

O Ciclo das Rochas na Natureza*

Celso Dal Ré Carneiro

Instituto de Geociências (Unicamp), Depto. de
Geociências Aplicadas ao Ensino
cedrec@ige.unicamp.br

Pedro Wagner Gonçalves

Instituto de Geociências (Unicamp), Depto. de
Geociências Aplicadas ao Ensino
pedrog@ige.unicamp.br

Osvaldo R. Lopes

Centro Universitário Moura Lacerda, Ribeirão Preto
(SP). Mestre em Ensino e História de Ciências da Terra.
geodeko@hotmail.com

ABSTRACT *THE ROCK CYCLE IN NATURE. Cyclical changes occur permanently on Earth, a dynamic planet where slow or fast changes affect all the materials from the surface to the core. Even rocks can not be considered eternal, because they are affected by varying degrees of recycling, as well as minerals and every object else found on Earth. The time scales of the changes are extremely variable, they can be extremely fast or extremely slow. The Rock Cycle belongs to the Tectonic Plates model; it is a complex network of processes, which control changes in the mineral kingdom. This article seeks to expose some fundamental aspects of this intricate chain of interactions, as the processes, the products and the natural environments where they occur. It is given attention to the fact that they take part of other natural cycles, and thus interfere in human life, too.*

KEYWORDS Geology, Geosciences, teaching-learning, rock cycle, Geosciences teaching.

RESUMO *Mudanças cíclicas acontecem permanentemente na Terra, um planeta dinâmico onde os materiais, tanto da superfície como do interior, passam por transformações, lentas ou rápidas. Nem mesmo as rochas podem ser consideradas eternas, porque são afetadas por diversos graus de reciclagem, assim como todos os minerais que as constituem e os demais objetos encontrados na Terra. As escalas de tempo das mudanças são extremamente variáveis. O Ciclo das Rochas é uma teia complexa de transformações da matéria, desde muito rápidas até extremamente lentas, que, em conjunto, no contexto da Tectônica de Placas, determinam modificações no reino mineral. Buscando auxiliar o aprendizado de grande parte da Geologia, abordam-se os processos e produtos do ciclo e os ambientes naturais em que ocorrem. Tais transformações participam dos demais ciclos naturais e, evidentemente, interferem na vida humana.*

*Este artigo deve ser referido como segue:

Carneiro C. D. R., Gonçalves P. W., Lopes O. R. 2009. O Ciclo das Rochas na Natureza. *Terræ Didática*, 5(1):50-62 <<http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/>>

PALAVRAS-CHAVE Geologia, Geociências, ensino-aprendizagem, Ciclo das Rochas, ensino de Geociências.

A Terra é azul... e muito ativa

A Terra é azul!

A exclamação acima é do cosmonauta soviético Yuri A. Gagarin durante o primeiro voo tripulado em órbita da Terra. Ele foi a primeira pessoa a ver o planeta do espaço. Hoje, o convívio é natural com as inúmeras imagens diárias produzidas por satélites, que nos apresentam detalhes cada vez mais impressionantes e magníficos. Poucas vezes percebemos o significado dessa observação feita pela primeira vez há pouco mais de 40 anos. Que mudança ocorreu quando o homem pôde ver a Terra toda?

Foi uma mudança radical de perspectiva.

Até então, o homem somente observara a Terra a partir do chão, do alto de montanhas ou, na melhor hipótese, em aviões. São alternativas, sem dúvida, muito distantes da escala de observação feita por Gagarin. Passou-se do acesso a observações fragmentadas de aspectos físicos do planeta, como cordilheiras de montanhas ou deltas de grandes rios, como Amazonas e Mississipi, para a visão de conjunto dos componentes de um complexo e integrado sistema. Os modernos aparatos de observação permitiram concluir que as esferas materiais da Terra participam, em graus variáveis, de múltiplas interações, que envolvem a atmosfera, hidrosfera, geosfera (crosta, manto e núcleo) e biosfera. O sistema evolui em conjunto no decorrer de uma história muito longa, o Tempo Geológico, que possui 4,5 bilhões de anos. Nos últimos milhares de anos, um novo personagem, muito ativo, veio se somar aos participantes da evolução do planeta: a esfera humana ou social.

A imagem de um planeta composto por terras emersas (continentes) separadas por oceanos e mares tornou-se insuficiente para interpretar a realidade, de modo que devemos, hoje, “olhar” a Terra como um sistema integrado. Análises baseadas na longa história geológica do planeta tornaram-se imprescindíveis para entender a complexidade e as interações dos processos naturais e humanos e antever suas possíveis consequências. O Ciclo das Rochas faz parte desse contexto dinâmico cujo estudo permite até mesmo fazer previsões de acontecimentos futuros com a agricultura, o solo, o clima, os oceanos, e a disponibilidade de recursos minerais.

Esferas terrestres

Para compreender melhor o que acontece no Ciclo das Rochas em nosso planeta, separamos os materiais terrestres e os processos típicos que os afetam em grandes domínios, chamados de esferas terrestres. Diferentes autores oferecem distintas classificações mas, em linhas gerais, existe certa congruência na grande maioria delas. A diferença é às vezes baseada em algum interesse particular de um dado campo científico especializado. O ponto comum é que as definições partem do pressuposto de que a Terra é um todo unificado: o que acontece em uma esfera interfere em todas as demais. Embora o Ciclo das Rochas pertença ao contexto da Tectônica de Placas, para facilidade de abordagem, faremos aqui um tratamento em separado, para enfatizar a atuação de processos, na interação entre as várias esferas terrestres:

Atmosfera: engloba os gases que compõem os materiais terrestres. Dentre os processos que acontecem na atmosfera, destaca-se a função de distribuir a energia solar e a umidade em toda a superfície.

Hidrosfera: envolve toda a água do planeta e os fenômenos relacionados à circulação desse fluido pelos continentes e oceanos, tanto na forma líquida quanto gasosa (vapor) ou sólida. Neste caso costuma-se usar o nome criosfera para a esfera congelada.

Geosfera: é o nome dado a toda a parte sólida da Terra, formada por camadas de distinta composição material, como a crosta, o manto e o núcleo, ou camadas cujo comportamento mecânico obedece a certos padrões, como a litosfera e a astenosfera. Na geosfera é possível encontrar registros das principais mudanças ambientais que ocorreram e ocorrem na Terra (Fig.1).

Crosta: é a camada externa da geosfera cuja composição a distingue do manto e núcleo, mas seu comportamento mecânico permite considerá-la parte da litosfera.

Litosfera: é o envoltório sólido rochoso externo do planeta. Inclui a crosta (continental e oceânica) e a parte mais externa do manto superior. Os processos e transformações na litosfera ocorrem lentamente, permitindo que funcione como um campo transitório, geologicamente falando, onde interagem os fenômenos da superfície e do interior do planeta.

