioativa no século XX. Enfatizam-se controvérsias científicas surgidas, no século XIX, a respeito da idade da Terra, notadamente entre Lord Kelvin e Charles Darwin. Em seguida, aborda-se como Rutherford, fazendo uso da radioatividade, conseguiu realizar a primeira datação radiométrica de um mineral, e a brilhante proposta de Clair Patterson para determinação da idade da Terra em 4,5 bilhões de anos, valor aceito até os dias atuais. Por último, apresenta-se uma escala do tempo geológico e um convite à reflexão sobre a magnitude do tempo de nosso planeta.

► radioatividade, datação isotópica, decaimento radioativo ◀

Recebido em 07/01/2013, aceito em 28/09/2014.

164

Apresentar a ciência como um processo histórico de construção coletiva é uma tendência do ensino atual. No entanto, nem sempre é feito assim e muitos conhecimentos e teorias são apresentados de forma pronta e acabada, fortalecendo a visão de que as ciências são constituídas de verdades prontas e absolutas. Como forma de exemplificar os debates históricos que levaram à consolidação de ideias e teorias, apresentamos um pouco da história que envolveu a determinação da idade da Terra, exemplificando como a Química e, em especial, o desenvolvimento dos conhecimentos sobre a radioatividade, no século XX, possibilitaram uma melhor compreensão da magnitude do tempo geológico, bem como o conhecimento da história geológica do nosso planeta.

Segundo Teixeira (2009), o conceito de tempo geológico é uma das mais importantes contribuições das geociências para o pensamento humano. Carneiro et al. (2004) afirmam que diferentes motivos existem para que o educando se aproprie mais intensivamente do mais fundamental conceito geológico: o tempo. Além disso, conhecimentos sobre a

dinâmica e a história da Terra são fundamentais para entendermos diversos fenômenos naturais.

Com este texto, espera-se disponibilizar a professores de ensino médio uma temática transversal que permita articular conhecimentos de Química com outras disciplinas como também mostrar a potencialidade de temas geocientíficos na valorização e no entendimento do meio natural pelo educando.

Qual a idade da Terra? Como a calculamos?

Para essas perguntas, ao longo da história da humanidade, o homem obteve diferentes respostas. Na busca de tais respostas, surgiu um dos maiores embates entre teólogos e cientistas. Por não ser uma questão simples também para as ciências, durante os séculos XIX e XX, essa questão também foi motivo de calorosos debates entre físicos, biólogos, geólogos e outros cientistas.

Atualmente, aceita-se com naturalidade que a Terra tenha cerca de 4,5 bilhões de anos. No entanto, a ideia de que esta poderia ser extremamente antiga só emergiu por volta do século XVI com o advento do pensamento científico moderno. Antes disso, todas as estimativas da idade da Terra eram feitas sob a perspectiva das religiões, considerando como

A seção "Química e sociedade" apresenta artigos que focalizam diferentes inter-relações entre Ciência e sociedade, procurando analisar o potencial e as limitações da Ciência na tentativa de compreender e solucionar problemas sociais.

ponto de partida a criação divina. Segundo o judaísmo, nosso planeta teria sido concebido em 3.761 a.C. De acordo com o calendário bizantino, adotado pela igreja ortodoxa russa, isso teria ocorrido 5.508 a.C. Ideias semelhantes perduraram na Europa durante toda a Idade Média e Renascença. Enquanto para os teólogos, a criação do mundo, em coerência com a Bíblia, ocorrera há cerca de 6.000 anos.

Tal concepção transformou-se definitivamente em um dogma quando, em torno de 1650, o respeitado arcebispo protestante irlandês James Ussher (1581-1656) publicou um volumoso tratado sobre a cronologia bíblica. Seus cálculos foram feitos a partir das escrituras sagradas e outras fontes históricas. A Tabela 1 apresenta os períodos que constituem a idade da Terra segundo a Bíblia.

Tabela 1: Cálculo da idade da Terra segundo a Bíblia.

Período	Tempo/anos
Da criação ao dilúvio	1.656
Do dilúvio a Abraão	292
De Abraão ao êxodo do Egito	503
Do êxodo à construção do Templo	481
Do Templo ao cativeiro	414
Do cativeiro ao nascimento de Cristo	614
De Cristo a James Ussher	1.650
De James Ussher até 2013	363
Idade da Terra	5.972

Fonte: Teixeira et al. (2009)

Um indício do prestígio e da influência da proposta de Ussher é o fato de que tal fórmula de cálculo para a idade da Terra ter permanecido, até o início do século XX, em notas de rodapé de várias bíblias, inclusive as publicadas pelas renomadas universidades inglesas de Oxford e Cambridge (Press et al., 2006).

