



# Fundamentos da geologia



# Fundamentos da Geologia

Lucas Del Mouro

© 2017 por Editora e Distribuidora Educacional S.A.  
Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida ou transmitida de qualquer modo ou por qualquer outro meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia, gravação ou qualquer outro tipo de sistema de armazenamento e transmissão de informação, sem prévia autorização, por escrito, da Editora e Distribuidora Educacional S.A.

**Presidente**

Rodrigo Galindo

**Vice-Presidente Acadêmico de Graduação**

Mário Ghio Júnior

**Conselho Acadêmico**

Alberto S. Santana  
Ana Lucia Jankovic Barduchi  
Camila Cardoso Rotella  
Cristiane Lisandra Danna  
Danielly Nunes Andrade Noé  
Emanuel Santana  
Grasiele Aparecida Lourenço  
Lidiane Cristina Vivaldini Olo  
Paulo Heraldo Costa do Valle  
Thatiane Cristina dos Santos de Carvalho Ribeiro

**Revisão Técnica**

Paulo Sergio S. da Silva  
Thailli Conte

**Editorial**

Adilson Braga Fontes  
André Augusto de Andrade Ramos  
Cristiane Lisandra Danna  
Diogo Ribeiro Garcia  
Emanuel Santana  
Erick Silva Griep  
Lidiane Cristina Vivaldini Olo

---

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Del Mouro, Lucas  
D331f Fundamentos da geologia / Lucas Del Mouro. – Londrina  
: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017.  
208 p.

ISBN 978-85-8482-888-3

1. Geologia. I. Título.

CDD 550

---

# Sumário

<b>Unidade 1   A Terra</b>	<b>7</b>
Seção 1.1 - Planeta Terra: origem, estrutura e propriedades	9
Seção 1.2 - Ciclo das rochas	24
Seção 1.3 - Geologia estrutural	38
<b>Unidade 2   Petrologia</b>	<b>55</b>
Seção 2.1 - Rochas ígneas	57
Seção 2.2 - Rochas sedimentares	69
Seção 2.3 - Rochas metamórficas	86
<b>Unidade 3   Geologia aplicada</b>	<b>101</b>
Seção 3.1 - Geocronologia	103
Seção 3.2 - Paleontologia	119
Seção 3.3 - Hidrogeologia	134
<b>Unidade 4   Tópicos especiais em Geologia</b>	<b>151</b>
Seção 4.1 - Recursos naturais e energéticos	153
Seção 4.2 - Geologia ambiental	169
Seção 4.3 - Temas atuais em Geociências	184



## Palavras do autor

A disciplina de Fundamentos da Geologia oferecerá uma visão geral e objetiva dos principais conceitos nos quais essa ciência se baseia para que, desta forma, você desenvolva uma compreensão básica e sistêmica da geologia e seus processos. Para isso, ela foi dividida em quatro unidades de ensino: A Terra; Petrologia; Geologia Aplicada e Tópicos Especiais em Geologia. Na Unidade 1, você aprenderá sobre os processos que deram origem ao Universo e ao Sistema Solar, e qual sua relação com o surgimento do nosso planeta. Você estudará como a dinâmica interna controla a atividade tectônica, que molda a superfície do planeta e influencia uma série de outros processos fundamentais à nossa existência.

Após ser apresentado aos processos que controlam a dinâmica interna do planeta, em Petrologia você estudará as rochas que constituem o planeta. Abordaremos o ciclo das rochas de modo completo, desde o surgimento das rochas ígneas, a partir da atividade vulcânica, passando pela atividade intempérica que transforma essas rochas em sedimentos, os quais são transportados e depositados em bacias sedimentares, que, após processos de diagênese, formarão as rochas sedimentares. Estas, dão início a um novo ciclo.

Estudar a origem e a formação das rochas será fundamental para entender os conceitos da geocronologia, que utilizando princípios estratigráficos e datações absolutas, nos fornecem informações sobre a cronologia e tempo geológico. Ao estudar paleontologia, a partir do que encontra-se preservado no registro fóssilífero, você terá noções de evolução e aprenderá sobre as extinções em massa que levaram à configuração da fauna e flora atuais.

Ao final desta disciplina, você aplicará os conceitos vistos nas três primeiras unidades, pois além de estudar temas atuais em geologia que têm ganhado destaque apenas nas últimas décadas, como a Teoria de Gaia e geologia médica, abordaremos também os recursos naturais e energéticos e a hidrogeologia. Mais do que conhecer e entender sobre a água subterrânea, o ciclo hidrológico, a vulnerabilidade de aquíferos e as reservas de

petróleo e gás natural, é necessário saber explorar esses recursos, sempre buscando por energias alternativas renováveis, utilizando os preceitos da geologia ambiental.

A geologia é fascinante e também complexa. É fundamental que você esteja sempre atento e busque complementar o conteúdo estudado e fortaleça o seu conhecimento lendo os textos complementares sugeridos e dedique-se ao máximo na leitura do livro didático, pois ele o ajudará a aperfeiçoar sua capacidade investigativa. A partir do momento que você começar a conhecer essa fascinante ciência, terá vontade de saber cada vez mais, por isso, embarque nesta aventura geológica!

# A Terra

## Convite ao estudo

Aluno, na primeira unidade deste livro você irá aprender como o Universo foi formado, conhecerá as hipóteses que explicam a origem do Universo e do Sistema Solar, e verá como ocorreu a evolução do planeta Terra por meio dos processos de diferenciação. Veremos como a Tectônica de Placas controla a natureza dinâmica do sistema Terra e iremos abordar as principais propriedades dos materiais que constituem o planeta (minerais e rochas). Por fim, estudaremos a origem e relação dos terremotos com a dinâmica terrestre e qual o potencial que tais eventos têm de transformar o meio físico no qual vivemos.

Conhecer o meio em que vivemos é necessário para que possamos entender e interagir com o ambiente ao nosso redor. Para que isso seja possível precisamos conhecer os princípios básicos formadores dos elementos químicos, propriedades físicas e químicas da Terra, rochas e agregados naturais de diferentes minerais. Somente a partir do momento em que você puder correlacionar esses conceitos, começará a compreender melhor o meio físico em que vivemos e trabalhamos e poderá contribuir para que ele se perpetue ao longo das futuras gerações.

Para inseri-lo nesse processo de compreensão, você exercerá o papel de professor de uma escola integral da sua região. Esta possui amplo espaço físico, planejado para proporcionar uma vivência única entre alunos e professores, desde salas de aula amplas, anfiteatros, até um laboratório de ciências naturais equipado com diversos equipamentos e materiais utilizados nas aulas práticas de experimentos dos alunos da educação infantil, do ensino médio e fundamental. Por meio das aulas e do aproveitamento da estrutura da escola, sua missão é a de incitar os alunos a refletirem acerca

dos assuntos relacionados ao planeta Terra, abordados nesta unidade, transformando conteúdo em conhecimento. Os seus ensinamentos serão muito importantes, pois por meio deles os alunos poderão interpretar o ambiente ao seu redor.

Como o período letivo está começando agora e novas turmas estão iniciando os seus estudos, para aumentar a curiosidade dos alunos, você planeja utilizar fatos cotidianos para a aplicação dos conteúdos que serão ministrados, com os quais os estudantes possam ter algum tipo de contato. Você decidiu começar a sua disciplina apresentando assuntos importantes e que despertam muito a curiosidade da comunidade em geral, sendo eles: a origem do Universo e do Sistema Solar, a estrutura e propriedades físicas da Terra e a Tectônica de Placas. A sua ideia é usufruir o que a escola lhe oferece para capacitar os estudantes.

Ao final do ano letivo você espera que os seus alunos sejam capazes de responder a alguns questionamentos: como e quando foi o começo de tudo? De que forma partículas minúsculas deram origem a um Universo infinito? Como as rochas se formaram? Do que a Terra é constituída? Qual a importância da tectônica de placas em nossas vidas cotidianas?

Aprenda mais sobre tudo isso nesta unidade e, depois, transmita o que você aprendeu aos seus alunos.

# Seção 1.1

## Planeta Terra: origem, estrutura e propriedades

### Diálogo aberto

Nesta seção, estudaremos sobre a origem do Universo e do Sistema Solar, a estrutura interna e propriedades físicas da terra e a tectônica de placas. A princípio você pode acreditar que o tema abordado nesta unidade não é importante, afinal possui pouca aplicabilidade no nosso dia a dia. Apesar de ser bastante teórico, ele é necessário para fundamentar os conceitos geológicos básicos que serão abordados para iniciarmos o seu processo de construção do conhecimento sobre a geologia.

Para que você reflita sobre a história do Universo e assimile melhor o conteúdo, vamos retomar a situação apresentada no “Convite ao estudo”, no qual você é o professor da disciplina de geografia de uma escola integral da região, de modo que o período letivo começou e os alunos estão agitados. Durante uma visita do terceiro ano ao laboratório de ciências, muitos estudantes ficaram atraídos por um quadro contendo a imagem de uma grande cratera causada por um impacto meteorítico. Como recentemente os noticiários destacaram que uma chuva de meteoros intensa atingiria a Terra na próxima semana e poderia causar alguns estragos de pequena escala, os estudantes levantaram muitos questionamentos sobre esse assunto. Você explicou que a imagem representava um astroblema e remontava ao início da história do nosso planeta. Para continuar a discussão sobre astroblemas, como visto no quadro pelos alunos, você resolveu que na sua primeira atividade como professor daria aos alunos a seguinte tarefa: escrever uma dissertação sobre “astroblemas e sua relação com a origem e evolução do Universo”. Com o desenvolvimento desse trabalho, você espera que eles sejam capazes de explicar qual a relação dessas estruturas encontradas na Terra, com a origem do Universo e do sistema solar, além de ser um

excelente exercício preparatório para o vestibular.

Ao fazer sua pesquisa para escolher uma área em que os estudantes possam basear o estudo, você identificou, por meio de alguns mapas geológicos e bibliografia disponíveis na internet, que o Domo de Araguinha – entre Goiás e Mato Grosso – seria um excelente objeto de estudo para os alunos, pois essa estrutura está relacionada a um impacto meteorítico, ou seja, um astroblema. Para que os alunos possam discorrer sobre o assunto, você precisa introduzir no início da próxima aula algumas informações sobre a temática, como: qual a idade desse domo? Como domos se relacionam com a origem do nosso planeta? Quais as evidências de que essa estrutura de fato é um astroblema?

E então, como você responderia a esses questionamentos? Ao responder a essas questões, você irá aprender como o Universo e o nosso Sistema Solar foram formados, afinal, as crateras de impacto estão relacionadas à formação do nosso Planeta. Além disso, você estudará sobre o processo de formação da Terra e aprenderá como ela foi formada, estruturada e quais suas propriedades físicas e químicas.

## **Não pode faltar**

Para que possamos começar a estudar as propriedades geológicas do planeta em que vivemos, precisamos primeiro entender como o Universo e toda a matéria que o compõe tiveram origem, como o "nada" se combinou e deu origem aos planetas, entre eles a Terra, que por sua vez passou por um extenso processo evolutivo até atingir a configuração que conhecemos e estudaremos.

Desde o início da história, a humanidade questionava como o Universo teria se originado, hoje a Teoria do Big Bang é a mais aceita para explicar como tudo começou. Segundo ela, o Universo surgiu há aproximadamente 13,7 bilhões de anos quando toda a matéria concentrava-se em um ponto extremamente denso que, após uma explosão cataclísmica de razões ainda desconhecidas, começou a expandir-se, dando origem à matéria e encontra-se em expansão até hoje. A teoria da expansão do Universo surgiu quando, em 1992,

astrônomos que analisavam dados obtidos pelo telescópio espacial Hubble identificaram que a luz das galáxias distantes apresentava comprimentos de onda de luz vermelha. Segundo o Efeito Doppler, comprimentos de onda que se aproximam do ponto de observação exibem comprimentos de onda de luz azul, ao passo que ao afastarem-se exibem comprimento de onda de luz vermelha. Desta forma, todas as galáxias estariam se afastando da nossa em todas as direções, portanto o Universo encontra-se em expansão.

Quando a temperatura e a densidade da energia diminuíram, matéria começou a se formar, em um processo chamado nucleogênese. Durante a nucleogênese, prótons, elétrons e nêutrons combinaram-se e formaram os primeiros átomos de elementos leves, H e He, posteriormente tiveram origem Li e Be. Com quase um milhão de anos de existência, quando a temperatura já era muito baixa para permitir a criação de novos elementos, a força da gravidade passou a unir a matéria existente em imensas nuvens de gás com forma espiralada.

Geologicamente falando, é importante analisar como os elementos tiveram origem, e de que maneira uma nuvem de átomos se transformou na matéria que constitui galáxias, planetas e deu origem aos minerais e rochas que conhecemos hoje.