Manto e núcleo: são as esferas rochosas in-

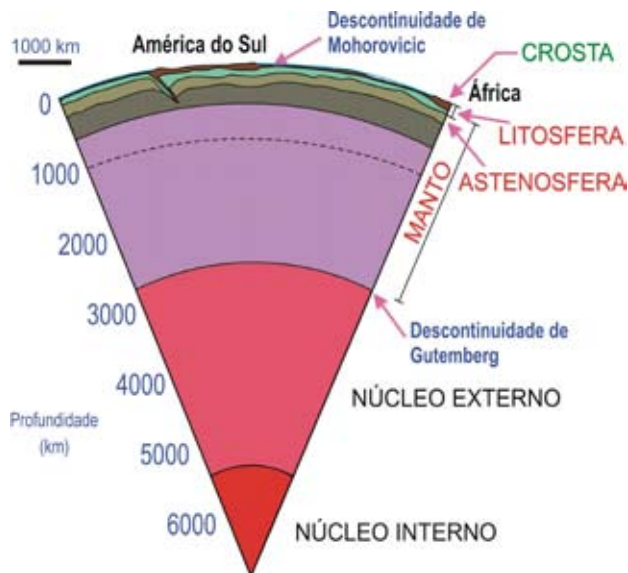


Figura 1 – Estrutura interna da Terra, com indicação das camadas crosta, manto e núcleo (externo e interno). Observar que a crosta distingue-se do manto; a parte mais externa deste, em conjunto com a crosta, compõe a litosfera

ternas. Embora sejam inacessíveis à observação direta pelo homem, sabe-se que são responsáveis por muitos fenômenos observados na superfície, como o magnetismo terrestre ou a contínua emissão de calor, desde o interior quente.

Biosfera: compreende todos os organismos vivos, dos reinos animal, vegetal, protista, bactéria e fungi. Podemos subdividir a matéria viva, devido às formas peculiares de organização material, em dois grandes domínios – a biosfera e a esfera social –, que se mantêm intimamente relacionadas.

Antroposfera ou noosfera: a esfera social é formada pelas sociedades humanas e os processos superficiais que promovem. A ideia de interação no âmbito de Sistema Terra exige abordar a noosfera integrada com as demais esferas, de modo a se visualizar a Terra como resultado de mútuas interações. Enquanto a biosfera se transforma mediante mecanismos explicados pela teoria da evolução, a esfera social – da qual fazemos parte – modifica-se sobretudo por meio de instrumentos culturais e que podem ser explicados pela economia, política e formas de organização social.

Uma história de mudanças geológicas e ambientais

A Terra, ao contrário do que muitos pensaram antes do advento da Geologia, é um planeta geologicamente ativo e em constante transformação; trocas de matéria e energia mudam os limites entre as esferas terrestres, sua composição e suas características. A moderna Tectônica Global busca analisar o comportamento dinâmico da Terra em conjunto com processos inter-relacionados, como o magmatismo e o vulcanismo, a sedimentação, o metamorfismo, os abalos sísmicos (terremotos) e a formação de recursos minerais. Os limites dos continentes modificam-se em dezenas de milhões de anos, e as placas se movimentam gradualmente, movidas pelo calor interno. Em paralelo, os agentes externos, movidos pela força da gravidade e pelo calor do Sol, reduzem a amplitude do relevo à medida que mecanismos climáticos causam transformações mecânicas e químicas, traduzidas nos processos de intemperismo, que formam novos minerais e desagregam rochas, e de erosão e sedimentação, que esculpem e moldam novas formas de relevo.

Os processos que fazem parte do Ciclo das Rochas são interconectados. Materiais deslocados, como as rochas, os sedimentos e os solos, são os *produtos* do ciclo. Cada etapa cumprida pode significar o ponto de partida de outra. O conjunto, inesgotável, faz parte de outros ciclos ainda mais vastos, como o ciclo de formação e evolução de continentes e montanhas. Uma maneira talvez mais eficaz de propor uma subdivisão didática que facilite o entendimento do ciclo é precisamente a ideia de *processos e produtos*.

A história do desenvolvimento da moderna Geologia pode ser iluminada pelas conclusões do naturalista britânico James Hutton (1726-1797). Ele desenvolveu um modo peculiar de reconhecer, sistematizar e interpretar muitas marcas deixadas por acontecimentos passados, registrados em rochas e outros materiais. Para alguns de seus contemporâneos, ele fora capaz de “conversar com as rochas”.

Hutton observou muitos vestígios marinhos espalhados pelos planaltos escoceses. Na época, essas marcas eram explicadas por significativo rebaixamento do nível do mar. Neste momento ele se perguntou: para onde teria ido tanta água? Como não obteve resposta, supôs que o continente tivesse sido levantado e os depósitos acumulados

muito tempo atrás no fundo mar foram soerguidos centenas de metros acima de onde teriam sido formados. Fôra igualmente mais atento do que seus contemporâneos em valorizar a erosão e os mecanismos de rebaixamento do relevo, que seriam responsáveis pela acumulação de materiais no fundo dos oceanos, ao lado dos continentes para, longo tempo depois, serem empurrados para cima e formar novos continentes. Seu engenhoso esquema cíclico de destruição e construção de continentes foi a pedra de toque explorada até hoje em modelos muito mais complexos e detalhados. Na época, Hutton não podia responder a uma pergunta-chave: quais seriam os mecanismos que movem o ciclo de destruição e construção de rochas e continentes? Hoje, supomos que a Tectônica de Placas organiza uma sequência satisfatória de muitos eventos particulares que ocorrem em diferentes escalas de tempo e de espaço.

James Hutton encontrou um modo seguro de identificar ciclos e processos na longa história geológica do nosso planeta: determinadas feições geológicas oferecem as “pistas” necessárias para o reconhecimento de fenômenos e contar uma história do que aconteceu de modo similar ao que fazem historiadores diante de medalhas, moedas, urnas funerárias, etc., para relatar a história da Antiguidade.

Hutton concebeu uma resposta bastante original, envolvendo o calor interno da Terra que seria capaz de levantar continentes e consolidar as rochas, as quais, por sua vez, formariam novos solos e novas superfícies, sujeitas a intemperismo e erosão. Os detritos por sua vez seriam recarregados para o fundo dos oceanos, onde se transformariam em novas rochas. Ao desenvolver a ideia de *machina mundi*, James Hutton percebeu, por exemplo, que muitas mudanças na Terra são imperceptíveis para nós, porque ocorrem de modo muito lento: cálculos aproximados do volume de sedimentos transportados pelos rios para o fundo dos oceanos indicam quantidades imensas, mas só foram feitos no século XX. No assoalho marinho os detritos são acumulados e compactados para se transformar mais tarde em rochas consolidadas. Muitas coisas estão se modificando: os minerais das rochas estão se renovando; solos são levados pela erosão, transformando-se em sedimentos, e outros estão se formando. No ciclo da natureza a água removeria materiais para o fundo do mar e o calor levantaria novos continentes para ocupar o lugar daqueles que

foram desgastados. Uma boa ideia, cuja veracidade precisaria ser provada...

Quando Hutton visitou o vale do rio Jed, em 1787, na Escócia, observou uma sequência de rochas cujas camadas não estavam depositadas horizontalmente e umas em cima das outras, como era comum. Não eram sequer paralelas entre si, porque exibiam uma descontinuidade (termo usado mais tarde, depois da morte de Hutton). Na falta de uma explicação adequada, Hutton expôs uma ideia bastante original: as camadas inferiores, depositadas no fundo do mar, foram com o tempo compactadas, dobradas e elevadas; com a fragmentação e erosão, as bordas verticais foram expostas e a ação contínua do processo retirou e transportou muito material; o nível topográfico dessas camadas rochosas foi ficando cada vez mais baixo até que novos sedimentos devem ter sido depositados e consolidados, sem serem dobrados. Por fim, deve ter havido uma segunda elevação do lugar.