O distanciamento desses dogmas religiosos começaria apenas com a Revolução Científica, iniciada no século XVI. As grandes descobertas realizadas por Nicolau Copérnico (1473-1543), Galileu Galilei (1564-1642), Johannes Kepler (1571-1630) e as ideias de René Descartes (1596-1650), Isaac Newton (1643-1727) e Francis Bacon (1561-1626) mudaram nossa visão sobre o universo. Daí surgiram novas teorias. O Sistema Solar, a Terra e a vida, tidos como criações divinas, passavam a ser vistos pela ciência como processos naturais, complexos e de longa duração.

Fósseis e datação do tempo relativo

Nesse cenário, os conhecimentos em relação à análise de

rochas, estratos, fósseis e estruturas geológicas evoluíram e permitiram desvendar, pouco a pouco, a história da Terra e a dimensão de seu tempo geológico.

No século XVII, o bispo católico dinamarquês Nicolau Steno (1638-1686) observou que os estratos sedimentares formaram-se horizontalmente. Isso significa que sedimentos depositaram-se em camadas horizontais à medida que chegaram à bacia de sedimentação, ficando as mais antigas na base e as mais novas acima, sucessivamente. O geólogo britânico William Smith (1769-1839) constatou, enquanto participava da construção de canais na Grã-Bretanha, que grupos de fósseis encontrados nos estratos seguiam uma ordem determinada e invariável. Ele observou que se essa ordem é conhecida, torna-se possível determinar a idade relativa entre camadas a partir de seu conteúdo fóssilífero. Logo, rochas com os mesmos fósseis apresentavam a mesma idade, mesmo quando situadas em áreas geográficas distintas. Essa constatação, conhecida como princípio da sucessão fóssil, passou então a ser utilizada como um instrumento prático para determinação relativa do tempo dos processos geológicos. Posteriormente, esse princípio foi explicado pela Teoria da Evolução de Charles Darwin (1809-1882): uma vez que existe uma evolução biológica irreversível ao longo dos tempos geológicos, os fósseis ordenam-se no tempo de acordo com a escala evolucionária.

Surgimento da noção do tempo geológico

Avanços nos estudos de fósseis, entre fins do século XVIII e início do século XIX, levaram vários cientistas a concluir que a idade da Terra deveria ser de uma ordem muito maior do que a de milhares de anos. O grande precursor dessa nova concepção do tempo geológico foi o químico escocês

James Hutton (1726-1797) que, após se enriquecer com a invenção de um processo industrial para produção de cloreto de amônio, realizou diversas viagens para se dedicar à sua paixão: a geologia. Viajando pela Inglaterra e pela Escócia, observou diferentes paisagens e elaborou a teoria das mudanças graduais. Com essa teoria, Hutton propunha que todo registro geológico podia ser explicado pelo

princípio de causas naturais, tais como vulcanismo, erosão, intemperismo, sedimentação etc., atuando de forma cíclica por períodos inimaginavelmente longos. Segundo Hutton, “Para onde quer que olhasse, encontrava sinais de que as forças naturais hoje atuantes no planeta agem muito devagar, e que essas mesmas forças sempre estiveram em ação” (Mosley; Lynch, 2011, p. 121).

As ideias de Hutton ficariam famosas mais tarde com sua célebre frase: “[...] um mundo sem vestígios de um início nem perspectiva de um fim” (Gerald, 2010).

Em 1830, Charles Lyell (1797-1875) publicou o livro

No século XVII, o bispo católico dinamarquês Nicolau Steno (1638-1686) observou que os estratos sedimentares formaram-se horizontalmente. Isso significa que sedimentos depositaram-se em camadas horizontais à medida que chegaram à bacia de sedimentação, ficando as mais antigas na base e as mais novas acima, sucessivamente.

Principles of Geology, no qual desenvolveu, de forma mais ampla, as ideias de Hutton. O princípio de causas naturais de Hutton foi denominado uniformitarismo, indicando que os processos geológicos do passado teriam sido iguais aos atuais em gênero e intensidade, ou seja, uniformes durante a história da Terra. A Geologia começa a emergir como uma Ciência, baseada em evidências cuja interpretação apoiava-se no uniformitarismo, considerando que o presente é a chave do passado.