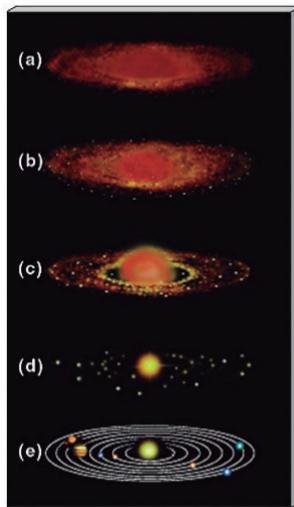
### Assimile

Veja a seguir como ocorreu a formação do Sistema Solar, de acordo com a Teoria da Nebulosa (Figura 1.1).

- a) Uma nébula se forma a partir do H e He deixados pelo *Big Bang*. A força da gravidade une esses gases e a poeira estelar na forma de um disco.
- b) Partículas quentes se acumulam nos anéis interiores, enquanto voláteis concentram-se nos anéis externos.
- c) A bola de gás no centro torna-se quente o suficiente para dar início às reações de fusão das partículas, formando o protossol. Na porção externa, poeira estelar e partículas de gelo colidem, formando planetesimais.

- d) Os planetesimais desenvolvem-se a partir de contínuas colisões.
- e) A gravidade dá origem à forma arredondada aos planetas, já orbitando ao redor do Sol.

Figura 1.1 | O processo de formação do Sistema Solar de acordo com a Teoria da Nebulosa



Fonte: <<http://lifeng.lamost.org/courses/astrotoday/CHAISSON/AT315/IMAGES/AAAKKSW0.GIF>>. Acesso em: 16 out. 2016.

A partir de então, o desenvolvimento dos planetas está diretamente relacionado com a sua distância do Sol. Os fragmentos mais densos acumularam-se próximo ao núcleo de gravidade, enquanto os voláteis foram expelidos para o exterior da nebulosa. Desta forma, tem-se a divisão entre planetas terrosos (Mercúrio, Vênus, Terra e Marte) constituídos de metais e rochas, e os planetas gasosos (Júpiter, Saturno, Urano e Netuno), constituídos principalmente por gelo e outros gases.



**Pesquise mais**

Se você se interessou por esse assunto e gostaria de conhecer mais sobre astronomia em geral e geologia planetária, visite o site da NASA <<https://www.nasa.gov/>>. Lá você pode conferir as

fotos feitas pelo telescópio Hubble (galáxias, nebulosas, estrelas) e também acompanhar atualizações da sonda Curiosity, que está explorando Marte.

E o nosso planeta, a Terra, como esta se transformou neste planeta dinâmico que conhecemos, diferentemente de outros planetas que não apresentam atividade tectônica? A resposta para essa pergunta está nos processos de diferenciação. Quando a Terra ainda estava em formação, sofreu inúmeros impactos de planetesimais e outros corpos celestes, como meteoros. Ao se chocarem, a energia cinética da colisão era convertida em calor, causando a fusão dos materiais rochosos. Soma-se a isso o fato da presença de minerais radioativos, que ao decaírem liberam energia, consequentemente calor, a Terra primitiva se assimilava a uma grande bola incandescente.



### Assimile

São chamados astroblemas as crateras formadas pelo impacto de corpos celestes com o planeta Terra, como meteoros ou asteroides e cometas.

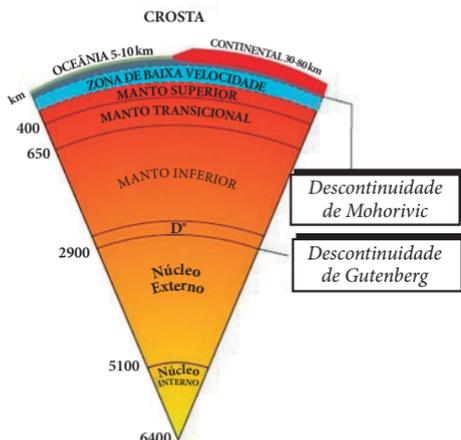
Ainda hoje é comum que meteoros se choquem com os planetas. Na Lua, por exemplo, podemos ver as crateras deixadas por esses impactos claramente. O que acontece é que, ao contrário da Terra, a Lua não possui atmosfera, desta forma encontra-se muito mais exposta que o nosso planeta, pois os pequenos corpos que nos atingem se desintegram ao entrar em contato com a atmosfera terrestre, aqueles maiores e mais resistentes geralmente caem no mar. Isso não significa que não fomos atingidos ou que não estamos sujeitos a esse tipo de acontecimento. Acredita-se que, há aproximadamente 66 milhões de anos, um gigantesco asteroide tenha se chocado com a Terra, causando uma extinção em massa que dizimou os dinossauros e milhares de espécies de outros seres vivos. É provável que muitos outros eventos como esses tenham ocorrido ao longo da história geológica do planeta, porém, devido à presença de atmosfera e atividade erosiva, os registros tenham se perdido com o tempo.



São conhecidas cerca de 150 crateras de impacto, astroblemas, no mundo todo. Na América do Sul, a maior cratera já encontrada é conhecida como Domo de Araguinha, e localiza-se no Brasil, entre os estados de Goiás e Mato Grosso. Trata-se de uma cratera erodida, com aproximadamente 40 km de diâmetro, e mais de 1,300m<sup>2</sup> de área, cujo núcleo soerguido expõe rochas do embasamento (mais antigas que as rochas de borda), caracterizando impacto. Datações realizadas utilizando o método de K-Ar revelaram uma idade de 283,6±17,2 para esse domo, o que torna a cratera conhecida como a mais antiga da América do Sul.

Ao longo do tempo, os processos de fusão proporcionaram a diferenciação da Terra em camadas, em que elementos mais densos, Fe e Ni, passaram acumular-se no centro do planeta, e os mais leves, Si e Al, na parte externa. O material em contato com a parte externa do planeta resfriava-se, e aos poucos, uma camada rígida foi formada. A partir desse momento, o planeta encontrava-se dividido em três camadas: núcleo, manto e crosta, separadas por descontinuidades mapeadas por meio da geofísica e que definem zonas de contraste na propagação de ondas sísmicas (Figura 1.2).

Figura 1.2 | Perfil mostrando a divisão do planeta Terra em camadas limitadas por descontinuidades



Fonte: Fairchild et al. (2009, p. 85).

Na camada mais interna e sólida, o Fe, mais denso que Ni concentra-se no centro, formando o núcleo interno, que se estende de 5.100 km até 6.400 km de profundidade. O núcleo externo, formado por um material líquido fundido estende-se entre 5.100 km até 2.900 km. De acordo com o modelo do geodínamo, a convecção que ocorre no núcleo da Terra é o mecanismo responsável pela geração do campo magnético terrestre, cuja existência permitiu o surgimento da atmosfera. A partir de 2.900 km de profundidade encontra-se o manto, este que estende-se até os 40 km (em média), constituído em sua maioria por oxigênio, magnésio, ferro e silício.

À camada que habitamos, mais externa e fina (40 km de espessura em média), é dado o nome de crosta. Constituída por materiais leves como silício, alumínio, ferro, cálcio, magnésio, sódio e potássio, pode ser dividida entre dois tipos principais: continental e oceânica. A crosta continental é mais espessa, pode atingir até 70 km sob cordilheiras de montanhas, formada por rochas menos densas, ricas em silício e alumínio. Já a crosta oceânica é mais fina, constituída por rochas densas, ricas em olivinas e piroxênios, compostos principalmente por Ca e Mg.

A crosta, a camada mais externa e rígida da Terra, encontra-se dividida em blocos ou placas tectônicas que "flutuam" sobre o manto afastando-se ou convergindo na direção uns dos outros, sendo o mecanismo unificado que explica a distribuição dos terremotos e vulcões, a mudança na posição dos continentes e a origem das cadeias de montanhas e fossas oceânicas. Por muitos e muitos anos geólogos desenvolveram teorias para explicar processos responsáveis por gerar essas estruturas geológicas, mas somente após o surgimento da teoria da tectônica de placas é que explicações para muitos desses acontecimentos foi possível.

A Teoria da Deriva Continental foi apresentada por Alfred Wegener, um meteorologista alemão, em seu livro intitulado *A Origem dos Continentes e Oceanos*, publicado em 1915. Nele, Wegener defende que os continentes não são fixos e que estiveram reunidos no passado formando um único supercontinente chamado Pangea, que posteriormente

fragmentou-se em continentes menores que se afastaram lentamente, até alcançar as posições que conhecemos hoje.

Para suportar sua teoria, Wegener apresentou uma série de observações. Mostrou como as margens dos continentes sul-americano e africano pareciam se encaixar como num quebra-cabeça. Apontou a presença de depósitos glaciais em locais que hoje conhecemos como a Índia, Austrália, África e América do Sul, algo que só poderia ter ocorrido se esses continentes estivessem unidos. Identificou os mesmos tipos de rochas Pré-cambrianas nas bordas dos continentes da América do Sul e da África. Por fim, mostrou a ocorrência de fósseis das mesmas espécies em continentes diferentes. Um exemplo é o *Mesosaurus*, um réptil aquático que foi encontrado na América do Sul e na África.

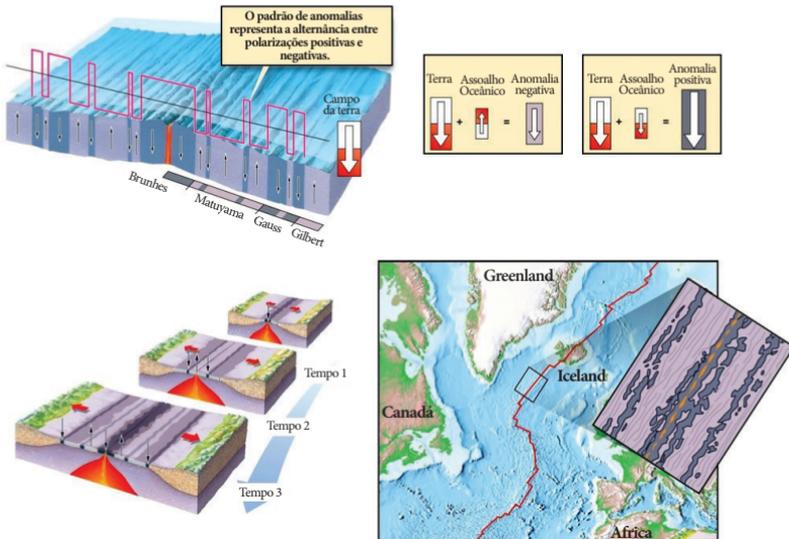
Apesar de todas as evidências apresentadas por Wegener, sua teoria não foi bem aceita no meio geocientífico, pois ele não conseguiu demonstrar quais eram as forças que movimentariam essas enormes massas de terra. Somente nos anos 60, trinta anos após sua trágica morte em uma expedição à Groelândia, com a descoberta de novos dados, é que se voltou a falar da Teoria da Deriva Continental.

Ao estudarem dados de batimetria e paleomagnetismo do assoalho oceânico, mapeados após a Segunda Guerra Mundial, geólogos perceberam que as anomalias magnéticas presentes nas rochas de fundo oceânico apresentavam o mesmo padrão de alternância entre polaridades positiva e negativa em lados opostos da dorsal (Figura 1.3). Como alguns minerais magnéticos têm capacidade de se orientar de acordo com o campo magnético terrestre preservando sua orientação nas rochas no momento em que elas são formadas (paleomagnetismo), durante a formação de crosta nas dorsais meso-oceânicas, os minerais, ao resfriarem, preservam dados de magnetização do campo magnético que devido ao espalhamento oceânico – a nova crosta gerada nas dorsais (já com campo magnético invertido) afasta a crosta antiga em direções opostas – dá origem este padrão "listrado" (Figura 1.3) no assoalho oceânico.



À capacidade de que alguns minerais magnéticos têm de se orientar de acordo com o campo magnético terrestre, preservando sua orientação nas rochas no momento em que elas são formadas, é dado o nome de paleomagnetismo.

Figura 1.3 | A relação das anomalias magnéticas e o padrão "zebrado" do assoalho oceânico com a tectônica de placas



Fonte: adaptada de Marshak (2008, p. 70, 71 e 72).

Como você já sabe, o manto da Terra é sólido, porém, é tão quente na base da crosta que exibe comportamento plástico, podendo fluir lentamente, na ordem de 1 a 15 cm por ano. Essa habilidade de fluir do manto é chamada de convecção. Neste processo, o manto mais raso e frio afunda, enquanto o manto mais quente ascende devido ao contraste de temperatura, formando células de convecção e favorecendo a movimentação das placas tectônicas.