Hutton concluiu que no vale do rio Jed (Fig. 2) há provas de que os processos naturais se repetem em ciclos, ao longo de muito tempo. A região fôra o fundo de um oceano onde se acumularam sedimentos, posteriormente deformados no interior da Terra. A elevação, desgaste e erosão das rochas formou gradativamente um novo local de deposição de sedimentos. As mudanças no ambiente percebidas por Hutton fazem parte de uma cadeia cíclica de eventos cuja duração é da ordem de centenas de milhões de anos. Hutton comprovou transformações do passado do planeta mediante a leitura das marcas impressas nas rochas. Foi como se tivesse descoberto uma “máquina do tempo” para o passado longínquo da história da Terra, dando um passo importante para desvendar processos relacionados às forças internas da Terra. Apenas no século XIX as ideias de Hutton foram popularizadas, quando o escocês Charles Lyell (1797-1875) publicou o livro *Principles of Geology* em 1830.

O reconhecimento de vários ciclos de destruição e construção de continentes, em um mesmo local, indicavam que o tempo da natureza era muito longo. Muitos contemporâneos acreditavam que a história da Terra possuía poucos milhares de anos. Isso era absolutamente incoerente com as descobertas de Hutton. Lyell avançou os estudos de Hutton e detalhou algo que havia sido desconsiderado: o conteúdo de fósseis presentes nas camadas terrestres (as marcas de seres vivos do passado que ficaram registradas nas rochas).

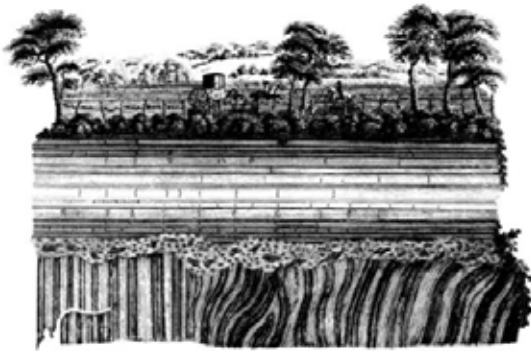


Figura 2 – Representação artística da discordância observada por Hutton no vale do rio Jed, perto de Edimburgo (Fonte URL: <http://www.dukelabs.com/Abstracts and Papers/1CManual0209.htm>)

A sequência faunística conhecida no final do século XVIII revelava a existência de animais pré-territos muito diferentes dos atuais. Os seres vivos acham-se classificados segundo suas características e por meio de semelhanças e diferenças com outros seres vivos; todos aqueles animais não poderiam pertencer a um único quadro taxionômico. Isso indicava a necessidade de terem existido em épocas diferentes. Em um só tempo, as camadas rochosas poderiam ser reconhecidas e organizadas e o tempo precisava necessariamente ser muito mais longo do que se imaginava, o tempo da Terra deveria ter milhões de anos.

O famoso livro de Charles Lyell trouxe abundante informação sobre os fósseis e permitiu ordenar de forma convincente o Tempo Geológico em eras. Isso foi decisivo para popularizar entre os naturalistas a ideia de que a história da Terra era muito longa – como Hutton imaginara.

A evolução vertiginosa do conhecimento geológico desde os tempos de Hutton e Lyell, nesses pouco mais de duzentos anos, permitiu a construção de uma teoria mais geral sobre a dinâmica da Terra, denominada Tectônica Global. Desde o reconhecimento, nos anos 1960, de que a superfície da Terra acha-se dividida em placas litosféricas que se movimentam segundo certos padrões (ver “O movimento das Terras” em *Ciência Hoje* número 30). No Brasil, existem muitas comprovações desses movimentos (Ver “O Sertão Já Virou Mar” em *Ciência Hoje* número 122, “Vulcões no Brasil” em *Ciência Hoje* número 62 e “Participação do Brasil na grande revolução das Geociências”, em *Terrae Didatica*, volume 1).

A Tectônica Global oferece visão integradora

do comportamento dinâmico do planeta, reunindo em suas explanações o conjunto dos processos de magmatismo, sedimentação, metamorfismo e de deformação de rochas no interior da crosta, que são os principais causadores das atividades sísmicas e terremotos...

A paisagem da Terra muda ao longo de centenas, milhares ou milhões de anos. Além de não observarmos diretamente os processos, pode ser que a semelhança entre a nova paisagem e a anterior dificulte a comparação, fazendo-nos pensar que nada mudou.

A primeira dificuldade decorre das diferenças entre as escalas dos fenômenos e de observação feita pelo homem. Cuidemos, pois, das escalas de tempo dos processos naturais.

Tempo Geológico

A mensuração do Tempo Geológico era um grande problema que opôs Hutton a seus contemporâneos, ao longo de um debate que se estendeu pelo século XIX. Hutton e sucessores propuseram que a Terra devesse ser mais antiga do que se imaginava, mas não havia um método seguro para avaliar quanto tempo seria esse. Mesmo o conhecimento das mudanças na vida, observadas por meio dos fósseis, não trazia informes quantitativos sobre a formação das camadas. Somente a descoberta da radioatividade no final do século XIX e sua aplicação para avaliar a idade das rochas forneceu indícios de quanto dura cada era geológica.

Para compreendermos a dinâmica do planeta, a concepção de Tempo Geológico é essencial, pois a duração do conjunto de processos e fenômenos terrestres exerce papel decisivo nos ciclos de transformação do Sistema Terra. Qualquer feição geológica ou rocha representa uma série de eventos naturais que estão situados em um intervalo de tempo específico da história geológica da Terra. Para facilitar nosso estudo, utilizaremos uma classificação simplificada em ciclos e processos, que permite que esses eventos sejam comparados conforme as sequências de intervalos de tempo (Costa e Inda 1992). A classificação é arbitrária e artificial, porque um processo que aparece em uma categoria pode estar necessariamente incluído na outra. Processos e ciclos interagem uns com os outros de modo complexo. Por outro lado, a classificação tem a vantagem de revelar processos que observamos

diretamente ou temos notícia pelos jornais e canais de TV daqueles difíceis de reconhecer. De fato, os processos e ciclos mais lentos são identificados somente por meio de evidências indiretas, já vez que não temos acesso à observação direta da longa cadeia de fenômenos envolvidos.

Ciclos de duração extremamente longa, medidos em dezenas de milhões a bilhões de anos passados. Processos evolutivos da crosta, manto e núcleo da Terra; formação de continentes, ilhas e áreas oceânicas; deriva continental; formação de cadeias montanhosas devido a colisões entre placas; erosão e aplainamento das cadeias de montanhas; transgressões e regressões em escala continental; fases orogenéticas (formação de montanhas ou terras emersas) e metalogenéticas (formação de recursos minerais); surgimento da vida e criação da atmosfera, estratosfera etc.; evolução das espécies etc.

Ciclos de duração longa, medidos em várias dezenas, em centenas de milhares até alguns milhões de anos. Ciclos climáticos globais de longa duração; oscilações climáticas entre eras glaciais e interglaciais no sistema terrestre; desenvolvimento de solos muito espessos; variações no sistema de correntes oceânicas profundas; intemperismo químico extensivo; evolução das espécies; mudança no sentido de movimento das placas tectônicas; flutuações eustáticas (do nível do mar em relação às terras emersas) com amplitudes acima de 100 m; variações de excentricidade da órbita da Terra; inversão do campo magnético.

Processos de duração média, medidos em séculos a poucos milhares de anos. Variações climáticas globais; formação de planícies de inundação; variações da linha de costa; assoreamento de lagos; formação de solos de 0,5 a 2,0 m de espessura; precessão e variações na inclinação do eixo da Terra; depósitos tecnogênicos (lixo, esgotos, efluentes industriais e rejeitos em geral, etc.) e modificações do meio ambiente pela esfera antrópica.