O trabalho de Lyell influenciou gerações e gerações de cientistas, entre os quais Charles Darwin. No livro *A origem das espécies* (1859), utilizando o princípio da sucessão fóssil e do registro estratigráfico, Darwin propôs que idade da Terra seria da ordem de bilhões de anos. A apresentação pública desses valores foi um ponto de partida à corrida do cálculo da idade do nosso planeta.

Atualmente, considera-se que, apesar de ser realmente longo, o tempo geológico não é infinito ou cíclico e que a história do planeta foi marcada por diversos eventos catastróficos. Dessa forma, passamos do uniformitarismo para o atualismo, que considera esses eventos catastróficos associados à constância de eventos naturais sujeitos a lei da gravidade, leis da termodinâmica e outras leis das ciências (Carneiro et al., 2005).

Controvérsias entre físicos e geólogos

William Thomson (1824-1907), conhecido como Lord Kelvin, também calculou a idade da Terra, obtendo resultados diferentes dos de Darwin. Kelvin foi um grande questionador do uniformitarismo de Lyell, pois, segundo ele, a ideia de ciclos geológicos eternos violava as leis da termodinâmica. Para Kelvin, a energia da Terra não era inesgotável e provinha da energia termal da origem do planeta. Utilizando a teoria de condução de calor de Fourier, Kelvin presumiu que a Terra tinha seu interior quente e perdia calor para o espaço continuamente. Portanto, sabendo a taxa de dissipação de calor pelo tempo, poderia calcular a idade do planeta. Dessa forma, admitindo que pudesse faltar algum fator desconhecido em seus cálculos, calculou que a idade da Terra estaria entre 20 e 40 milhões de anos (Brush, 1996; Gerald, 2010).

Outros cientistas, utilizando outros métodos, chegaram a diferentes valores. O irlandês John Joly (1857-1933), por exemplo, calculou considerando a idade dos oceanos, que deveriam ser iguais à da Terra. Joly considerou que a quantidade de sódio nos oceanos aumentava gradativamente devido à dissolução das rochas. Com base nesse raciocínio, dividiu a massa de sódio do oceano pela taxa de massa depositada anualmente pelos rios para calcular a idade do oceano, encontrando um valor próximo ao de Lord Kelvin: 100 milhões de anos. Outras propostas para estipular a idade

do nosso planeta se baseavam na extrapolação de taxas de erosão e sedimentação necessárias para se obter o tempo de acumulação de sedimentos num perfil estratigráfico. Esses métodos não consideravam as diferentes taxas de erosão e consequentemente levavam a valores díspares entre uma localidade e outra, estimando idades que variavam entre poucos milhões até bilhões de anos.

Em meados do século XIX, os debates se intensificaram polarizando biólogos e geólogos de um lado e físicos de outro. Enquanto os físicos defendiam uma Terra mais jovem, biólogos e geólogos defendiam uma com bilhões de anos.

O embate entre físicos, biólogos e geólogos só começaria a ter fim com a descoberta da radioatividade, em 1896, por Antoine Becquerel (1852-1908). Essa descoberta atraiu o interesse da comunidade científica da época, incluindo Ernest Rutherford (1871-1937).

A radioatividade começa a desvendar a idade da Terra

Rutherford, trabalhando com os fenômenos radioativos, constatou que esses processos envolviam a emissão de partículas ou radiações eletromagnéticas e a formação de átomos de outros elementos químicos. Além disso, percebeu que os átomos radioativos desintegram em uma razão constante e que, portanto, poderiam ser utilizados como relógios naturais para calcular a idade absoluta de rochas ou minerais.

Em 1905, Rutherford revolucionou a datação do tempo geológico com a utilização da radioatividade para medir a idade de amostras de rochas. Considerando o decaimento do rádio com liberação de hélio, Rutherford determinou a idade de uma amostra de fergusonita como sendo igual a 500 milhões de anos. A partir de suas descobertas sobre o decaimento radioativo, Rutherford encontrou uma resposta para o enigma da idade da Terra. Em uma reunião da Royal Society, na qual se encontrava ninguém menos que Lord

Kelvin, Rutherford falou sobre o tema e afirmou que a Terra permanecia tépida por ser aquecida por átomos de elementos radioativos, presentes nas rochas e em seu núcleo liquefeito. Disse também que a taxa de decaimento desses átomos comprovava a antiguidade da Terra e fornecia um meio para a datação do tempo geológico. Em uma carta, Rutherford descreveu a apreensão que sofreu naqueles momentos:

Adentrei a sala, que estava na penumbra, e passado pouco tempo avistei Lord Kelvin na audiência e percebi que estaria em apuros na última parte da minha palestra, referente à idade da Terra, pois meus pontos de vista conflitavam com os dele. Para meu alívio, Kelvin rapidamente pegou no sono, mas quando eu cheguei no ponto em questão, pude ver o velho pássaro se ajeitar na cadeira, abrir um olho e engatilhar um olhar sinistro em minha direção!