### Exemplificando

A convecção é uma forma de transmissão de calor, que ocorre comumente em fluidos. O princípio da convecção está na

diferença de densidade entra massas quentes e frias. A massa quente tende a ser menos densa e ascender, ocupando o lugar das massas superiores e mais frias, formando ondas de convecção. Esse fenômeno pode ser observado em uma panela de água levada ao fogo (Figura 1.4), quando notamos algo que parecem bolhas de água vindo em direção à superfície.

Figura 1.4 | As correntes de convecção de calor



Fonte: <<https://www.istockphoto.com/br/vetor/correntes-de-convec%C3%A7%C3%A3o-gm185866469-27440744>>. Acesso em: 22 jan. 2018.

As placas se movimentam uma em relação à outra a partir de três tipos de limites: limite convergente, limite divergente e limite transformante, conforme a Figura 1.5. Em limites convergentes, ocorre a colisão de duas placas. A colisão pode ocorrer entre placas continental – oceânica, continental – continental ou oceânica – oceânica. Um exemplo de colisão entre duas placas de crosta continental está na cordilheira do Himalaia, pois como as duas placas são relativamente de baixa densidade, nenhuma afunda sob a outra, formando altas montanhas. A cordilheira dos Andes se desenvolveu a partir da colisão entre a placa oceânica do Pacífico e a placa continental da América do Sul. Por ser mais densa, a placa do pacífico afunda sob a placa sul-americana, formando uma zona de subducção. Atividade vulcânica ocorre associada a esse tipo de limite. Por fim, quando duas placas de crosta oceânica convergem,

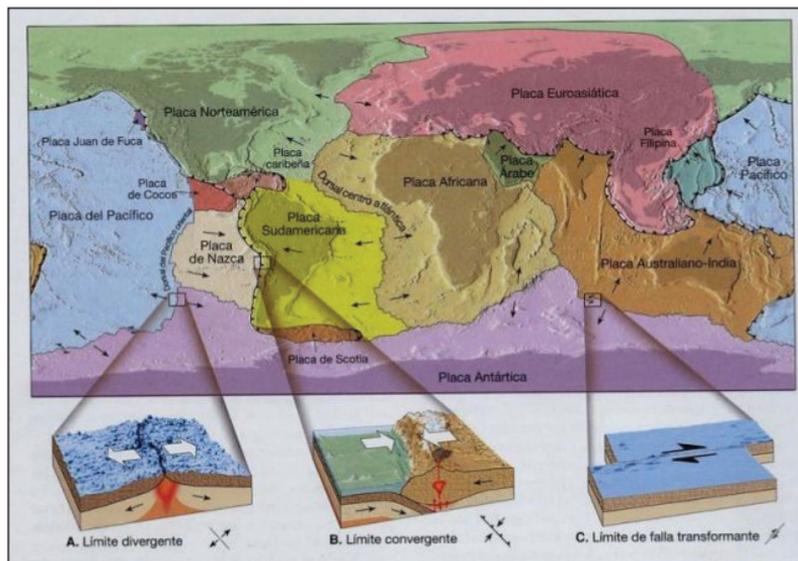
arco de ilhas vulcânicas se formam, como o Japão, por exemplo. Em um limite de placa do tipo divergente, duas placas oceânicas se afastam, um processo chamado de espalhamento do fundo oceânico, formando as cordilheiras meso-oceânicas, locais em que ocorre a geração de nova crosta oceânica para preencher o espaço gerado. Na transição entre esses dois limites, estão os limites transformantes, neles as placas deslizam lateralmente entre si, um exemplo famoso desse tipo de limite é a Falha de San Andreas, na Califórnia, EUA.



**Refleta**

O calor que vem do núcleo terrestre e as correntes de convecção são fundamentais para manter nosso planeta "vivo", é esse fenômeno que rege a movimentação das placas tectônicas. Por que não encontramos cordilheiras de montanhas em limites convergentes entre duas placas oceânicas?

Figura 1.5 | As placas tectônicas e os três tipos de limites entre placas: transformante, divergente e convergente



Fonte: <<http://roble.pntic.mec.es/afep0032/imagenes/limitesplacas.JPG>>. Acesso em: 2 nov. 2016.

Retomando o pensamento do início desta seção, você, como professor da disciplina de geografia de uma escola integral da região, resolveu que na sua primeira atividade como professor daria aos alunos a seguinte tarefa: escrever uma dissertação sobre “astroblemas e sua relação com a origem e evolução do Universo”. Como recentemente os noticiários destacaram que uma chuva de meteoros intensa atingiria a Terra na próxima semana, você resolveu debater melhor esse assunto. Para que os alunos possam aprender em sala um pouco do assunto, você precisa introduzir no início da próxima aula algumas informações sobre a temática, e responder estes questionamentos: qual a idade desse domo? Como domos se relacionam com a origem do nosso planeta? Quais as evidências de que essa estrutura de fato é um astroblema?

Como vimos, astroblemas são definidos como estruturas em forma de cratera resultante do choque com corpos celestes, por exemplo, meteoritos. Segundo essa definição, o Domo de Araguainha é considerado o maior astroblema da América do Sul, pois apresenta feições típicas de impacto, como rochas de metamorfismo de impacto e em seu núcleo afloram rochas mais antigas que as bordejantes, algo que só seria possível com a remoção das camadas superiores.

Sabe-se que o Domo de Araguainha tem aproximadamente 250 Ma, portanto não tem relação direta com a formação da Terra, ocorrida há 4,6 bilhões de anos. Ao contrário do que é possível observar na Lua, por exemplo, a Terra preserva poucas dessas crateras de impacto, pois sua dinâmica e a existência da atmosfera faz com que a erosão apague quaisquer tipos de evidência.

Então, de qual forma essa pequena estrutura pode estar relacionada à origem do planeta Terra? Sabe-se que após a grande explosão que deu origem ao Universo, conhecida como *Big Bang*, processos de nucleogênese deram origem aos elementos químicos. De acordo com a Teoria da Nebulosa, a força da gravidade passou a unir matéria e gases, concentrando matéria no centro, que com o passar do tempo torna-se extremamente quente, uma protoestrela, que posteriormente deu origem ao Sol. A força da gravidade passa então a atrair outros fragmentos, que colidem e unem-se formando os planetesimais, que se transformarão em planetas.

### Geologia planetária

#### Descrição da situação-problema

A escola regional na qual você é professor levará seus alunos para visitar o observatório de astronomia mais próximo, no qual também existe uma exposição de imagens dos demais planetas do Sistema Solar. Após observarem a Lua, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno e seus anéis no telescópio, vocês foram até a exibição fotográfica.

Analisando as fotos de Marte, notaram a ocorrência de feições como dunas, rochas acamadadas, vales, e também o Monte Olimpo, um vulcão extinto de mais de 22 km de altura, considerado a maior montanha do Sistema Solar. Os seus alunos notaram que essas estruturas não apareciam nos planetas de Júpiter e Saturno, e ficaram intrigados com a presença de estruturas tão similares às encontradas na Terra em um outro planeta.

Como professor, que entende os processos que formaram os planetas e essas estruturas, é seu dever responder aos questionamentos dos seus alunos, sendo eles: Por que esses planetas são tão diferentes? Como é possível que um vulcão tenha se formado em Marte?

#### Resolução da situação-problema

Os planetas do Sistema Solar são divididos entre rochosos (Mercúrio, Vênus, Terra e Marte) e gasosos (Júpiter, Saturno, Urano e Netuno). Os primeiros são constituídos por materiais rochosos e são densos, enquanto o segundo grupo é formado por gases e gelo. Isso explica a ausência do aspecto terráqueo nos planetas gasosos. Os anéis de Saturno, por exemplo, são constituídos de gelo e água.

Da mesma forma que a Terra, Marte formou-se por processos de acreção (aglomeração ou acúmulo de massa) de planetesimais, que ao chocarem-se transformam energia em calor, o que pode ter dado origem ao vulcanismo existente.

## Faça valer a pena

**1.** A Teoria do *Big Bang* postula que há aproximadamente 13,7 bilhões de anos toda a massa do Universo estaria concentrada em único ponto extremamente denso, que após uma explosão cataclísmica deu origem à matéria e encontra-se em expansão até hoje.

Qual dos fenômenos a seguir sustenta a teoria de que o Universo encontra-se em expansão?

- a) Teoria Heliocêntrica.
- b) Efeito Doppler.
- c) Atração gravitacional.
- d) Nucleogênese.
- e) Planetesimais.

**2.** A hipótese da Deriva Continental apresentada por Alfred Wegener dizia que os continentes estavam reunidos em um único supercontinente (Pangea), que subsequentemente se rompeu. Apesar de ter apresentado diversas evidências para suportar sua teoria, como as margens dos continentes sul-americano e africano parecerem se encaixar e a presença de espécies de fósseis e rochas idênticas em ambos os continentes, sua hipótese só foi aceita anos depois, após sua morte, com o surgimento da teoria de expansão do assoalho oceânico.

Sobre esta teoria, é correto dizer que ela se baseia em evidências que advêm do (a):

- a) Batimetria.
- b) Deriva continental.
- c) Plumas mantélicas.
- d) Placas divergentes.
- e) Paleomagnetismo.

**3.** O planeta passou por processos de diferenciação ao longo de sua história geológica. Devido a esses processos, a Terra encontra-se dividida em camadas de diferentes

composições e densidades conhecidas como: crosta, manto superior, manto inferior, núcleo externo e núcleo interno.

Sobre as camadas da Terra, sua composição e divisão, é correto afirmar:

- a) Crosta e manto inferior são separados pela descontinuidade de **Mohorovičić**.
- b) A descontinuidade de **Mohorovičić** separa o manto do núcleo terrestre.
- c) Crosta e manto superior são separados pela descontinuidade de Gutenberg.
- d) Crosta e manto superior são separados pela descontinuidade de **Mohorovičić**.
- e) A descontinuidade de Gutenberg separa o manto superior do manto inferior.

# Seção 1.2

## Ciclo das rochas

### Diálogo aberto

Na seção anterior vimos as teorias que explicam o surgimento do Universo, do Sistema Solar e os processos que deram origem ao nosso planeta, incluindo a formação de rochas e minerais, fundamentais para compreender como funciona a dinâmica da Terra e sua influência em nossas vidas.

É incomum que as pessoas prestem atenção nos tipos de rochas que as rodeiam, a maioria sequer percebe as diferenças, muito menos nos minerais que as constituem. Poucos sabem que diferentes minerais são encontrados em rochas específicas, e conhecer essa relação é fundamental para entender a evolução do meio físico em que vivemos.

Certo dia, um aluno chegou intrigado, ele queria saber como era possível que perto da sua casa as rochas fossem de cor esverdeada, apresentassem camadas e quebrassem facilmente, ao passo que nas proximidades da escola o que se encontrava era uma rocha muito dura, resistente, alaranjada e com "pontinhos" pretos e cinzas distribuídos aleatoriamente. Isto então deu a você uma ideia de atividade a ser realizada em sala de aula, uma vez que agora você está no papel de um professor de uma escola local, lembra?

Para exercitar a capacidade dos alunos de reconhecer diferentes tipos de rocha e associar os constituintes mineralógicos com o ambiente de formação dessas rochas, você sabendo que granitos e xistos podem ser encontrados facilmente na sua região, pediu que cada aluno trouxesse para a aula do dia seguinte dois tipos de rochas que julgasse diferentes e que fossem encontradas no caminho entre a escola e a casa de cada um. No dia seguinte, com as amostras trazidas pelos alunos em mãos, você os levou até o laboratório de ciências para uma aula prática de descrição de minerais e rochas. Além das amostras que cada um trouxe, você entregou um cristal de

quartzo e outro de mica para cada um, dois exemplares de minerais que constituem as rochas por eles escolhidas, junto com uma placa de cerâmica, vidro e lâmina metálica, para que eles pudessem testar as propriedades dos minerais. Ao final da aula, você pediu-lhes que entregassem um pequeno relatório contendo a descrição das propriedades de cada mineral.

Para fazer esse relatório, responda às questões a seguir, sendo este, portanto, o seu desafio nesta seção: ao descrever os minerais você deve analisar suas propriedades. Então, por exemplo, (I) Qual é o tipo de brilho do quartzo? (II) A mica apresenta um plano de clivagem bem definido? (III) É possível riscar a mica com a unha? (IV) Qual a sua dureza na escala de Mohs? (V) Qual a dureza do quartzo?

Para responder a essas questões você deve ficar atento às propriedades diagnósticas intrínsecas a cada fase mineral, desde sua fórmula química até propriedades externas, como forma e brilho, diretamente relacionadas também com o tipo de rocha em que cada mineral está presente.

## Não pode faltar

Agora que você sabe como o Universo e o Sistema Solar se originaram e quais os processos que regem a dinâmica do planeta Terra, é hora de conhecer os materiais que o constituem, os minerais e as rochas.