Processos de duração curta, medidos em ano, vários anos e décadas. Formação da camada de húmus do solo; variações climáticas sazonais; variação da calota polar; crescimento anual dos animais e vegetais; depósitos tecnogênicos e modificações do meio ambiente pelo homem (poluição do ar e das águas superficiais e subterrâneas); subsidências.

Processos de duração muito curta, medidos em meios-dias, dias e semanas. Ciclo das marés e depósitos correlatos; variação diurna de temperatura devido à rotação da Terra; tempestades

e inundações com depósitos de inunditos [sedimentos ligados a inundações] e escorregamentos; cataclismas vulcânicos e depósitos de tufos e piroclastos inconsolidados; depósitos tecnogênicos e modificações do meio ambiente pela esfera antrópica (incêndios, desmatamentos, poluição do ar e águas superficiais etc.).

Períodos excessivamente curtos, medidos em segundos, minutos e horas. Tempestades e furacões, terremotos e tsunamis; correntes de turbidez; cataclismas vulcânicos; deslizamentos e avalanches; impacto de meteoritos; catástrofes em geral; depósitos tecnogênicos e modificações do meio ambiente pela esfera antrópica (incêndios, poluição sonora etc.).

Modelo esquemático

O Ciclo das Rochas (Fig. 3) constitui um modo sintético de representar as inúmeras possibilidades pelas quais, ao longo do Tempo Geológico, um tipo de rocha pode transformar-se em outro. Podemos considerá-lo um conjunto de *processos* permanentes de reciclagem, uma vez que a quantidade de matéria do planeta é a mesma há milhões de anos. Pensemos em alguns átomos de carbono: em milhões de anos, eles já podem ter feito parte de vários ciclos (do ar, da água, das rochas, dos seres vivos). Seguindo esse raciocínio, podemos imaginar que os próprios átomos que compõem o nosso corpo já foram muitas outras coisas, inclusive estrelas e rochas.

Na figura 4 o esquema foi simplificado por Lopes (2007), a partir da figura 3, para elaboração de um jogo didático. A estrutura do jogo (Lopes e Carneiro 2009) permite dois níveis de dificuldade, sendo direcionado para alunos de ensino superior em disciplinas de Geologia Introdutória. Na resolução do problema, os participantes competem entre si, em grupos pequenos. O problema prático a ser resolvido pelos jogadores é construir o modelo do Ciclo das Rochas, pelo gradual preenchimento do diagrama. O jogo envolve os seguintes elementos: tabuleiro, cartas geológicas, cartas-dicas e um dado comum de seis faces.

Reciclagem permanente

As rochas são uma espécie de memória inanimada do planeta, porque guardam registros das

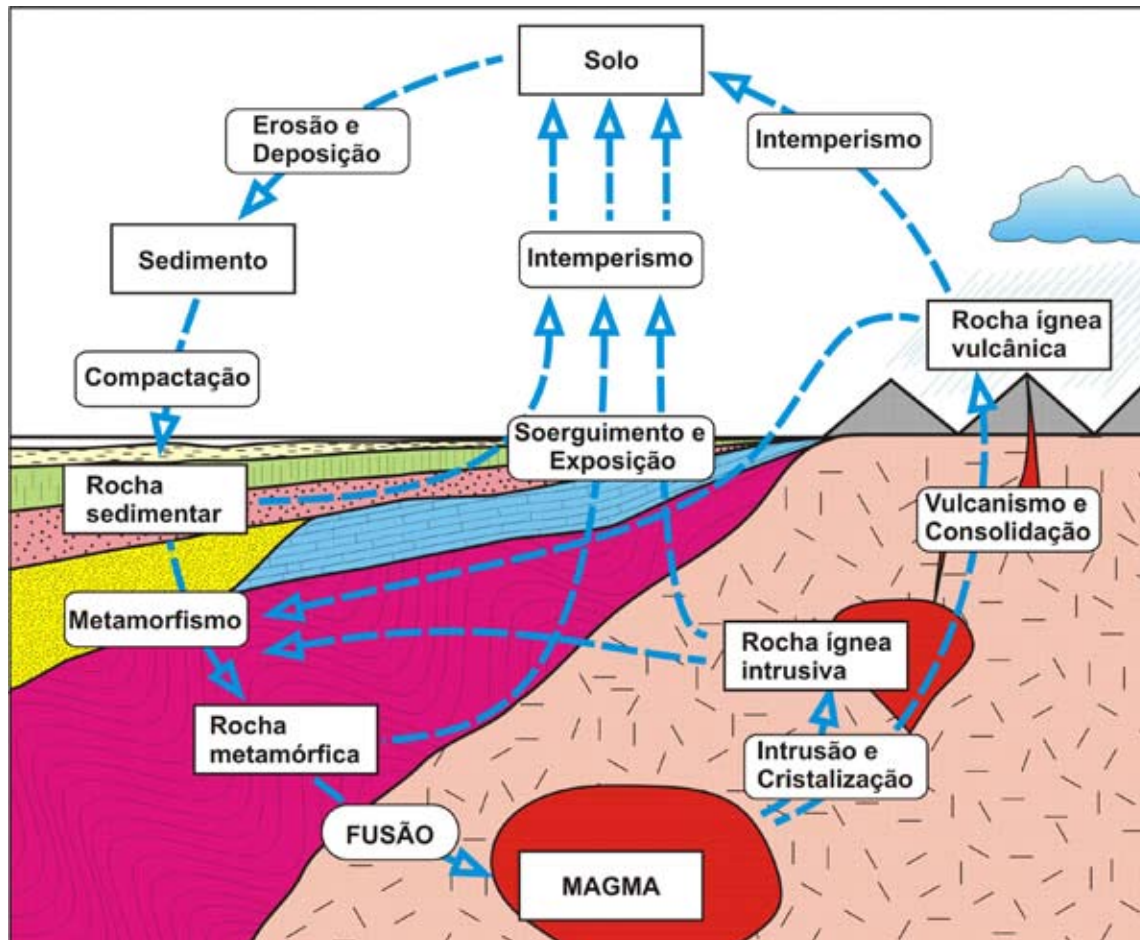


Figura 3 – Esquema de Ciclo das Rochas (Modif. de URL: http://rst.gsfc.nasa.gov/Sect2/rock_cycle_800x609.jpg)

alterações e dos fenômenos ocorridos ao longo da história geológica. Por meio das rochas podemos deduzir as condições atuantes no Sistema Terra na época em que foram geradas. Tomemos um exemplo: areias de deserto são muito particulares. Seus grãos bem arredondados e foscos de tanto colidir uns com os outros acabam acumulados em dunas. Dessa maneira, podemos reconhecer como os climas do passado foram muito distintos do que os do presente. Em vastas regiões do Estado de São Paulo os climas foram quentes e secos há cerca de 100 milhões de anos atrás. Como sabemos isso? Desertos existentes no passado deixaram esses vestígios. A relação entre areia e rocha (arenito), no caso de um antigo deserto, pode ser estabelecida estudando-se os *processos*, como os mecanismos de soterramento e compressão causados pelo peso das camadas que se depositaram acima da areia, ou de fluidos que cimentaram seus espaços vazios, até fazer com que ela se transformasse em rocha. Muito tempo depois, a rocha pode aflorar ou ter sua cobertura

removida pela ação da erosão, muitas vezes em locais que há muito tempo deixaram de ser desertos, como é o caso dos campos de dunas dos arenitos Botucatu, que hoje encerram reservas subterrâneas importantíssimas de água doce na América do Sul, o chamado Aquífero Guarani (Fig. 5). Os tipos de rochas, seus arranjos particulares e sua composição revelam o ambiente desértico do passado.