Então me veio uma súbita inspiração e eu disse: “Lord Kelvin havia limitado a idade da Terra, uma vez que nenhuma nova fonte fora descoberta. Essa declaração profética diz respeito ao que levamos em consideração hoje, o rádio!” Eis que o velho então sorriu-me. (Neuenschwander, 2011)

Relevante é que, embora Rutherford seja reconhecido como um grande físico, uma de suas mais importantes contribuições científicas aconteceu em um campo sobre o qual pouco conhecia: a geologia. A datação radiométrica por ele proposta permitiu tratar numericamente o tempo. Assim, fundou-se uma nova ciência, a geocronologia. O desenvolvimento desta causou modificações na geologia, na paleontologia, na antropologia, na arqueologia e em outras ciências que fazem uso da determinação da idade de diferentes artefatos.

É difícil avaliar os impactos dessa datação nos conceitos geológicos, pois ela não somente aprimorou o conhecimento sobre a idade da Terra, mas também tornou possível datar amostras de rochas da Lua, fragmentos de meteoritos, fósseis e outros artefatos. A datação radiométrica também abriu possibilidades para se determinar com rigor quantitativo as taxas de processos atuantes no passado geológico (Carneiro et al., 2005).

Desenvolvimento da geocronologia

A geocronologia surgiu e teve uma rápida evolução após a descoberta da radioatividade e os resultados de datação de Rutherford. Os espectrômetros de massa, desenvolvidos por Francis Aston (1877-1945) e Arthur Dempster (1886-1950) e aperfeiçoados por Alfred Nier (1911-1994) na década de 1940, tiveram um papel fundamental no desenvolvimento dessa ciência. Análises mais precisas dos diversos núclídeos até então conhecidos permitiram o desenvolvimento de novos métodos radiométricos, fazendo com que os espectrômetros de massa se consolidassem como instrumentos essenciais para a geocronologia, assim como são os telescópios para a astronomia (Gerald, 2010).

O princípio básico da datação radiométrica reside no fato de os átomos radioativos desintegrarem a taxas constantes, que são comumente expressas em termos de meia-vida, ou seja, o tempo necessário para que metade dos núcleos radioativos se desintegre. A definição de pares isótopos para a aplicação em geocronologia depende fundamentalmente dos aspectos da compatibilidade da meia vida, do período de tempo do processo geológico a ser estudado e da existência dos isótopos de interesse em concentrações mensuráveis em rochas ou minerais. A Tabela 2 apresenta as principais séries radioativas utilizadas na geocronologia.

Neste trabalho, optamos por focar a série radioativa U-Pb, pois, além de ter sido a primeira utilizada para a datação da idade da Terra, constitui como um dos principais métodos radiométricos para datação de rochas.

Há dois núclídeos do urânio – ^{235}U e ^{238}U – que decaem

Tabela 2: Tempo de meia vida de algumas séries radioativas.

Série radioativa	Meia-vida/anos
$^{40}\text{K} - ^{40}\text{Ar}$	$1,25 \times 10^9$
$^{87}\text{Rb} - ^{87}\text{Sr}$	$48,8 \times 10^9$
$^{147}\text{Sm} - ^{143}\text{Nd}$	$106,0 \times 10^9$
$^{176}\text{Lu} - ^{176}\text{Hf}$	$35,0 \times 10^9$
$^{187}\text{Re} - ^{187}\text{Os}$	$43,0 \times 10^9$
$^{238}\text{U} - ^{206}\text{Pb}$	$0,704 \times 10^9$
$^{235}\text{U} - ^{207}\text{Pb}$	$4,47 \times 10^9$

Fonte: Gerald (2010).

gerando, respectivamente, os núclídeos ^{207}Pb e ^{206}Pb . Considerando que um átomo de ^{238}U dê origem a um átomo de ^{206}Pb , a relação $[\text{Pb}]/[\text{U}]$ variará com o tempo conforme a Tabela 3. Igualmente vale para a razão $[\text{Pb}]/[\text{U}]$. A razão $[\text{Pb}]/[\text{U}]$ permite obter o número de meias-vidas e, conseqüentemente, a idade da rocha ou mineral, já que o valor de meia-vida do ^{238}U é conhecido.