Você pode não imaginar, mas somos completamente dependentes dos minerais. Eles estão presentes em nosso dia a dia constituindo os carros, os computadores, os smartphones, e até o dinheiro que usamos. O que é um mineral? Por definição, um mineral é um sólido (geralmente inorgânico) de ocorrência natural, formado por processos geológicos, que possui estrutura interna ordenada. Desta forma, um diamante produzido sinteticamente em laboratório, apesar de ser um sólido com estrutura interna ordenada, não pode ser considerado um mineral.

Minerais são naturalmente formados por processos de solidificação do magma, precipitação a partir de uma solução, difusão no estado sólido, biomineralização ou diretamente de um

vapor. Quando o magma começa a resfriar, os átomos começam a unir-se em estruturas sólidas, dando origem aos minerais num processo semelhante ao congelamento da água. Cristais se precipitam de uma solução quando esta encontra-se saturada e os íons dissolvidos passam a formar ligações e a "crescer" dentro do líquido.



## Assimile

Para ser considerado um mineral, o material precisa ser cristalino.

Um cristal é um sólido que apresenta estrutura atômica interna ordenada. Ao crescer, esta estrutura se repete e dá origem às formas geométricas que terminam em planos, as chamadas faces cristalinas.

A face de um mineral nada mais é que a expressão externa do arranjo interno dos átomos.

Figura 1.6 | Esquema representativo da repetição de ligações químicas que dão origem às faces do cristal



Fonte: <<http://docplayer.com.br/docs-images/25/5058243/images/10-0.jpg>>. Acesso em: 29 out. 2016.

Conforme os cristais crescem – se houver espaço – desenvolvem o hábito cristalino, baseado em sua estrutura interna e formam cristais euédricos, ou seja, todas as faces do cristal são bem formadas. Quando o crescimento das faces de um mineral é limitado pela presença de outros cristais que agem como obstáculos, a forma de suas faces é controlada pelo espaço disponível, e os cristais são denominados de anédricos.

Minerais são elementos ou compostos químicos de composição definida, e como tais apresentam ligações químicas. As mais comuns

nos minerais são as ligações covalentes e as ligações iônicas, e são elas que definem a resistência dos minerais. Ligações iônicas são as mais comuns (90% dos minerais) e também as mais simples, pois são formadas pela atração elétrica entre íons de cargas opostas, já nas ligações covalentes os átomos unem-se pelo compartilhamento de elétrons.



## Exemplificando

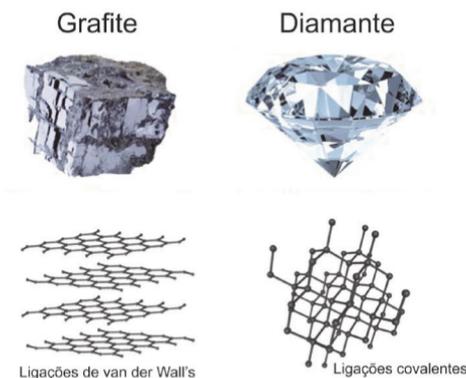
Diamante e grafita são dois minerais constituídos unicamente pelo elemento químico carbono (C), porém são totalmente distintos.

Um é o mineral mais duro que conhecemos, translúcido e de um brilho intenso, ao contrário do grafite, que é opaco e muito frágil. Por quê?

Porque eles são polimorfos. Quando minerais apresentam a mesma composição química, porém hábitos diferentes, são chamados de polimorfos.

Os átomos de carbono apresentam ligações químicas diferentes, no diamante, cada átomo de C encontra-se unido a mais quatro átomos de C por ligações covalentes, formando um tetraedro. Como as ligações covalentes são fortes, o diamante é muito duro. Já no grafite, os átomos formam "folhas" (Figura 1.7), e não tetraedros, e estas folhas são ligadas por fracas ligações de van der Waals.

Figura 1.7 | Cristais de grafite e diamante e suas respectivas ligações químicas



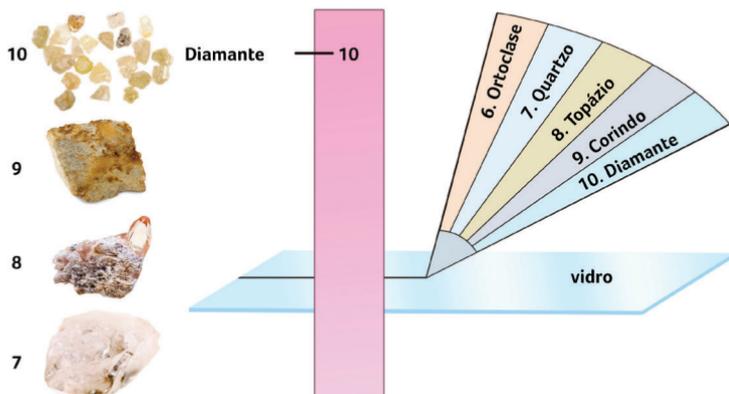
Fonte: adaptada de <<http://www.philosophyib.com/3/images/slides/gvsd.jpg>>. Acesso em: 29 out. 2016.

Como atualmente conhecemos quase 4.000 minerais distintos, os geólogos utilizam algumas propriedades para diferenciá-los, além do já mencionado hábito, como: cor, traço, brilho, dureza, densidade, fratura e clivagem.

A cor do mineral é resultado de sua interação com a luz, de forma que alguns não apresentam variação de cor enquanto outros podem apresentar diversas colorações. A variação na coloração é atribuída à presença de pequenas impurezas presentes na estrutura do cristal. O traço de um mineral refere-se à cor do pó que ele deixa ao ser riscado contra uma superfície áspera de maior dureza que a sua própria. Por apresentar menor variação que a cor do mineral em si, é uma informação importante na identificação mineral.

Por brilho refere-se à maneira como o mineral reflete a luz. Para definir o brilho, compara-se o mineral com uma substância familiar. Os brilhos mais comuns são: metálico, resinoso, sedoso, perolado e vítreo, como o quartzo, por exemplo. Dureza é a resistência que os minerais apresentam ao serem riscados. Está diretamente relacionada com as ligações químicas dos cristais, em que átomos com ligações mais fortes são mais resistentes ao risco que minerais de ligações fracas. A dureza dos minerais é listada em uma escala conhecida como "escala de dureza de Mohs" (Figura 1.8), e é uma importante aliada na identificação dos minerais. A mica e o talco podem ser considerados exemplos de baixa dureza (1-2), ao passo que o diamante apresenta alta dureza (10).

Figura 1.8 | A escala de dureza de Mohs lista a dureza de alguns dos minerais mais comuns, e os compara com a dureza de outros materiais





Fonte: <[http://www.notapositiva.com/old/pt/trbestbs/geologia/imagens/determinar\\_dureza\\_materiais\\_01\\_d.jpg](http://www.notapositiva.com/old/pt/trbestbs/geologia/imagens/determinar_dureza_materiais_01_d.jpg)>. Acesso em: 30 out. 2016.

A densidade de um mineral tem relação direta com os elementos que o constituem, o quartzo, por exemplo, tem uma densidade específica de  $2.65 \text{ g/cm}^3$ , enquanto a densidade específica do chumbo é de  $11 \text{ g/cm}^3$ . Você pode reconhecer a densidade relativa como o peso de um mineral ao pegá-lo em sua mão. O hábito mineral refere-se à forma do cristal com faces bem formadas. O hábito depende da estrutura interna do cristal e sua descrição geralmente é comparada às formas geométricas, como hábito cúbico ou prismático.

Fratura e clivagem são propriedades diagnósticas relacionadas. A clivagem é definida como um plano de fraqueza marcado por ligações fracas em um mineral. Os cristais podem apresentar um, dois ou até três planos de clivagem, como é o caso da calcita. As micas, por sua vez, apresentam um plano de clivagem bem definido. Quando o cristal não quebra ao longo de planos de clivagem, até mesmo porque não apresenta nenhum, dá-se o nome de fratura.

Para facilitar a classificação, os minerais foram divididos em grupos de acordo com sua composição química, em especial de acordo com seu radical aniônico: silicatos, óxidos, sulfetos, sulfatos, haletos, carbonatos e elementos nativos. Além das similaridades químicas, esses grupos ocorrem em condições geológicas semelhantes, por isso sua associação.

Os silicatos são os constituintes fundamentais de quase todas as rochas do planeta, por isso são também chamados de minerais formadores de rochas. Esse grupo é caracterizado pela presença de um átomo de silício ( $\text{Si}^{4+}$ ) circundado por quatro de oxigênio ( $\text{O}^{2-}$ ), formando um tetraedro ( $\text{SiO}_4^{4-}$ ). São minerais silicáticos comuns o quartzo e a olivina, por exemplo. Os óxidos consistem de cátions metálicos ligados a ânions de oxigênio e fazem parte deste grupo hematita e magnetita. Sulfetos são formados pela ligação entre um cátion metálico e um ânion de sulfeto. Assim como nos óxidos, o componente metálico constitui grande parte do mineral, dessa forma, muitos sulfetos são também minerais de minério, como a galena, fonte de chumbo, e a esfarelita, fonte de zinco. Sulfatos são constituídos pela ligação entre um cátion metálico e um ânion do grupo  $\text{SO}_4^{2-}$ . É comum que sulfatos se precipitem da água, na superfície da Terra, como é o caso da gipsita. Haletos apresentam  $\text{Cl}^-$  ou  $\text{F}^-$  em sua estrutura, os mais comuns são halita ( $\text{NaCl}$ ) ou cloreto de sódio, o nosso sal de cozinha, e a fluorita ( $\text{CaF}_2$ ) de onde o flúor utilizado em produtos dentários é extraído. Carbonatos, como a calcita e a dolomita, contêm  $\text{CO}_3^{2-}$  em sua estrutura. Por fim, temos os elementos nativos, que são os constituídos puramente por um único elemento metálico, cobre e ouro são bons exemplos de elementos que ocorrem quase sempre em sua forma nativa.



**Pesquise mais**

Para que o assunto fique mais ilustrado, sugerimos assistir à aula abaixo sobre os minerais constituintes das rochas, que está disponível gratuitamente na internet.

BOUROTTE, C. L. M. **Minerais constituintes das rochas**. 33'07". Disponível em: <<http://eaulas.usp.br/portal/video.action?idItem=396>>. Acesso em: 31 out. 2016.

Normalmente, analisamos os minerais de forma separada, mas sua ocorrência natural mais comum é na forma de um agregado de minerais, ao qual damos o nome de rocha. A grande maioria das rochas do planeta encontra-se coberta pelo solo e a vegetação, porém a partir dos locais em que estão expostas na superfície, é possível estudar essa grande variedade de rochas que desenvolveram-se ao longo dos 4,6 bilhões de anos de história geológica do planeta Terra.

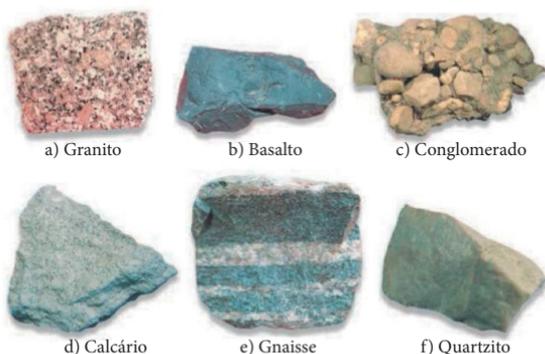
A inúmera variedade de rochas encontradas na crosta terrestre pode ser agrupada em três tipos: (I) ígnea, (II) metamórfica e (III) sedimentar, de acordo com o processo que as originou. O primeiro grande grupo (I) são as rochas ígneas, também chamadas de magmáticas, pois se formam por meio do resfriamento do magma. Quando esse resfriamento ocorre no interior da crosta terrestre, denominamos as rochas de ígneas intrusivas ou plutônicas, ao passo que, caso esse arrefecimento ocorra na superfície terrestre, chamamos de rochas ígneas extrusivas ou vulcânicas. A taxa de resfriamento irá influenciar, neste caso, a textura das rochas. Àquelas que se formam em profundidade, resfriam-se lentamente e a consequência mais notável é que seus minerais serão mais bem formados, sendo fácil distingui-los a olho nu (dizemos que sua textura é fanerítica). Em contrapartida, as que se formam na superfície se resfriam rapidamente, fazendo com que os minerais sejam bem menores, comumente irreconhecíveis a olho nu (dizemos que sua textura é afanítica). Isso é visível se compararmos um granito, rocha ígnea plutônica, com um basalto, rocha ígnea vulcânica (Figuras 1.9a e 1.9b).