Para explicar como funciona o Ciclo das Rochas (Fig. 3) podemos começar pelo *intemperismo*, o processo de transformação ou modificação das rochas quando expostas à atmosfera e à hidrosfera.

Alguns fatores determinam, ao longo do tempo, o tipo e a intensidade do intemperismo, a saber: o **clima**, devido ao calor do Sol e à umidade das intempéries (que por sinal lhe emprestam o nome), o crescimento de **organismos** (fauna e flora), e os acidentes de **relevo**, devido à infiltração e drenagem da água ou sua movimentação superficial, que pode ser mais ou menos rápida, dependendo da inclinação das encostas. O último fator essencial a ser

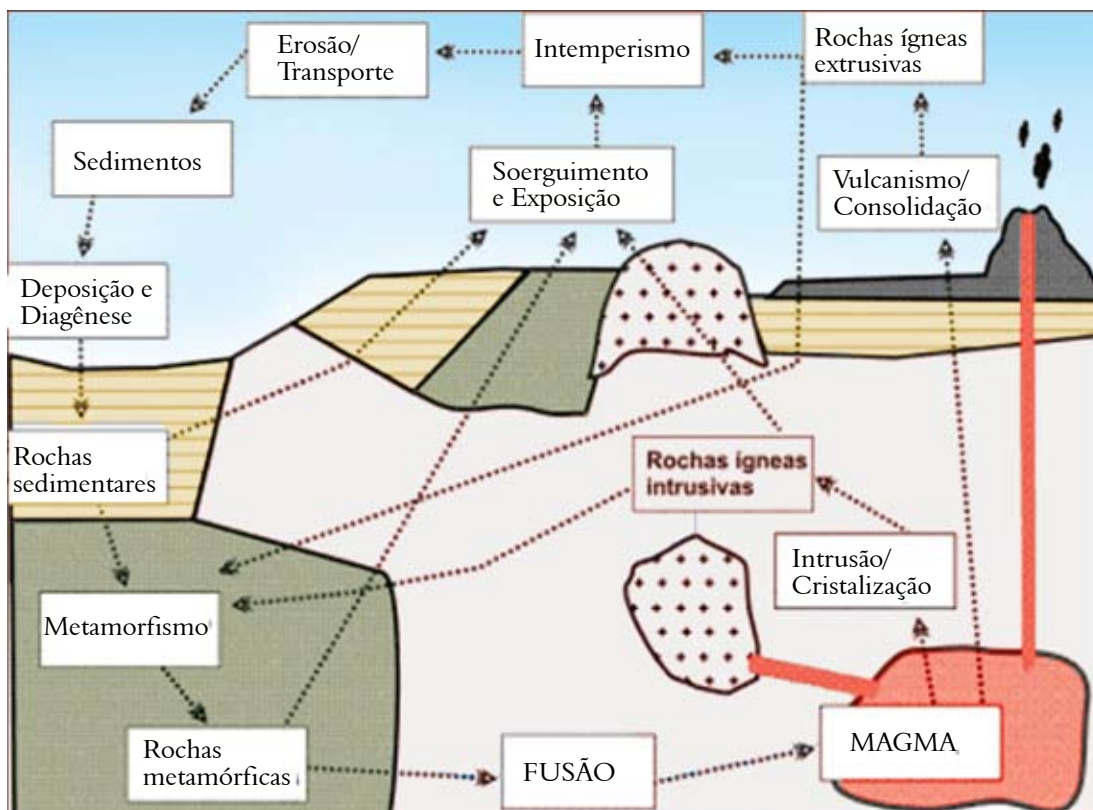


Figura 4 – Representação esquemática do Ciclo das Rochas

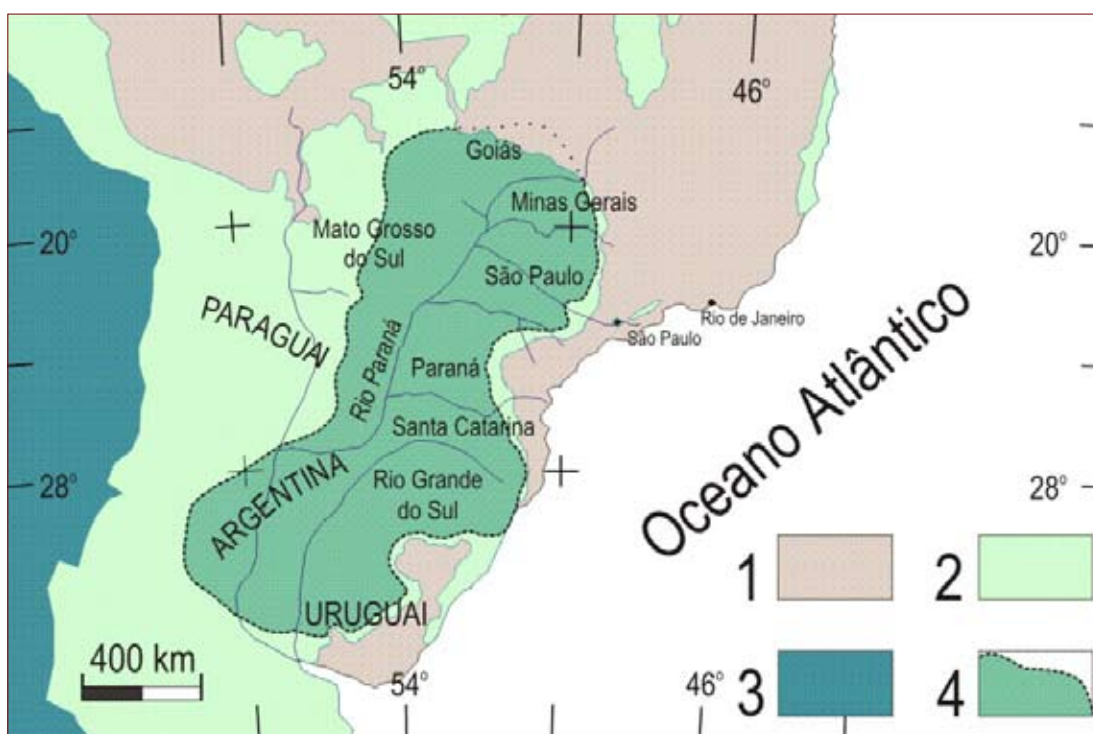


Figura 5 – Indicação da área aproximada ocupada pelo paleodeserto Botucatu. 1 – Rochas mais antigas (embasamento); 2 – Cobertura sedimentar de diversas idades; 3 – Cadeia Andina; 4 – Camadas sedimentares do paleodeserto (Modif. de Carneiro 2007)

considerado é o **tempo**, pois quanto mais longo o tempo que a rocha fica exposta a esses agentes, mais intensas e profundas serão as transformações.