Tabela 3: Relação entre a quantidade de átomos de Pb e U pelo tempo de meia vida.

Número de meias-vidas	Número de átomos de ^{238}U	Número de átomos de ^{206}Pb	Pb/U
0	64	0	0
1	32	32	1
2	16	48	3
3	8	56	7

O problema desse raciocínio é que, na maioria das amostras geológicas, a concentração inicial de ^{206}Pb não é igual a zero. Isso porque, nos minerais, os átomos de ^{206}Pb podem ter duas origens: átomos originados do decaimento do ^{238}U (denominados chumbo radiogênico) e átomos que já estavam presentes no mineral (denominados chumbo não radiogênico ou chumbo comum).

Se não for possível determinar quanto há de chumbo radiogênico e de chumbo não radiogênico (já que constituem o mesmo núclídeo), a razão $[\text{Pb}]/[\text{U}]$ não refletirá a idade real do mineral. Portanto, a determinação prévia da composição inicial de chumbo em uma amostra é fundamental para obter sua idade. Essa determinação constituiu como um dos grandes desafios para a datação de rochas e, conseqüentemente, da Terra. Para transpor esses obstáculos, cientistas precisaram desenvolver alternativas e soluções criativas.

Clair Patterson e a determinação da idade da Terra

Para ser possível determinar a composição isotópica de chumbo e, conseqüentemente, a idade da Terra, era necessário obter algum material geológico remanescente dos primórdios do planeta que se encontrasse intacto e inalterado.



Figura 1: Meteorito Canyon Diablo, parte do meteoro que colidiu com Terra e originou a cratera de Berringer (chamada antigamente de Canyon Diablo), no estado do Arizona (EUA), com 1,2 km de diâmetro e profundidade de 170 m. Fonte: www.meteorito.com.br

Além disso, tal material não poderia conter urânio, visto que seu decaimento produz novos isótopos de chumbo e altera a composição inicial da amostra. Aceita essa teoria, a grande questão prática era: onde e como encontrar tal amostra?

Para contornar o problema, Clair Cameron Patterson (1922-1995), um cientista obstinado em calcular a idade da Terra, considerou que nem toda poeira cósmica do sistema solar teria se aglomerado formando planetas. Segundo ele, parte dessa poeira deu origem a meteoros, asteroides e cometas. Dessa forma, por terem se formado da mesma poeira que o planeta Terra e estarem fluando no espaço criogênico desde então, esses objetos poderiam ser considerados pedaços preservados com composições idênticas à Terra primordial.

Patterson analisou amostras de diversos meteoritos, entre eles o *Canyon Diablo*, coletado em Arizona (Figura 1), buscando a razão $[^{206}\text{Pb}]/[^{238}\text{U}]$.

Por não possuir U em sua composição, esse meteorito não teve a razão entre a quantidade de ^{206}Pb e ^{207}Pb alterada pelo decaimento radioativo. Esse requisito fundamental permitiu que o *Canyon Diablo* fosse considerado uma amostra representante da composição isotópica inicial de chumbo da Terra.

Patterson estudou a fundo a questão e propôs a seguinte sequência de ideias:

- inicialmente, as rochas terrestres e os meteoritos deveriam apresentar a mesma proporção dos isótopos Pb^{207} , Pb^{206} e ^{204}Pb ;
- com o passar do tempo, as concentrações de ^{207}Pb e ^{206}Pb alteraram-se pelo decaimento do urânio também presente nos materiais;
- a concentração de ^{204}Pb manteve-se constante por não ser produzido pelo decaimento do U;
- as razões $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ e $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, portanto, aumentam em uma taxa previsível, ou seja, segundo a taxa de decaimento do U;
- conhecendo as razões $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ e $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ atuais nos minerais da Terra – essas razões iniciais no Sistema Solar (representado pela razão do meteorito *Canyon Diablo*) e com base na taxa de meia-vida do urânio –, pode-se calcular a idade da Terra.

Patterson, então partiu da hipótese que se a concentração $[^{206}\text{Pb}]$ das amostras terrestres foi aumentando ao longo dos tempos, devido ao decaimento do ^{238}U , o lançamento em um gráfico desses dados deveria gerar uma função crescente cuja extrapolação deveria passar pela composição inicial (representada pelo *Canyon Diablo*) da rocha. Então, após uma análise minuciosa da composição de Pb e U de suas amostras, os dados obtidos comprovaram sua hipótese, sendo a idade da Terra definida pela interseção entre as duas linhas (Figura 2).