### Refleta

Como é possível que duas rochas tão distintas, como o granito e o basalto, que inclusive possuem processos genéticos diferentes, possam ser encontradas atualmente lado a lado em algumas ocasiões?

Figura 1.9 | Tipos de rochas representativas dos três grupos de rochas da Terra: a) granito – rocha ígnea plutônica; b) basalto – rocha ígnea vulcânica; c) conglomerado – rocha sedimentar clástica; d) calcário – rocha sedimentar bioquímica; e) gnaiss – rocha metamórfica e f) quartzito – rocha metamórfica.



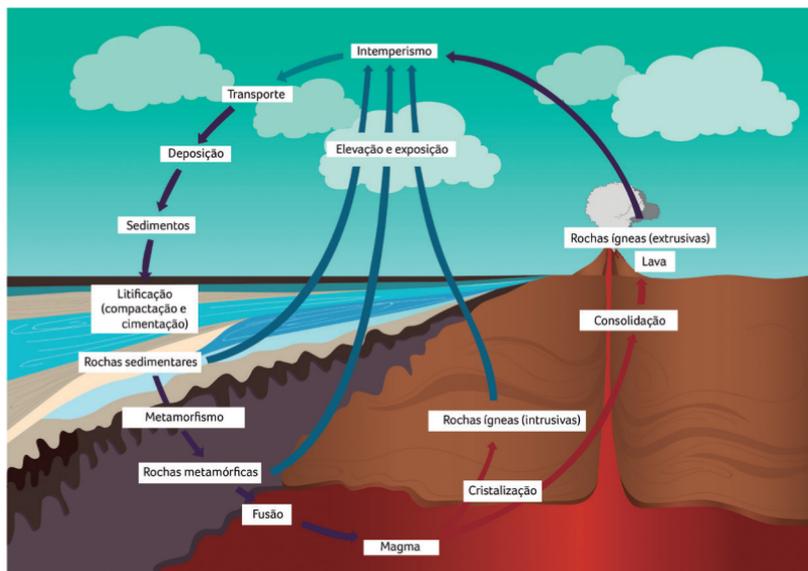
Fonte: adaptada de Wicander e Monroe (2009, p. 20).

O segundo grande grupo (II) é o das rochas metamórficas. Como o próprio nome indica, elas se originam a partir da transformação de uma rocha pretérita (protólito) quando submetida a novas condições de pressão e temperatura, modificando sua mineralogia, textura ou composição química, sem nunca deixar de ser rocha sólida. Dessa forma, as temperaturas não ultrapassam a temperatura de fusão do protólito, mas são altas o suficiente para estimular reações químicas e recristalização mineral. O gnaisse (Figura 1.9e) e o quartzito (Figura 1.9f) podem originar-se, respectivamente, do granito e do arenito rico em quartzo.

As rochas sedimentares (III), últimas representantes dos grupos de rochas que possuímos, formam-se pela consolidação de sedimentos, ou seja, de fragmentos de outras rochas que foram intemperizadas, erodidas, transportadas e depositadas em bacias sedimentares. Há dois tipos de rochas sedimentares: 1) clásticas, depositadas fisicamente como grãos; e 2) bioquímicas, substâncias químicas que se formam por precipitação, muitas vezes induzida pela atividade biológica. O conglomerado (Figura 1.9c) é um exemplo da primeira, enquanto o calcário (Figura 1.9d) da segunda. Para que os sedimentos passem pelo processo de litificação, ou seja, sejam transformados em rocha consolidada, são necessários ao menos dois fenômenos: primeiro, deve haver compactação para que os grãos formem um arcabouço mais coeso e segundo, para que os sedimentos se unam, é preciso haver cimentação.

Como você já deve ter percebido, há diferentes processos envolvidos nesses três grupos de rochas, de forma que encontrá-las na natureza não é mero acaso. Como você viu na seção anterior, a tectônica de placas é a força motriz de todos os processos geológicos da Terra e a interação entre eles também influencia a geração, transformação e “destruição” das rochas, num esquema denominado ciclo das rochas (Figura 1.10).

Figura 1.10 | A relação direta entre rochas ígneas, sedimentares e metamórficas no contexto do ciclo das rochas



Fonte: adaptada de Wicander e Monroe (2009, p. 18).

Observando a Figura 1.10, é possível notar que as rochas ígneas se originam por meio da cristalização do magma. Estas, ao sofrerem soergimento e exposição às ações intempéricas, fragmentam-se na forma de sedimentos que, por sua vez, são transportados e depositam-se para, posteriormente, sob a ação da diagênese (compactação e cimentação) transformarem-se em rochas sedimentares. Tanto as rochas sedimentares quanto as ígneas, ao sofrerem um aumento de pressão podem originar as rochas metamórficas, fechando o ciclo.

## Sem medo de errar

Anteriormente você pediu para os seus alunos descreverem os minerais de quartzo e mica, encontrados nos xistos e granitos nas proximidades da escola, para que aprendessem a identificar minerais. A resposta dessa situação-problema irá variar de acordo com os minerais e rochas em questão, porém, neste caso, estamos tratando de xisto (rocha metamórfica) e granito (rocha ígnea plutônica) e dos minerais quartzo e mica.

Você deverá responder: (I) Qual é o tipo de brilho do quartzo? (II) A mica apresenta um plano de clivagem bem definido? (III) É possível riscar a mica com a unha? (IV) Qual a sua dureza na escala de Mohs? (V) Qual a dureza do quartzo?

Ao descrever os minerais, você deve analisar as propriedades descritas no texto, por exemplo, o brilho do quartzo é vítreo (questão I), do plagioclásio é resinoso e da mica pode variar de perolado a vítreo.

Vimos que a mica apresenta um plano de clivagem bem definido (resposta questão II), enquanto o quartzo não apresenta nenhum, por isso sua fratura é conchoidal. O risco de ambos os minerais é incolor. Sabe-se que é possível riscar a mica com a unha (resposta questão III), portanto sua dureza não passa de 2 na escala de Mohs (resposta questão IV). Já o quartzo risca o vidro (Figura 1.8), o que indica que este mineral tem uma dureza maior que 6 (resposta questão V).

## Avançando na prática

### Feira mineralógica

#### Descrição da situação-problema

Você foi acompanhar seus alunos na feira de ciências do estado, a qual é realizada anualmente. Nesse evento, o tema central era “O planeta Terra e as mudanças climáticas”, um assunto muito debatido atualmente. No espaço em que estava acontecendo a feira havia um stand patrocinado por uma grande empresa mineradora, a qual decidiu expor um conjunto de rochas e minerais e, para ilustrar suas utilidades nos dias modernos, relacionou os bens econômicos para os quais eles servem de matéria-prima.

O stand era o mais visitado da feira e muitos jovens estavam interessados nas rochas exóticas e minerais raros que haviam sido expostos, de forma que seus alunos estavam muito curiosos e cheios de perguntas. Um de seus alunos, ao perceber que havia vários minerais distintos e rochas variadas, ficou confuso: “Professor, não consigo entender a diferença entre mineral e rochas, como posso diferenciá-los”?

Outro, ao ver que havia minerais bem formados e outros nem tanto, uns com um brilho metálico e outros com aspecto nacarado, e alguns fraturados e outros “quebrados” segundo direções definidas, ficou pensativo e perguntou-lhe: “Há uma infinidade de diferentes minerais aqui, como é possível distinguir qual é qual? Existe algum método?”

### **Resolução da situação-problema**

Para responder às perguntas de seus alunos, primeiro é preciso que você relembre o que aprendeu nesta seção. Recorde-se que mineral é um sólido (geralmente inorgânico) de ocorrência natural, formado por processos geológicos, que possui estrutura interna ordenada. São compostos por elementos químicos que o definem como um objeto único, singular. Já as rochas são um conjunto de minerais que, normalmente, apresentam composição química diferentes, definindo um agregado natural de minerais. Para facilitar o entendimento de seus alunos, use o exemplo de uma casa como analogia. Os tijolos que formam a casa são os minerais, enquanto a casa, como um todo, é a rocha. Dessa maneira, eles entenderão mais facilmente.

Com relação à última pergunta, diga a seu aluno que é possível diagnosticar os minerais de diferentes maneiras, porém, de forma mais usual, utilizamos as propriedades físicas dos minerais como uma alternativa mais prática. Dessa forma, destaque que essa diferenciação é baseada na: cor do mineral, cor do traço deixado pelo mineral ao riscar uma placa de porcelana, brilho, dureza do mineral comparada a uma escala (a escala de Mohs), densidade (muitas vezes comparada com objetos de densidade conhecidos), capacidade dos minerais de fraturar e/ou partir-se em clivagem.

### **Faça valer a pena**

**1.** Desde a postulação do uniformitarismo por James Hutton, os geólogos entendem que o princípio básico do planeta Terra é o seu dinamismo. Essa dinâmica é facilmente observada nos diversos processos de transformação que caracterizam o ciclo das rochas, que produzem alteração na composição mineralógica e propiciam os três tipos de rochas: ígneas, metamórficas e sedimentares.

Sobre as características do ciclo das rochas é correto afirmar que:

- a) O processo que leva à formação das rochas metamórficas é o arrefecimento do magma.
- b) O processo que leva à formação das rochas sedimentares é o resfriamento do magma.
- c) O processo que leva à formação das rochas sedimentares é a litificação.
- d) O processo que leva à formação das rochas ígneas é a litificação.
- e) O processo que leva à formação das rochas metamórficas é a litificação.

**2.** Nos dias atuais é difícil imaginar nossas vidas sem a tecnologia, muitas pessoas chegam a sofrer estresses consideráveis por abstinência de equipamentos eletrônicos. O que poucos de nós sabemos é que para o funcionamento dessas maravilhas tecnológicas, como smartphones, tablets e notebooks, materiais geológicos como os minerais são fundamentais.

Assim, a respeito das características gerais dos minerais é correto afirmar que:

- a) Um mineral é uma substância gasosa.
- b) Um mineral é uma substância líquida.
- c) Um mineral é uma substância com composição química geral.
- d) Um mineral é uma substância com composição química específica.
- e) Um mineral só é considerado mineral se for produzido sinteticamente.

**3.** As rochas do planeta são agrupadas em três grupos de acordo com o seu processo de origem. São denominadas rochas ígneas, ou magmáticas, aquelas geradas a partir do resfriamento do magma.

Sobre a relação entre o resfriamento do magma e as rochas ígneas, é correto afirmar:

- a) O basalto é um exemplo de rocha plutônica.
- b) O quartzo é uma rocha ígnea extrusiva.
- c) O granito é uma rocha ígnea extrusiva.
- d) O granito é uma rocha ígnea intrusiva.
- e) O gnaisse é uma rocha plutônica.

# Seção 1.3

## Geologia estrutural

### Diálogo aberto

Finalizando o nosso processo de construção de conhecimento da unidade sobre a estrutura interna da Terra e sua dinâmica interna, bem como sobre os processos estruturais básicos da Terra e o ciclo das rochas, o objeto de estudo desta seção será a geologia estrutural. Esta área da geologia estuda as estruturas presentes nas rochas e, além da sua descrição, preocupa-se em entender quais os seus processos formadores, ou ainda quais feições podem ser resultado de um evento de deformação. Mapear e conhecer tais aspectos é essencial não só na hora de desvendar como ocorreu a evolução geológica de determinadas regiões, mas também na identificação de recursos naturais como petróleo, gás, água e outros recursos minerais fundamentais em nosso dia a dia.

Levando em conta o contexto da nossa seção, vamos retornar à nossa situação próxima da realidade profissional, em que você é um professor de uma escola local. Imagine agora que para fazer com que seus alunos assimilem melhor esse conteúdo, você aproveitou o fato de que há aproximadamente uma semana, em uma cidade distante 60 km da escola em que você trabalha, ocorreu um terremoto de 3,7 graus na escala Richter. O mais curioso é que a cidade não está situada em um local susceptível à ocorrência de terremotos, como bordas de placas tectônicas, por exemplo. Felizmente esse acontecimento não causou nenhum dano material ou vítimas fatais. De qualquer maneira, geólogos foram chamados para avaliar as causas desse tremor e a possibilidade de nova ocorrência de tal fato.

Como você estava ensinando justamente sobre terremotos aos seus alunos na disciplina de geografia física, você propôs que cada aluno escolhesse um evento documentado em que a ocorrência de terremotos tenha, ou não, causado grandes danos para depois explicar as seguintes questões: quais os processos que dão origem

aos terremotos, quais os tipos de estruturas que eles podem formar? Por que alguns terremotos causam mais danos do que outros? Por que a incidência desses eventos é mais comum em algumas áreas do que em outras? É possível prever a ocorrência de tremores?