O calor, a umidade, os organismos e o relevo determinam o grau de atuação de cada um dos três processos básicos de intemperismo: físico, químico e biológico. O intemperismo físico, ou desagregação, altera o tamanho ou a forma dos minerais sem mudar radicalmente a composição mineralógica. Denominamos intemperismo químico, ou decomposição, toda ação que altera a composição química da rocha, transformando os minerais primários da rocha em minerais secundários. A ação dos seres vivos contribui para acentuar o intemperismo físico ou químico, tanto mecânica quanto quimicamente, por meio de substâncias produzidas pelos organismos, ou geradas a partir de sua decomposição. De uma região para outra da Terra, dependendo das condições climáticas, de distribuição da vida e das formas de relevo, acima citadas, há predomínio de modificações físicas, químicas ou bioquímicas.

A rocha, quando passa por processos intemperísticos, forma camadas de materiais desagregados onde se formam os solos, processo que recebe o nome de pedogênese. O material solto torna possível desenvolver-se a vida de plantas e pequenos animais que por sua vez contribuem para a decomposição, ao formar o húmus. A moderna preocupação com uma Terra sustentável levou as Geociências a migrar do conceito de solos como “materiais inertes e inconsolidados” utilizados na engenharia para a ideia dinâmica dos solos como a *pele viva do planeta*, ou *pedosfera*. Essa visão, mais próxima da dos ecologistas (Warshall 2000), reúne ainda os pontos-de-vista da fertilidade, resistência à erosão e suporte físico, tão importantes para uma agricultura sustentável. Nessa concepção focalizam-se os quatro componentes do solo: (a) materiais inorgânicos resultantes do intemperismo dos minerais; (b) gases procedentes da atmosfera e da atividade química e biológica no solo; (c) líquidos na forma de soluções que participam de todos os processos; (d) materiais orgânicos representados por seres vivos e matéria orgânica morta. Com efeito, além da matéria orgânica, cuja presença pode ser extremamente variável, devemos levar em conta os gases e líquidos que compõem o solo, essenciais para a sustentação da vida. O húmus nos solos, além de representar nutrientes armazenados de modo seguro para sustentar a vida, são também um modo de reter carbono na forma de moléculas complexas, e evitar seu retorno à atmos-

fera como um dos principais gases-estufa. Quanto maior a quantidade de húmus, menor o risco de aquecimento global (Warshall 2000, p. 193).

A cadeia de processos de intemperismo pode atuar sobre qualquer rocha (ígneia, metamórfica, sedimentar) exposta à superfície da Terra. O intemperismo faz com que as rochas percam a coesão, fator que facilita o papel da *erosão* em promover desgaste desses materiais e seu *transporte*. Ao serem deslocadas, as partículas recebem o nome de sedimentos. Estes são transportados e depositados em depressões do relevo ou levados até o fundo do mar (como James Hutton havia corretamente avaliado). O principal agente de erosão são os rios e córregos que denudam os continentes. Na superfície da Terra o processo de erosão tem início pelos chamados movimentos de massa, que são deslocamentos de grandes volumes de materiais pelo efeito gravitacional, em direção à base das encostas. Outro tipo de deslocamento muito comum ao longo das encostas são os movimentos de partículas isoladas, levadas pela água da chuva e pelas enxurradas. Os rios constroem canais, que podem ter tamanhos grandes ou pequenos, dependendo da inclinação do trecho de encosta e do volume de água disponível. Ao longo desses canais os rios movimentam sedimentos, muitas vezes com grande turbulência. Rios com grande volume de água e alta declividade possuem grande capacidade de transporte e movimentam partículas sedimentares de todos os tamanhos. Nos trechos onde a declividade se reduz, a velocidade das águas se reduz também. Mesmo que o volume de água seja grande, a competência do fluxo diminui, e determinadas partículas de maior tamanho acabam sendo depositadas. A capacidade de transporte de muitos rios pode ser extremamente grande, como é o caso do Amazonas, que leva até o mar grandes volumes de argilas, siltes e areias todos os anos.

O gelo é outro agente de erosão que promove desgaste nas rochas pela chamada erosão glacial. Nas montanhas cobertas pela neve, quando a capa é muito espessa, a geleira se move para baixo, removendo todo o material mole (solos ou sedimentos) do caminho. Esses seixos e pedaços de rochas riscam a superfície das rochas resistentes abaixo da geleira, que faz, portanto, uma autêntica “raspagem” superficial (Ver “Geleiras no Brasil e os parques naturais de Salto e Itu” em *Ciência Hoje* número 112). O poder destrutivo do gelo não pode ser comparado a qualquer outro agente superficial,

como no caso das avalanches de neve, um tipo de erosão glacial extremamente rápida, em que a neve despenca do alto das montanhas, retira o material das encostas e destrói tudo que ficar no caminho. Por outro lado, na maior parte da história da Terra os registros indicam que as áreas cobertas por geleiras são muito restritas (como se observa no presente).

O vento, por sua vez, é capaz de selecionar cuidadosamente os sedimentos e ao mesmo tempo remover partes menos resistentes da superfície das rochas. Sua ação, concentrada sobretudo nos desertos e em zonas litorâneas, onde as velocidades dos ventos são maiores e o fluxo é relativamente contínuo, consegue nivelar a superfície das encostas e formar dunas e outras feições muito características (Ver “Botucatu: o grande deserto brasileiro” em *Ciência Hoje* número 143).

A *sedimentação* é o processo de acumulação dos sedimentos em depressões, chamadas bacias sedimentares, onde, dependendo das condições e da profundidade a que os sedimentos são submetidos, o peso dos sedimentos acumulados e a movimentação de fluidos provocam compactação e cimentação dos materiais. A transformação de um sedimento em rocha sedimentar é chamada *diagênese*.

As rochas sedimentares são formadas pela deposição e diagênese de sedimentos provenientes de outras rochas ou de materiais de origem biogênica, ou ainda da precipitação química de minerais. Rochas sedimentares como calcários e diatomitos são formados por processos químicos/bioquímicos. Além das rochas sedimentares, existem dois outros grandes grupos de rochas: as rochas ígneas, ou magmáticas, e as metamórficas. A distinção entre elas é feita de acordo com os processos geradores. Entretanto, há variações nas condições de formação das rochas com mesma origem genética, resultando em diversos tipos de rochas em cada grupo. As principais características distintivas entre os três grupos de rochas são mostradas no quadro 1.

Quando as placas litosféricas se movimentam durante o Tempo Geológico, as rochas sedimentares (assim como outras rochas metamórficas e ígneas) podem ser levadas a ambientes muito diferentes daqueles sob os quais se formaram. Qualquer rocha submetida à ação de altas pressões e temperaturas, além da percolação de fluidos, passa por transformações dos minerais que as constituem, além de modificar sua estrutura, tornando-se orientadas. Essas propriedades definem uma rocha metamórfica. Rochas sedimentares, enteradas a profundidades suficientes e submetidas ao

Quadro 1 – Características dos principais tipos de rochas (Carneiro et al. 2003)

MAGMÁTICAS	SEDIMENTARES	METAMÓRFICAS
1. Aspecto maciço ou compacto	1. Geralmente friáveis e riscáveis com o canivete. Aspecto maciço ou em camadas	1. Aspecto foliado ou maciço
2. Grãos imbricados, sem deixar poros (exceto em algumas rochas vítreas, vulcânicas, como pedra-pomes)	2. Grãos não-imbricados, apresentando poros ou cimento. Fragmentado (alguns casos maciço)	2. Grãos imbricados ou firmemente justapostos
3. Constituintes com formas irregulares ou geométricas devido à cristalização. Nunca mecanicamente arredondados	3. Constituintes com formas arredondadas ou ovaladas. Por vezes angulosos (pedaços quebrados). Raramente com formas geométricas	3. Constituintes com formas geométricas ou irregulares. Raramente arredondados
4. Distribuição espalhada e homogênea; ausência de camadas ou estratos	4. Distribuição espalhada e homogênea dos grãos. Comum camadas, estratificação e fósseis	4. Distribuição dos componentes em bandas. Por vezes dobradas
5. Ausência de orientação ou foliação dos grãos	5. Grãos não-orientados	5. Frequentemente há orientação dos componentes, com foliação da rocha

calor interno da Terra e a pressões dirigidas, terá como consequência a reorientação dos minerais, no processo denominado *metamorfismo*. As rochas metamórficas são formadas por transformações na mineralogia, química e estrutura de rochas já existentes, devido a mudanças nos parâmetros físicos (pressão e temperatura principalmente) e químicos diferentes das condições diagenéticas. As rochas resultantes do processo de metamorfismo dependem do tipo de rocha e sua composição mineralógica, e as principais transformações são a recristalização de minerais e, ou, formação de novos minerais e deformações na estrutura das rochas (dobras, foliação, lineação etc.).