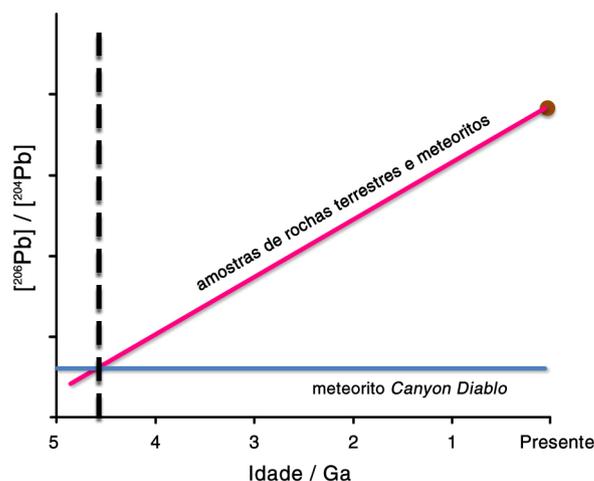


Figura 2: Segundo Patterson, no início do sistema solar, meteoritos e as amostras terrestres apresentavam a mesma razão $[^{206}\text{Pb}]/[^{238}\text{U}]$. Com o decaimento do urânio ao longo do tempo, a razão $[^{206}\text{Pb}]/[^{204}\text{Pb}]$ aumenta. Extrapolando, essa linha se encontra com a do meteorito *Canyon Diablo* que produz uma reta paralela ao eixo, pois não possui U para produzir novos isótopos de Pb.

Assim, utilizando dados de meteoritos com diferentes teores de urânio, que representariam as composições isotópicas de chumbo atuais, e a razão isotópica inicial, estimada a partir do meteorito *Canyon Diablo*, Patterson calculou a idade da Terra. Os resultados desse trabalho foram publicados, em 1956, no artigo *Age of meteorites and the Earth*, em que apresenta o perfeito alinhamento dos dados das amostras

de meteoritos e da Terra e o valor da composição isotópica inicial de chumbo. Com esses dados, estimou a idade da Terra como sendo igual a $4,55 \pm 0,07$ bilhões de anos. Atualmente, considera-se $4,55 \pm 0,02$ bilhões de anos.

Poucos cientistas combinaram seus interesses nas ciências básicas com a sua paixão pelo bem-estar social, a excelência moral e a justiça social, da mesma forma como Clair Patterson. Um exemplo dessa combinação foi sua luta pelo não uso do chumbo tetraetila – $Pb(Et)_4$ – como aditivo para aumentar a octanagem da gasolina, visto que resíduos de chumbo eram encontrados nas mais diferentes amostras de materiais naturais de sua época.

Ao estabelecer a idade da Terra e determinar de vez a dimensão do tempo geológico, dando ao homem a percepção de sua pequenez, o trabalho de Patterson impactou não somente em ciências básicas, como a Química e a Geologia, mas também em vários outros campos do saber, tais como a Arqueologia, a Cosmologia e as Ciências Ambientais.

Zircões são para sempre

Após o estabelecimento da idade da Terra por Patterson e o rápido desenvolvimento da geocronologia, iniciou-se uma corrida entre cientistas na busca de rochas cada vez mais antigas.

Até então, as rochas mais antigas conhecidas, com 4,03 bilhões de anos, eram encontradas nos territórios do noroeste do Canadá. Posteriormente, em Jack Hills, uma cadeia de montanhas no oeste da Austrália, foram encontrados minerais de zircão ($ZrSiO_4$) com até 4,4 bilhões de anos que, apesar de não configurarem como rochas completas, são considerados os materiais mais antigos da Terra.

A datação utilizando a série radioativa U-Pb em minerais de zircão é comumente chamada de Método U-Pb em zircão e constitui uma das principais técnicas de datação. A utilização desse mineral é justificada pela simplificação do problema da composição inicial de chumbo comum. Como discutido anteriormente, a composição de chumbo comum de um mineral não pode ser determinada, mas no caso do zircão, essa quantidade inicial é considerada nula. Isso se deve ao fato de os íons Pb^{+2} possuírem um raio iônico relativamente grande (0,132 nm) que inviabiliza sua incorporação à estrutura cristalina do zircão quando este se forma. Ao contrário, os íons U^{+4} possuem um raio iônico pequeno (0,105 nm), próximo aos íons Zr^{+4} (0,087 nm), que permite sua incorporação à estrutura do mineral. Logo, todos os átomos de Pb presentes no zircão são radiogênicos, ou seja, resultantes do decaimento do U. Dessa maneira, como a quantidade inicial de Pb comum é nula, para encontrar a idade do mineral, basta medir a razão Pb/U e considerar o tempo de meia-vida do U, como exemplificado na Tabela 3.