E você, como responderia a esses questionamentos? Para respondê-los, inicie o autoestudo desta seção, no qual aprenderemos sobre os princípios básicos que regem o processo de deformação das rochas, destacando os seus diferentes padrões de comportamento e fatores que os influenciam. Além disso, veremos os tipos de estruturas geológicas mais comuns, quais seus elementos geométricos e como fazemos para estudá-las em campo. Por último, estudaremos a relação entre as forças atuantes nas rochas com os terremotos, que são eventos sísmicos de grande energia.

## Não pode faltar

Agora que você já conhece alguns dos processos formadores das rochas, é importante que você aprenda a reconhecer e entender estruturas presentes nas rochas, como dobras e falhas. Mapear e conhecer tais feições é essencial não só na hora de desvendar como ocorreu a evolução geológica de determinadas regiões, mas também na identificação de recursos naturais como petróleo, gás, água e outros recursos minerais (ouro, nióbio, ferro etc.).

A geologia estrutural é o ramo da geologia que estuda as estruturas deformadas presentes na litosfera, estando particularmente interessada na investigação de suas causas, processos e aspectos geométricos, variando desde a escala milimétrica até a escala continental.

Cada estrutura representa o resultado de uma determinada deformação sofrida pelo volume de rochas em questão. Em geologia estrutural a deformação pode incluir componentes de translação, rotação, distorção (*strain*) e dilatação (Figura 1.11). A translação envolve a mudança de posição de todos os componentes da rocha na mesma direção e distância. O termo rotação é usado para se descrever a rotação física uniforme do corpo de rocha. Em ambos os casos o corpo rígido se move de maneira intacta, sem alteração de forma ou tamanho. Quando há alteração na forma e volume, tem-se

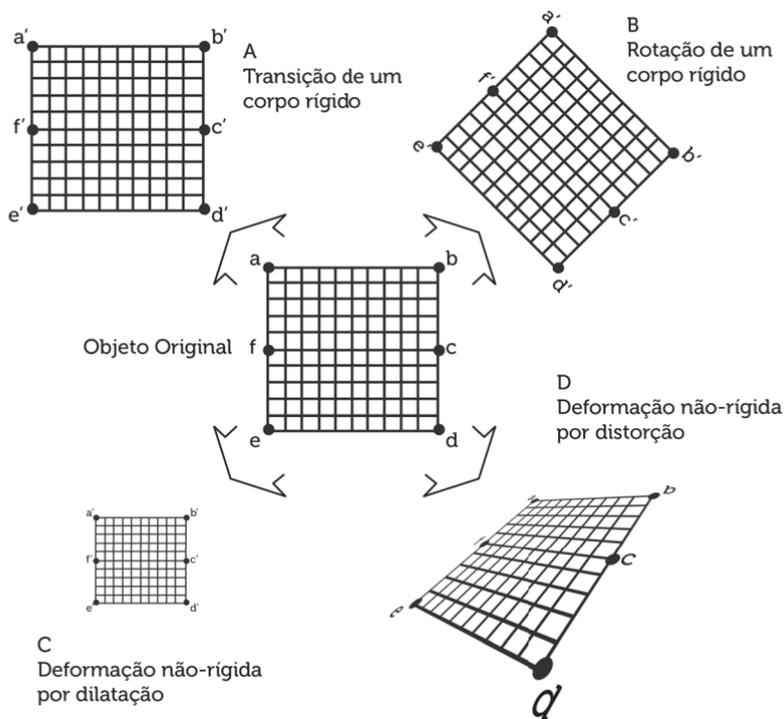
dilatação ou distorção. A dilatação é caracterizada pela mudança de volume, já a distorção é definida como qualquer alteração de forma, orientação, comprimento e espaçamento de um material, com ou sem variação de volume.



## Assimile

Deformação é a transformação da rocha de uma geometria inicial para uma geometria final por meio de: translação ou rotação do corpo rígido, esforço (strain) e/ou alteração no volume.

Figura 1.11 | Componentes da deformação

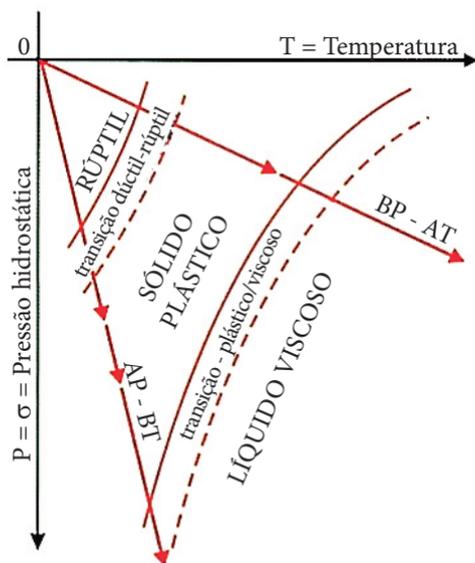


Fonte: adaptada de Davis, Reynolds e Kluth. (2011, p. 119).

Além disso, as condições nas quais ocorrem a deformação também influenciam o comportamento da rocha diante da atuação dos esforços. Dentre essas condições, é importante destacar o papel

da pressão e temperatura, as quais estão relacionadas à profundidade em que as rochas se encontram na crosta no momento da deformação. Quando uma rocha se encontra no regime rúptil, ela tem um comportamento frágil com deformação permanente, sendo que a rocha fragmenta-se por fraturamento. Neste caso, a rocha permanece rígida durante a ação do esforço e, por isso, tende a apresentar-se quebradiça. Já as rochas sob a influência do regime dúctil deformam-se lentamente, comportando-se de forma elástica, não apresentando feições de ruptura, isto é, a rocha molda-se (como um objeto maleável) sem fragmentar-se. A Figura 1.12 mostra os diferentes tipos de resposta que uma rocha pode apresentar conforme se aumenta a temperatura, ou seja, sua característica reológica.

Figura 1.12 | Regimes reológicos que as rochas da crosta estão submetidas



Fonte: Teixeira et al. (2009, p. 403).

Portanto, como podemos ver, existem dois domínios geológicos que podemos distinguir em termos de deformação, o superficial (rúptil) e o profundo (dúctil). Esses dois níveis crustais irão ditar o comportamento mecânico-deformacional da rocha e, conseqüentemente, a formação das estruturas geológicas mais comuns: dobras e falhas.

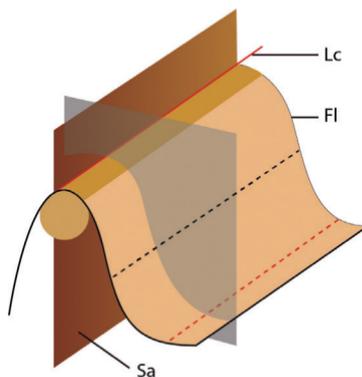


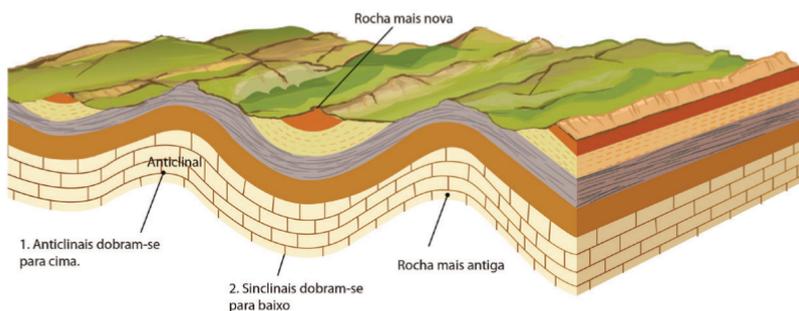
O estudo do comportamento mecânico das rochas é chamado reologia. É o comportamento reológico dos materiais (minerais/rochas) que determinará como um corpo responde à deformação sob determinadas condições de pressão (P) e temperatura (T).

As dobras são estruturas dúcteis que encontramos associadas, normalmente, às zonas de compressão, que são zonas de intensa deformação. Sua característica mais notável é a ocorrência de ondulações na rocha (seja ela sedimentar, ígnea ou metamórfica), gerando uma feição estrutural de encurvamento das estruturas anteriormente planares, como o acamamento sedimentar, por exemplo. Como essas estruturas são complexas, a melhor maneira de estudá-las é identificando alguns elementos geométricos dessas estruturas. Dessa maneira, é possível entender melhor a história deformacional e até mesmo a distribuição geográfica das dobras.

Conforme mostra a Figura 1.13a, há pelo menos três elementos importantes para descrever uma dobra: a) a linha de charneira (Lc), que corresponde à linha que une os pontos de maior curvatura; b) o plano (superfície) axial (Sa), plano paralelo à linha de charneira e ortogonal aos flancos; e c) os flancos (Fl), os dois planos laterais da dobra que mergulham em sentidos opostos. O reconhecimento desses elementos, aliado ao conhecimento da idade das rochas, nos ajudam na classificação dessas estruturas em campo e também no entendimento da história tectônica.

Figura 1.13 | a) Elementos geométricos principais das dobras; e b) dobras contínuas, formando um arranjo de anticlinais e sinclinais





Fonte: Teixeira et al. (2009, p. 403).

As rochas dobradas em forma de arco em que os flancos formam uma estrutura côncava para baixo são denominadas anticlinalis, desde que as rochas mais antigas estejam abaixo e as mais novas acima. Contrariamente, as rochas dobradas com os flancos formando uma estrutura com concavidade para cima, são chamadas de sinclinalis (Figura 1.13b). Essas observações, apesar de parecerem simples, são difíceis de serem constatadas em campo, devido, muitas vezes, à magnitude do dobramento.

Logo, para que possamos interpretar a distribuição das dobras tridimensionalmente, é preciso realizar medições com o auxílio de uma bússola geológica. As principais atitudes medidas em campo são a direção e o mergulho. A direção é orientação geográfica (por exemplo, 20° para nordeste – a qual denotamos N20E) de uma camada rochosa (ou alguma estrutura/elemento geométrico da estrutura geológica) dada pela intersecção desta com a superfície horizontal. O mergulho, por sua vez, é o ângulo de inclinação que a camada rochosa forma com a superfície horizontal. Medimos esse ângulo perpendicularmente (90°) à direção.



**Refleta**

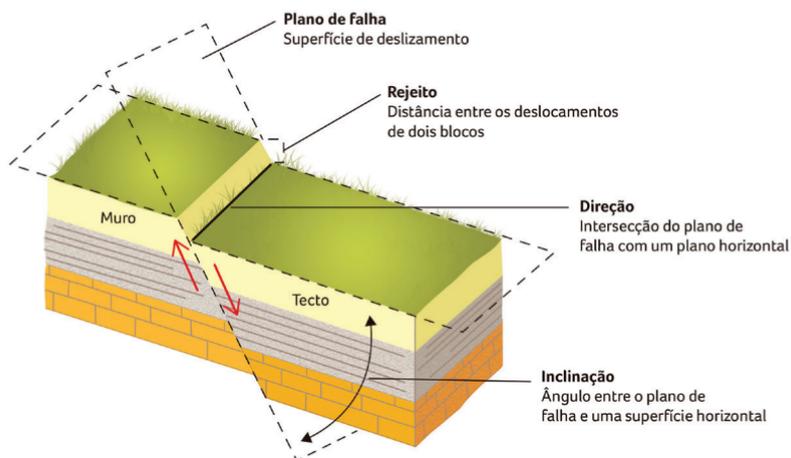
É possível que ocorra a formação de dobras que não tenham relação com a atividade tectônica? Quais condições dariam origem a essas estruturas, se elas existirem?

Quando a deformação ocorre nas porções mais superiores da crosta, ou seja, regime rúptil, as rochas não têm capacidade de acomodar o stress e deformam-se por fraturamento, originando

falhas, estas são expressas na forma de superfícies descontínuas ao longo da qual ocorreu deslocamento. É necessário que tenha havido deslocamento para que uma superfície de descontinuidade seja considerada uma falha, caso contrário, será classificada como junta ou fratura.

Em geral, falhas são facilmente identificadas em fotos de satélite e podem ser formadas em diversos ambientes tectônicos e regimes deformacionais: compressivos, distensivos ou cisalhantes. Geometricamente são divididas em dois blocos, muro e teto, separados por um plano de falha inclinado (Figura 1.14).