Durante a deposição, diagênese e metamorfismo progressivo de um sedimento argiloso (tamanho do grão menor que 0,002 mm), ele passa por uma série de etapas. As rochas envolvidas nessas transformações permanecem no estado sólido, e podem formar rochas sedimentares, como o argilito ou folhelho, ou podem dar origem a rochas metamórficas, como a ardósia, filito, xisto e gnaiss. Se as condições de metamorfismo forem muito intensas, as rochas podem se fundir, parcial ou totalmente, e gerar magmas. Estes, ao se solidificar, darão origem a novas rochas ígneas. Somente rochas que tenham atingido alta temperatura, equivalente à dos gnaisses, poderiam atingir condições extremas capazes de realizar a fusão parcial ou total do material. O magma assim formado, se for resfriado lentamente, dará origem a uma rocha plutônica; caso contrário, se for extravasado na superfície da Terra, formará uma rocha vulcânica.

Raríssimas vezes, sob condições naturais, um sedimento pode ser transformado, repentinamente, em material fundido. Quando há impactos de corpos celestes de grande porte, nas proximidades da área impactada pode haver fusão instantânea de rochas e materiais, mas esse fenômeno tem distribuição extremamente limitada na Terra. Quando ocorre intrusão de uma grande massa ígnea (magma), pode haver nas vizinhanças da intrusão a fusão parcial do material adjacente. Mesmo sob tais condições extremas, um eventual sedimento acabaria por sofrer algum tipo de metamorfismo. As condições que determinam fusão de material durante o metamorfismo progressivo são o aumento de temperatura, a diminuição de pressão ou a introdução de água no sistema, que rebaixa o ponto de fusão de diversos minerais.

O magma é um líquido parcial ou totalmente

fundido, de alta temperatura, em torno de 700 a 1200° C, proveniente do interior da Terra, resultante do aquecimento e fusão das rochas sob altas temperaturas e em determinadas condições e locais da litosfera ou astenosfera. Muitas vezes o magma carrega consigo metais valiosos e, portanto, jazidas de vários metais como ouro, platina, cobre e estanho podem associar-se a corpos de rochas ígneas.

As rochas ígneas têm sua origem no resfriamento do magma, nas quais o tamanho dos cristais geralmente é proporcional ao tempo de resfriamento do magma: quanto mais lenta a cristalização de um magma, maiores os tamanhos dos cristais formados. Existem três tipos de rochas ígneas: plutônicas ou intrusivas, subvulcânicas ou intrusivas rasas e vulcânicas ou extrusivas. O magma pode migrar dos locais onde se originou para regiões da crosta terrestre onde a pressão seja menor, alojando-se como intrusão magmática. Uma intrusão pode variar em tamanho e forma; quando atinge grandes proporções constitui uma câmara magmática. Nessas condições o resfriamento lento do magma favorece o processo de cristalização dos minerais, dando origem a rochas ígneas plutônicas como os granitos.

As rochas ígneas vulcânicas, também conhecidas como efusivas, se formam quando a migração do magma alcança a superfície da Terra, por processos associados ao tipo de vulcanismo atuante. Nos vulcões, o magma, que agora pode ser chamado de lava, atinge a superfície da crosta e se resfria rápido ao entrar em contato com a temperatura ambiente, com a consequente consolidação das rochas. Os basaltos são as rochas vulcânicas mais comuns. Devido à solidificação praticamente instantânea (consolidação), não há tempo para os cristais se desenvolverem, sendo muito pequenos, invisíveis a olho nu (< 1 mm). Para situações em que o magma se cristaliza no interior da crosta, próximo à superfície, mas com resfriamento um pouco mais lento que o das rochas vulcânicas, podem se formar cristais de tamanho pequeno (~ 1 mm), visíveis a olho nu. Rochas deste tipo são denominadas rochas subvulcânicas, como o diabásio. Os termos “extrusivo”, “vulcânico”, “subvulcânico”, “hipoabissal”, “intrusivo” e “plutônico” devem ser utilizados nas descrições geológicas de corpos ígneos (Motoki e Sichel 2006) sem, entretanto, assumir correlação direta entre o modo de ocorrência geológica e a profundidade de colocação de um corpo ígneo, porque muitas rochas ígneas formadas em profun-

didade podem ter se cristalizado mais rapidamente e portanto podem apresentar textura fina.

O derradeiro processo que nos resta expor são os movimentos da litosfera que promovem o aparecimento das rochas na superfície. Quando partes das cadeias de montanhas são erodidas, o alívio de peso da parte superior da crosta faz com que exista um “empuxo” da parte inferior e a superfície da crosta seja soerguida. Os processos erosivos revigoram sua atuação e o Ciclo das Rochas é realimentado.

Os continentes se desenvolveram ao longo do Tempo Geológico, sendo muitas vezes receptores de materiais do manto, graças à atividade magmática, que os transfere para a superfície da Terra. O Ciclo das Rochas, idealizado pelo naturalista James Hutton, representa o conjunto de processos cíclicos que atuam na geração e transformação de rochas, bem como suas relações com os processos de soerguimento e exposição de rochas na crosta, a partir da ação de esforços internos.

O entendimento de conceitos subjacentes aos processos relacionados ao Ciclo das Rochas continua a desafiar a capacidade e a engenhosidade de investigação dos geocientistas. Ademais, o ciclo possui ligações que podem ser estabelecidas com outros ciclos interligados, como os da água e do carbono. Uma consequência do Ciclo das Rochas é o fato de que os processos envolvidos determinam a existência de bens minerais úteis ao homem, ou responsáveis por diversos desastres ambientais, relacionados às dinâmicas interna e externa do planeta. Além disso, em paralelo a esse ciclo, desenvolve-se o ciclo de formação e destruição de montanhas (orogênese).

O motor do Ciclo das Rochas

As rochas dos continentes e dos fundos dos oceanos constituem registros das transformações relacionadas ao Ciclo das Rochas, que funciona desde os primórdios da história geológica da Terra, e acompanham a evolução do planeta. Para entender qual é o motor que realiza as transformações, é preciso tratar das fontes de energia dos processos terrestres. As fontes são, essencialmente, três: a energia proveniente do Sol, a energia (calor) proveniente do interior do planeta e a gravidade. O ciclo envolve, pois, as três fontes de energia mencionadas.