Além disso, o zircão apresenta outras vantagens: ocorre em diversos tipos de rochas e possui alta resistência, mantendo-se preservado ao longo do tempo. Por isso, no meio geocronológico costuma-se atribuir o mesmo dito popular imputado ao diamante: Zircões são para sempre (Figura 3).

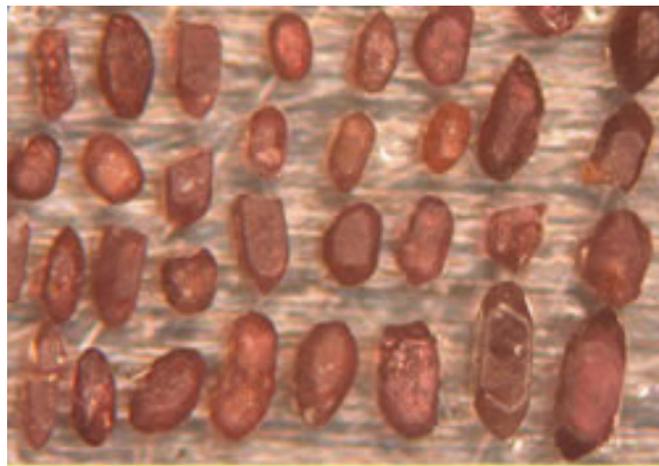


Figura 3: Minerais de Zircão de Jack Hills. Fonte: serc.carleton.edu

A escala do tempo geológico: contando a história da Terra

Informações geológicas de diversas regiões do mundo foram sendo acumuladas durante os séculos XIX e XX e permitiram a construção de um calendário de idades relativas da história geológica da Terra, denominada escala do tempo geológico.

No entanto, o ajuste das subdivisões dessa história, em termos de milhões de anos (Ma), só foi possível a partir do desenvolvimento de métodos radiométricos, ocorrido no século XX. Nessa escala, cada intervalo de tempo está correlacionado a um pacote de rochas e respectivos fósseis. Embora a escala do tempo geológico ainda esteja sendo refinada, suas principais divisões permaneceram inalteradas no século passado. Para desenhar o tempo geológico, cientistas optaram por representar eventos bem caracterizados da história da Terra. Esses eventos estão organizados em graus hierárquicos cada vez menores da seguinte forma, em ordem de diminuição:

- **éon** – é a maior divisão da história e significa um intervalo de tempo muito grande;
- **era** – é caracterizada pelo modo como os continentes e os oceanos se distribuíaam e como os seres vivos nela se encontravam;
- **período** – é uma subdivisão da era na escala do tempo geológico;
- **época** – é um intervalo menor dentro de um período e, portanto, a menor divisão do tempo geológico. Ela tem duração máxima de 6 milhões de anos, podendo ter menos de 1 milhão.

A história da terra está dividida em quatro éons: Hadeano, Arqueano (antigo em grego), Proterozoico (vida precoce) e Fanerozoico (vida saudável).

Esses éons podem ser representados conforme o esquema da Figura 4.

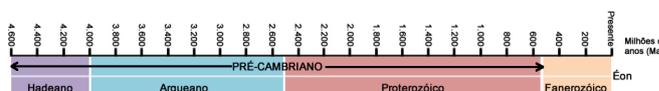


Figura 4: Divisão do tempo geológico em éons.

no mesmo momento em que as montanhas Rochosas da América do Norte começaram a se elevar. Entre os dias 29 e 31 de dezembro, ocorre a expansão dos mamíferos de grande porte e surgem os hominídeos primitivos. O *Homo sapiens* surge no dia 31 de dezembro, às 23h36min51s. O Império Romano governa o mundo durante 5 segundos, das 23h59min45s até 23h59min50s. Colombo descobre a América (1492) 3 segundos antes da meia noite e a geologia nasce com as escritas de James Hutton (1795), pai da geologia moderna, há pouco mais que 1 segundo antes do final desse movimentado ano dos anos.