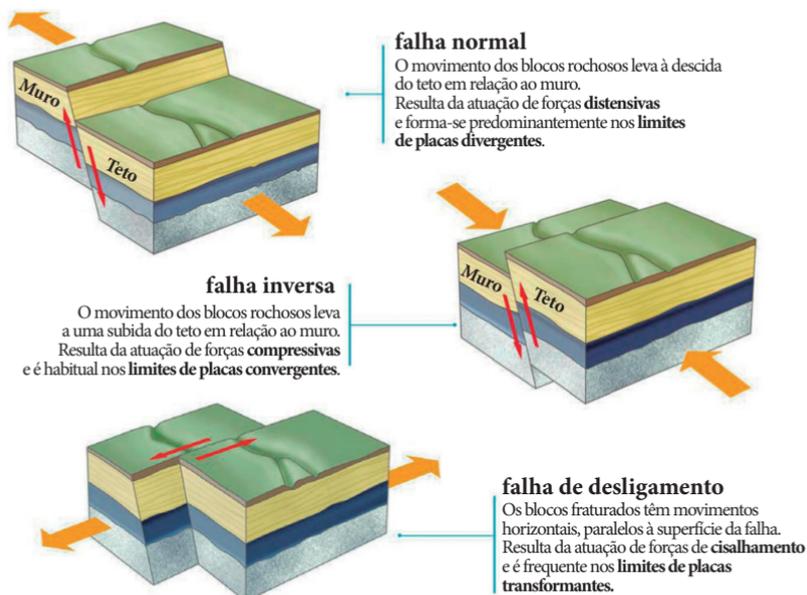
Figura 1.14 | Elementos geométricos de uma falha



Fonte: <<http://s197.photobucket.com/user/sarajkl/media/elementosdeumafalha.jpg.html?t=1240107931>>. Acesso em: 11 nov. 2016.

O plano de falha representa a superfície sobre a qual ocorreu a movimentação dos blocos, é nessa superfície que pode haver a formação de estrias de falha, importantes na identificação do sentido de movimento. Quando o muro sobe em relação ao teto, temos o que chamamos de falha normal, se o teto subir em relação ao muro temos as chamadas falhas reversas ou inversas. Se o movimento ao longo do plano de falha for lateral a falha é classificada como transcorrente (Figura 1.15). Quando associada a componentes de compressão e extensão, falhas transcorrentes são classificadas então como transpressivas e transtativas, respectivamente.

Figura 1.15 | Os tipos de falhas



Fonte: <<https://cienciasbemexplicadas.files.wordpress.com/2013/03/tipos-de-falhas.png>>. Acesso em: 10 nov. 2016.

Ao longo dos planos de falha em regime rúptil de crosta superior (4 a 8 km), devido à fragmentação associada ou não à recristalização, pode haver a formação de cataclitos ou brechas de falha, rochas caracterizadas por grãos angulares, altamente fraturados com ausência de orientação da rocha. Quando a deformação ocorre sob regime dúctil em crosta inferior (superior a 10 km de profundidade), a rocha formada é chamada de milonito e caracteriza-se pela forte orientação causada pela recristalização dos seus minerais constituintes.



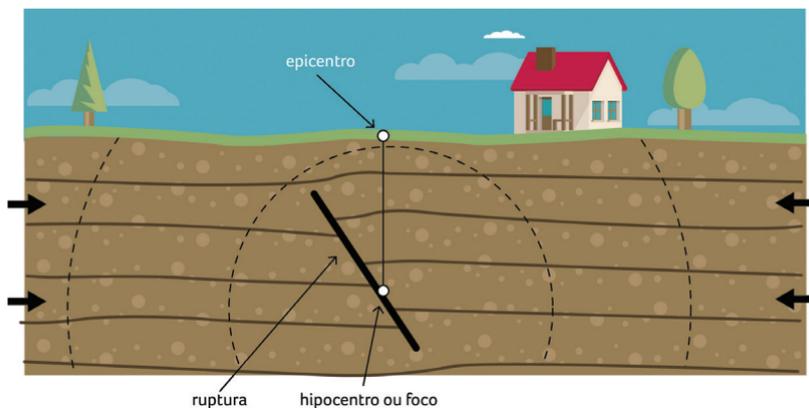
**Pesquise mais**

Para que você saiba mais sobre a deformação das rochas, acesse o link a seguir. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=ypZeEK7L9po>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

A energia liberada durante os processos de formação de falhas é também responsável por causar terremotos e resulta do acúmulo de tensões causado durante a movimentação entre as placas litosféricas.

O ponto no qual a ruptura ocorre é chamado de hipocentro ou foco, e sua projeção na superfície é conhecida por epicentro (Figura 1.16).

Figura 1.16 | A ruptura é o ponto no qual ocorre a geração de sismos



Fonte: Teixeira et al. (2009, p. 45).



Refleta

Existem terremotos no Brasil? Por que alguns países registram mais eventos desse tipo do que outros?

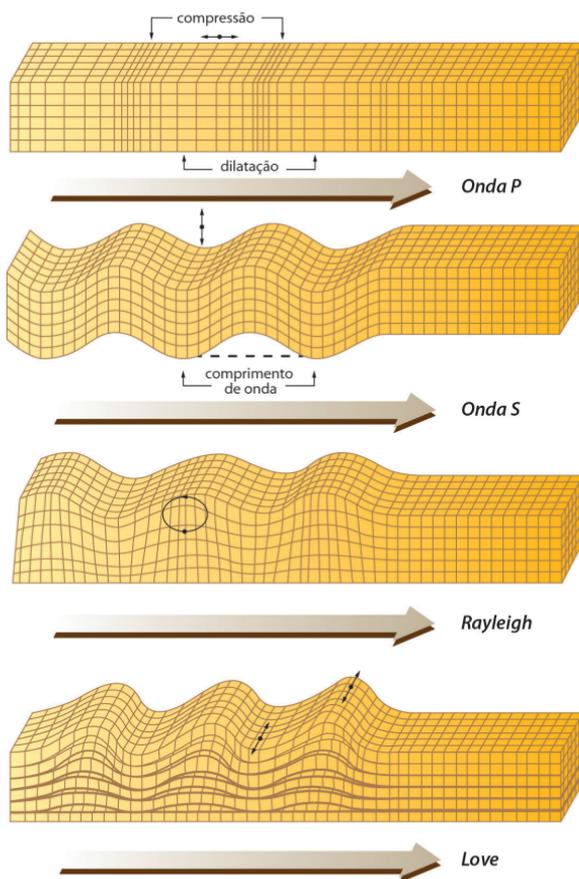
Terremotos são mais frequentes em locais próximos a limites de placas, como no Japão e Indonésia. O seu efeito é mais significativo quando o seu hipocentro se encontra mais próximo da superfície, e seu epicentro próximo às áreas povoadas. No entanto, a ocorrência dos terremotos é incerta, contando com estudos científicos sobre a frequência de abalos de grande porte, como os acima de 6 graus na escala Richter, que podem fornecer algumas “pistas”, porém, imprecisas.

A partir do ponto de ruptura, ondas sísmicas se propagam em todas as direções do terreno em diferentes velocidades, podendo viajar por centenas de quilômetros. A primeira onda a propagar, a onda P, é do tipo longitudinal e as partículas do meio vibram paralelamente a sua direção de propagação, causando deformações de dilatação e compressão. Na segunda, onda S, as vibrações das partículas são perpendiculares à propagação da onda e a deformação é do tipo cisalhante. Além das ondas P e S, que são ondas internas, a propagação ocorre por meio de ondas superficiais, conhecidas como *Rayleigh* e *Love*. Ondas *Rayleigh*

caracterizam-se pela combinação de movimentos das ondas P e S, já ondas *Love* são representadas pela superposição da movimentação de ondas S e vibrações horizontais (Figura 1.17).

É a partir do registro da velocidade de propagação dessas ondas em sismógrafos espalhados pelo mundo que a estrutura e composição interna da Terra são conhecidas. A velocidade de propagação dessas ondas está diretamente relacionada com o meio pelo qual elas se propagam. Sabe-se que ondas S não se propagam em meios líquidos, e que quanto maior a densidade do corpo, maior a velocidade de propagação de ambas as ondas.

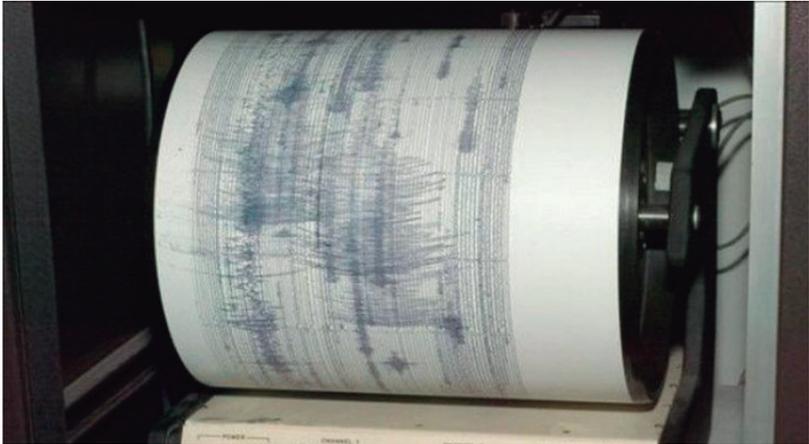
Figura 1.17 | Modelo de propagação das ondas geradas após um terremoto





Os sismógrafos são os equipamentos responsáveis pelo registro das ondas propagadas após a liberação de energia causadora de terremotos.

Figura 1.18 | Equipamento sismógrafo



Fonte: <<http://www.elancasti.com.ar/u/fotografias/fotosnoticias/2014/9/25/15204.jpg>>. Acesso em: 11 nov. 2016.

### Sem medo de errar

Relembrando a abordagem do início desta seção, você professor, resolveu aproveitar o acontecimento de um terremoto em uma cidade próxima à escola em que trabalha para aplicar os conceitos de geologia estrutural apresentados aos seus alunos da disciplina de geografia física que ministra. Para que isso acontecesse, pediu que cada aluno escolhesse um evento documentado em que a ocorrência de terremotos tenha, ou não, causado grandes danos respondendo a algumas questões: quais os processos que dão origem aos terremotos, quais os tipos de estruturas que eles podem formar? Por que alguns terremotos causam mais danos do que outros? Por que a incidência desses eventos é mais comum em algumas áreas do que em outras? É possível prever a ocorrência de tremores?

Os terremotos são resultado da liberação de energia acumulada

pela movimentação entre placas tectônicas, por isso esse tipo de evento acontece em locais próximos a limites de placas, mas não estão restritos a esses locais. Como se trata de liberação de energia acumulada, por vezes, abalos não relacionados com movimentação tectônica ocorrem, como é o caso de tremores oriundos de acomodação de massas de terra, deslizamentos, ou até detonação de explosivos.

Por terem origem em crosta superior, em que há o predomínio de comportamento reológico rúptil nas rochas, tremores tendem a gerar falhas, associadas às rochas cataclásticas, ou seja, catáclase (quebra). Nem sempre as falhas geradas são expressas na superfície.

Como se trata da propagação de ondas, e ondas se dissipam e perdem intensidade conforme se afastam de sua fonte emissora, terremotos tendem a ser mais devastadores quando o seu hipocentro se encontra localizado mais próximo da superfície, e seu epicentro próximo às cidades.

É impossível prever quando terremotos irão acontecer, o que existem são estudos estatísticos sobre a ciclicidade de abalos de grande porte (>6 graus na escala Richter), que podem fornecer "pistas" imprecisas.

## Avançando na prática

### Geologia experimental em sala de aula

#### Descrição da situação-problema

Imagine agora que você estava preparando o plano de aula da disciplina de geografia para os alunos do 2º ano do Ensino Médio da Escola Estadual, o qual abordaria as falhas geológicas, as dobras e os terremotos. Pensando em deixar a aula mais dinâmica e didática, você resolveu fazer pequenas caixas de vidro com as extremidades abertas, na qual você posicionou duas madeiras, uma em cada lado da caixa. Dessa forma, você conseguiria simular os movimentos de compressão, ou seja, os esforços que as rochas sofrem ao serem "apertadas". Feito isso, você decidiu preencher a caixa com

areia e argila (dois materiais que simulam as rochas sedimentares), alternando-as em camadas, como se fossem um bolo. No dia da aula, você levou a caixa para a sala da aula e, impressionantemente, os alunos ficam interessadíssimos no assunto, afinal eles queriam saber qual era a novidade.

Você então começou a explicar, primeiramente no quadro e *datashow*, o que eram falhas, dobras e como os terremotos se originavam. Após isso, você fez os experimentos com a caixa para mostrar a seus alunos e colocar em prática o que aprenderam. Como os alunos estavam entusiasmados com aquilo, foram logo perguntando: "Professor, quais são os elementos geométricos das falhas que podemos ver nesse experimento"? Outro aluno, já mais avançado no assunto, perguntou: "Professor, aqui nesse experimento você conseguiu mostrar apenas as falhas, por que não se formaram as dobras"? Por último, um aluno o questiona: "O que aconteceria se cada vez que você comprimisse mais essas "rochas", elas ficassem somente acumulando essa energia"?