Os materiais terrestres estão continuamente

sob a ação de um ou mais agentes que provocam desequilíbrios. As transformações, por sua vez, representam respostas a fluxos de energia na Terra. Se por um lado é bem aceita a constatação de que o Sol constitui a fonte primária de energia dos processos intempéricos, erosivos e de sedimentação, o reconhecimento da fonte dos processos internos do planeta não foi uma tarefa assim tão simples.

Admitindo a influência do calor interno da Terra, Hutton introduziu o conceito de plutonismo (de Plutão, deus do fogo na mitologia greco-romana) a partir de observações de metamorfismo de contato entre rochas ígneas e sedimentares, bem como detalhadas descrições de amostras examinadas ao microscópio.

A relação dinâmica entre os agentes e as configurações da parte mais externa do planeta, interligadas naturalmente à Tectônica Global, constitui o motor do Ciclo das Rochas.

As relações envolvidas no Ciclo das Rochas são mais complexas do que a concepção simplificada dos modelos acima. Diversos produtos não foram representados, como, por exemplo, as variações de tipos de rochas formadas por precipitação química, as inúmeras possibilidades de composição mineralógica dos magmas (basáltico, granítico, alcalino etc.) e os variados tipos de rochas metamórficas que podem ser geradas, de acordo com a natureza da rocha original. Abordar em pormenores as amplas relações envolvidas no Ciclo das Rochas depende de conhecimentos geológicos específicos que ultrapassam os objetivos do presente artigo.

Leitura recomendada

- Almeida F.F.M.de. 2005. Participação do Brasil na grande revolução das Geociências. *Terræ Didática*, 1(1):44-49. URL: <http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/v1n1/t_didatica_2005_v01n01_p044-049_almeida.pdf/>. Acesso 16.09.2008.
- Almeida F.F.M.de, Carneiro C.D.R. 1995. Geleiras no Brasil e os parques naturais de Salto e Itu. *Ciência Hoje*, 19(112):24-31.
- Almeida F.F.M.de, Carneiro C.D.R. 1998. Botucatu: o grande deserto brasileiro. *Ciência Hoje*, 24(143):36-43. Outubro 1998.
- Carneiro, C.D.R. 2007. Viagem virtual ao Aquífero Guarani em Botucatu (SP): Formações Pirambóia e Botucatu, Bacia do Paraná. *Terræ Didática*, 3(1):50-73. URL: http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/v3n1/TD3_viagem%20virtual%20ao%20aquifero.pdf. Acesso 16.09.2008.

- Carneiro C.D.R., Toledo M.C.M.de, Almeida F.F.M.de. 2004. Dez motivos para a inclusão de temas de Geologia na Educação Básica. *Rev. Bras. Geoc.*, **34**(4):553-560.
- Carneiro C.D.R., Brito-Neves B.B.de Amaral I.A.do, Bistrichi C.A. 1994. O Atualismo como princípio metodológico em Tectônica. *Bol. Geoc. Petrobrás.* **8**(2/4):275-293
- Carneiro C.D.R., Mizusaki A.M.P., Almeida F.F.M.de. 2005. A determinação da idade das rochas. *Terræ Didática*, **1**(1):6-35. URL: http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/v1n1/t_didatica_2005_v01n01_p006-035_carneiro.pdf/
- Carneiro C.D.R., Almeida F.F.M.de. 1996. O Sertão Já Virou Mar. *Ciência Hoje*, **21**(122):40-50.
- Carneiro C.D.R., Almeida F.F.M.de. 1989. Vulcões no Brasil. *Ciência Hoje*, **11**(62):29-36.
- Costa L. A. M. da, Inda H. A. V. 1992. *Fundamentos da geologia pós-moderna*. Rio de Janeiro: CPRM. 8p. (Série Sinopses, DGH/S/A004-92).
- Frodeman R.L. ed. 2000. *Earth matters: the Earth Sciences, philosophy and the claims of community*. Upper Saddle River: Prentice Hall. 209p.
- Gonçalves P.W., Carneiro C.D.R. 2000. Os ciclos da natureza. In: Carneiro C.D.R. ed. *Geologia*. São Paulo: Global/SBPC. p. 6-10. (Série Ciência Hoje na Escola).
- Lopes O.R. 2007. *Jogo "Ciclo das Rochas": um recurso lúdico para o ensino de Geociências*. Campinas: Inst. Geoc., Univ. Est. Campinas. 131p. (Dissert. Mestr. Ensino e Hist. Ciências da Terra).
- Lopes O.R., Carneiro C.D.R. 2009. O jogo "Ciclo das Rochas" para ensino de Geociências. *Rev. Bras. Geoc.*, (submetido).
- Mioto J.A., Hasui Y. 1983. O movimento das terras. *Ciência Hoje*, **5**(30):42-48.
- Morin E. 2001. *Os sete saberes necessários à educação do futuro*. 4. Ed. Trad. Catarina E.F. da Silva e Janne Sawaya; Rev. técn. Edgard A. Carvalho. São Paulo: Cortez, Brasília: UNESCO. 118p.
- Motoki A., Sichel S. 2006. Avaliação de aspectos texturais e estruturais de corpos vulcânicos e subvulcânicos e sua relação com o ambiente de cristalização, com base em exemplos do Brasil, Argentina e Chile. *REM: R. Esc. Minas*, Ouro Preto, **59**(1):13-23, jan/mar. 2006.
- Warshall P. 2000. Four ways to look at earth. In: R.L. Frodeman, ed. 2000. *Earth matters: the Earth Sciences, philosophy and the claims of community*. Upper Saddle River, Prentice Hall, p. 189-204.

Fontes de consulta na Web

Os sítios abaixo contêm informações úteis para se conhecer o significado e origem dos termos e classificações das rochas e seu papel na história geológica da Terra.

- Alden A. s.d. *About Metamorphic Rocks*. Sítio About.com. URL: http://geology.about.com/cs/basics_roxmin/a/aa011804c.htm. Acesso 18.05.2009.
- BBC Education. s.d. *The Rock Cycle: Activity*. URL: http://www.bbc.co.uk/schools/ks3bitesize/science/chemistry/rock_cycle_act.shtml. Acesso 18.05.2009.
- Ciclo das Rochas*. URL: http://ciencias3c.cvg.com.pt/ciclo_das_rochas.htm. Acesso 18.05.2009.
- Ciclo das Rochas*. URL: http://rst.gsfc.nasa.gov/Sect2/rock_cycle_800x609.jpg. Acesso 18.05.2009.
- Glossário Geológico Ilustrado (IG/UNB). *Glossário Geológico*. URL: <http://www.unb.br/ig/glossario/>. Acesso 18.05.2009.
- Magalhães L.C.de. s.d. *Poesia sobre o ciclo das rochas*. URL: http://www.unb.br/ig/causos/poesia_sobre_o_ciclo_das_rochas.htm. Acesso 18.05.2009.
- Mineropar. Minerais do Paraná. s.d. *Geologia na escola*. Pôsteres. URL: <http://www.mineropar.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=98>. Acesso 18.05.2009.
- Rochas*. <http://www.rc.unesp.br/museudpm/rochas/introducao.html>. Acesso 18.05.2009.
- Rock Cycle*. http://en.wikipedia.org/wiki/Rock_cycle. Acesso 18.05.2009.
- The Rock Cycle Conundrum*. s.d. *The rock cycle software*, version 1.4. London: WallopWare & Hamstead School. URL: <http://earthsci.org/freeware/freewar.html>. Acesso 18.05.2009.