Percebe-se, nessa escala, que a história da humanidade não passa de ínfimo intervalo de tempo quando comparada a toda história do planeta Terra. Apesar disso, nossa espécie, surgida no badalar da meia noite, tem a capacidade e está mudando a estrutura do espaço geográfico como nenhum ser vivo fez antes. O que isso pode representar para o planeta e para a humanidade? Cientistas já vêm debatendo se o *Homo sapiens* merece uma época geológica só para si, o Antropoceno – a idade recente do homem. Apesar de polêmico, existe um consenso que o homem deve refletir sobre sua interação com o planeta e avaliar as consequências de suas ações no contexto do tempo profundo da história da Terra.

Considerações finais

A ideia de Rutherford de utilizar átomos radioativos como marcadores de relógios naturais foi capaz de responder aos grandes questionamentos de físicos, geólogos e biólogos acerca da magnitude do tempo. Mais do que simplesmente datar as rochas, o desenvolvimento dos métodos de radio-métricos promoveu uma evolução no modo de pensar o tempo, o nosso planeta e, inclusive, nós mesmos. O homem descobriu que a Terra é muito mais antiga do que se poderia ter imaginado e que os humanos ocupam apenas o último instante da longa história do nosso planeta. A radioatividade permitiu, enfim, revelar a verdadeira dimensão do tempo geológico, como também construir de forma mais precisa a escala do tempo geológico, a qual constitui uma das mais revolucionárias e impressionantes ideias científicas. Essa ideia foi debatida arduamente por muito tempo, mas atualmente é aceita de forma mais consensual no meio científico.

Daniel Ferreira Araújo (danielunb.ferreira@gmail.com), bacharel e licenciado em Química, mestre em Geologia, é doutorando em Geoquímica pela UnB. Brasília, DF – BR. **Gerson de Souza Mól** (gmol@unb.br), bacharel e licenciado em Química pela UFV, mestre em Química Analítica pela UFMG e doutor em Ensino de Química pela UnB, é orientador do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e docente do Instituto de Química da UnB. Brasília, DF – BR.

Referências

BRUSH, S.G. *Transmuted past: the age of the Earth and the evolution of the elements from Lyell to Patterson*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

CARNEIRO, C.D.R.; TOLEDO, M.C.M.; ALMEIDA, F.F.M. A determinação da idade das rochas. *Terrae Didática*, v. 1, n. 6, p. 35, 2005. Disponível em <<http://www.ige.unicamp.br/terrae-didatica/>> Acesso em: 26 nov. 2012.

_____. Dez motivos para a inclusão de temas de geologia na educação básica. *Revista Brasileira Geociências*, v. 34, n. 4, p. 553-560, 2004.

TEIXEIRA, W. et al. *Decifrando a Terra*. 2. ed. São Paulo: Companhia Nacional, 2009.

GERALDES, M.C. *Introdução à geocronologia*. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geociências, 2010.

MAZING, C.P. *O tempo geológico*. Disponível em: <<http://www.geoturismobrasil.com/REVISTA%20ARTIGOS/o%20tempo%20geol%C3%B3gico%20-%20Manzig.pdf>>. Acesso em: 26 nov. 2012.

MOSLEY, M.; LYNCH, J. *Uma história da ciência*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2010.

NEUENSCHWANDER, D.E. Elegant connections in physics: the discovery of the nucleus. *Radiations*, 2011.

PATTERSON, C. Age of meteorites and the Earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1956, v. 10, p. 230-237.

PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T.H. *Para entender a Terra*. Porto Alegre: Bookman, 2006.

WILDE, S.A. et al. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 years ago. *Nature*, 409 (6817): 175-178, 2001.

Para saber mais

RAFFERTY, J.P. (Ed). *The beginning of the world as we know it: geochronology, dating and precambrian time*. London: Britannica, 2011.

DICKIN, A.P. *Radiogenic isotope geology*. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

Abstract: *The radiochemistry and the age of the earth.* The determination of the age of the Earth is an issue that involves knowledge of Radiochemistry and that was cause for great debates until they reached a consensus. This work presents different views on this subject, starting with ideas related to religion in the Middle Ages, through the changes in the design of geological time during the Scientific Revolution until the development of radioactive dating in the twentieth century. It emphasizes the various scientific controversies emerged in the nineteenth century, about the age of the Earth, notably between Charles Darwin and Lord Kelvin. Then, it is shown how Rutherford succeeded, using radioactivity, to accomplish the first dating of a mineral and bright Clair Patterson proposed to determine the Earth's age at 4.5 billion years, the accepted value until today. Finally, we present a geologic time scale, as well as an invitation to reflect on the magnitude of the time our planet.

Keywords: Radioactivity; Isotopic Datation; Radioactive Decay