### **Resolução da situação-problema**

Para responder a esses questionamentos você precisa se lembrar de que, conforme abordamos, existem três elementos geométricos fundamentais das falhas: a) plano de falha, superfície na qual houve o deslocamento entre dois blocos de rochas (muro e teto); b) direção, que é a orientação geográfica da linha de intersecção entre a superfície de falha e um plano horizontal; e c) inclinação (ou mergulho) do plano de falha, que simboliza o ângulo formado entre um plano horizontal e a superfície de falha.

Sobre a segunda pergunta, você deve se lembrar que as rochas se comportam, basicamente, de duas maneiras distintas: rompendo-se ou dobrando-se. O primeiro comportamento está ligado ao regime rúptil, comum nas rochas que se situam na litosfera, como as rochas sedimentares do experimento que você fez com seus alunos. O segundo está relacionado ao regime dúctil, que ocorre em porções mais profundas dentro da crosta, em regiões onde a temperatura e pressão são mais elevadas. Assim, as rochas comportam-se de forma mais maleável, moldando-se conforme o esforço aumenta, mas não rompem. Como no experimento que você levou à sala de aula

you cannot increase temperature and pressure, the structures generated by your model are restricted to faults.

Responding to the last question, you should highlight that the accumulation of energy by the rocks makes it so that, when it is released, there is a sudden and catastrophic dissipation of energy, which can generate seismic waves that, as they propagate through the rocks and sediments, cause serious damage to structures and people, earthquakes.

### Faça valer a pena

**1.** Structural geology is dedicated to the analysis of deformation that occurs in rocks, whether it is on a macroscopic scale (mountains, for example) or microscopic (in a rock thinning). The study of geological structures formed over time can help, including, in practical terms, such as in the prospecting of oil, gas, minerals and groundwater. Knowing that different behaviors of geological materials exist in the face of a tectonic effort, mark the correct alternative:

a) Translation movement involves the change of position of only some of the components of the rock in the same direction and distance.

b) Rotation occurs when there is an asymmetric physical rotation of the rock body.

c) Dilatation occurs when there is a change in volume in the rock.

d) Distortion is defined as any change in shape, orientation, length and spacing of a material, necessarily with a change in volume.

e) Translation movement occurs when some of the components of the rock are rotated in opposite directions.

**2.** Folds and faults are the main geological structures generated during the deformation of rocks. The origin of them is linked to the tectonic behavior of the rock,

considerando, principalmente, a temperatura e pressão à qual estão submetidas.

Considerando as dobras e falhas, assinale a alternativa correta:

- a) As dobras são estruturas geológicas geradas sob o regime rúptil, comportando-se de forma elástica.
- b) As falhas são estruturas geológicas geradas sob o regime dúctil, comportando-se de forma plástica.
- c) As dobras e falhas são estruturas geológicas geradas sob o regime dúctil, comportando-se de forma elástica.
- d) As falhas são estruturas geológicas geradas sob o regime rúptil, comportando-se de forma elástica.
- e) As dobras são estruturas geológicas geradas sob o regime dúctil, comportando-se de forma elástica.

**3.** Os terremotos são considerados os eventos geológicos mais destrutivos do planeta. A energia liberada durante um abalo sísmico pode chegar na ordem de  $4.10^{22}$  J, como o terremoto que ocorreu em 2004 no Oceano Índico. Embora a quantidade de energia que atingiu a superfície tenha ficado na ordem de  $1.1 \times 10^{17}$  J, essa quantidade de energia já é 1.500 mais forte que a bomba que atingiu a cidade de Hiroshima, ao final da Segunda Guerra Mundial.

Considerando os terremotos, pode-se afirmar que:

- a) A origem dos terremotos está ligada ao acúmulo de tensões que, quando não consegue mais ser suportada pelas rochas, acaba por liberar energia.
- b) Os terremotos são originados pelo rompimento, em regime dúctil das rochas.
- c) Os terremotos geram diferentes tipos de ondas, entre elas as ondas S, P, X e Love.
- d) O ponto onde ocorreu o terremoto é denominado, em superfície, de hipocentro.
- e) Os sismógrafos, apesar de grandes ajudantes no monitoramento sismológico, só conseguem detectar as ondas S e P.

# Referências

BOUROTTE, C. L. M. B. **Minerais constituintes das rochas**. 33'07". Disponível em: <<http://eaulas.usp.br/portal/video.action?idItem=396>>. Acesso em: 31 out. 2016.

CRÓSTA, A. P. Domo de Araguinha, GO/MT: o maior astroblema da América do Sul. In: Schobbenhaus, C.; Campos, D.A.; Queiroz, E.T.; Winge, M.; Berbert-Born, M. **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. 1999. Disponível em: <<http://sigep.cprm.gov.br/sitio001/sitio001.pdf>>. Acesso em: 16 nov. 2016.

DAVIS, G. H.; REYNOLDS, S. J.; KLUTH, C. **Structural geology of rocks and regions**. 3. United States of America: Wiley & Sons, Inc., 2011. 839 p.

FOSSEN, H. **Structural geology**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press. 2010. 463 p.

MARSHAK, S. **Earth portrait of a planet**. 3. ed. Nova Iorque: W. W. Norton & Cia Ltd, 2008.

PRESS, F. et al. **Para entender a Terra**. Tradução de Rualdo Menegat. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

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

WICANDER, R.; MONROE, J. S. **Fundamentos de Geologia**. Tradução de H. O. Avritcher; revisão técnica de M. A. Carneiro. São Paulo: Cengage Learning Edições, 2009. 508 p.



# Petrologia

## Convite ao estudo

Após ser introduzido aos processos que levaram à origem do Universo e do Sistema Solar, e ter conhecido sobre a natureza dinâmica da Terra na Unidade 1, nesta unidade, estudaremos em detalhe o principal material que constitui nosso planeta: as rochas. Conhecer as rochas que constituem o meio ao nosso redor é necessário para interagir com o ambiente, e ao entendê-lo, possamos de alguma forma contribuir para preservá-lo e perpetuá-lo ao longo das futuras gerações. Conhecê-las também é essencial para construirmos a competência geral desta disciplina, que é adquirir os conhecimentos básicos sobre geologia de maneira sistêmica.

Sejam elas ígneas, sedimentares ou metamórficas, você aprenderá os processos de origem de cada uma delas. Desde o magma que ascende do interior da Terra para formar as rochas ígneas, aos sedimentos que “viajam” milhares de quilômetros até se depositarem e darem origem às rochas sedimentares, que preservam em suas camadas grande parte da história da Terra, até transformarem-se nas rochas metamórficas ou fundirem-se para dar início a um novo ciclo.

Para ajudá-lo e aos seus alunos no processo de compreensão e interação com o meio físico que nos rodeia, imagine que você, no papel de um professor de uma escola local, resolveu levá-los a campo para que pudessem coletar amostras e por meio de atividades práticas e aplicadas, conhecer e refletir acerca dos conceitos relacionados aos processos formadores de rochas. Agora que o semestre está chegando ao final e os seus alunos já conhecem os conceitos fundamentais sobre a formação, identificação e classificação de rochas, você decidiu levá-los a uma

viagem de campo de três dias até o interior do seu estado, em um local em que ocorrem rochas ígneas, sedimentares e metamórficas com certa proximidade, com o intuito de que em cada um desses dias vocês investigassem detalhadamente cada um desses grupos e que seus alunos pudessem aplicar os conceitos já ensinados por você em sala de aula.

Ao final dessa viagem, e do semestre, seus alunos serão capazes de responder às questões sobre como foi o processo de formação de um granito, por exemplo. Aliás, quais os principais fatores que levaram à sua formação? Quais as características que permitiram identificá-lo como tal? Além disso, você, como professor, necessitará ter os conhecimentos necessários para guiar os alunos na resolução desses e outros questionamentos. Portanto, o estudo desta unidade de ensino será fundamental!

# Seção 2.1

## Rochas ígneas

### Diálogo aberto

Nesta seção, as rochas ígneas serão o nosso principal objeto de estudo. As rochas podem parecer irrelevantes às nossas atividades cotidianas, mas a verdade é que sem os recursos por elas fornecidos, a maioria dos confortos que desfrutamos não seria possível, e apesar do aumento no uso de energias renováveis na última década, recursos minerais são extensamente utilizados, seja no combustível que abastece nosso carro ou na constituição dos aparelhos eletrônicos que nos acompanham praticamente 24h por dia.

Para que você comece a reparar e entender as rochas ao seu redor, lembre a situação apresentada anteriormente no “Convite ao estudo”, em que você levou seus alunos para uma viagem de campo para que eles pudessem ter mais contato com o conteúdo visto em sala de aula. Eles estão agora muito empolgados, pois essa é a primeira viagem que eles fazem e a região visitada é muito bonita. Durante a manhã do primeiro dia você os leva a uma antiga pedreira de onde eram extraídos enormes blocos de granito para uso como rocha ornamental, com enormes cristais bem formados de cor alaranjada intercalados com outros de cor preta e incolores, no entanto, o que mais chamou a atenção dos seus alunos foi a presença de duas grandes estruturas em formato retangular que atravessavam a porção esquerda da pedreira, estendendo-se do solo até o topo. A rocha que as constituía era de cor escura, e nenhum mineral podia ser identificado a olho nu. Durante a tarde você os levou a outra pedreira, esta de gabro, uma rocha de cor escura, porém desta vez a textura da rocha era grossa e os minerais eram facilmente identificáveis. Alguns eram pretos esverdeados enquanto outros pareciam pequenas ripas brancas. Você notou que os alunos ficaram bastante impressionados, por isso resolveu coletar amostras de cada tipo de rocha visto.

De volta à sala de aula, você entregou essas amostras a eles para

que pudessem responder a alguns questionamentos e ao final lhe entregassem um desenho simples mostrando onde essas rochas poderiam ser encontradas na crosta, junto com uma breve lista dos fatores que os levaram a posicioná-las em tais ambientes. Durante a atividade, eles também devem responder a alguns questionamentos feitos por você durante a atividade de campo, sendo estes: como era possível que uma rocha com minerais tão bem formados, como o granito, estivesse do lado de outra com textura tão fina em que nada era visto? Por que essa diferença acontece? O que faz com que ambas as rochas de coloração escura sejam tão distintas entre si? O que o tamanho desses minerais e sua cor têm a dizer sobre a origem e o ambiente de formação dessas rochas?

Auxilie os seus alunos. Como você responderia a esses questionamentos? Tem ideia? Para responder a essas perguntas você deverá estudar assuntos abordados nesta seção sobre os diferentes fatores que controlam a formação dos diferentes tipos de rochas ígneas, como processos geradores de magma, a diferenciação magmática e a relação de cada tipo dessas rochas com seu ambiente de ocorrência.

## Não pode faltar

O termo ígneo tem origem na palavra latina *ignis*, que significa fogo, ou aquilo que vem do fogo, por isso rochas que se formam a partir do resfriamento do magma são conhecidas como ígneas ou magmáticas. Magma nada mais é que “rocha derretida”, ou seja, o material rochoso aquecido a uma temperatura tão alta que sofreu fusão adquirindo mobilidade e que ao atingir a superfície passa a ser chamado de lava. A partir de dados geofísicos sabe-se que a fusão parcial de rochas ocorre na astenosfera ou na crosta inferior, devido a fatores que podem incluir aumento de temperatura por alívio de pressão, variação no teor de fluidos, ou ainda, uma combinação desses fatores.



### Assimile

Magma é rocha fundida e o seu conteúdo de sílica é um importante fator de classificação dos tipos de magmas, além de controlar suas propriedades.

O magma é dividido em quatro tipos básicos de acordo com seu conteúdo de sílica ( $\text{SiO}_2$ ): (1) Magmas félsicos contêm entre 76% e 66% de sílica e dão origem às rochas ricas em quartzo e feldspato; (2) Magmas intermediários contêm entre 66% e 52% de sílica; (3) Magmas máficos contêm entre 52% e 45% e também recebem esse nome por serem ricos em minerais máficos, ou seja, com alta proporção de FeO e MgO em sua estrutura; (4) Magmas ultramáficos contêm apenas entre 45% e 38% de sílica. Por exemplo, ao fundir rochas com minerais ricos em sílica o magma originado será do tipo félsico. Se uma rocha máfica, rica em Fe e Mg e pobre em sílica sofre fusão, o magma será do tipo máfico ou básico.

Se o magma é formado a partir do "derretimento" das rochas, por que existem então magmas de composições tão variadas? A diversidade composicional encontrada nos magmas é fruto dos processos geradores de magmas, que podem incluir o tipo de rocha fonte ou a profundidade na qual o magma tem origem. Em geral, magmas são compostos principalmente por sílica e oxigênio e variações de outros elementos, como alumínio (Al), cálcio (Ca), sódio (Na), potássio (K), ferro (Fe) e magnésio (Mg), e é justamente a variação nas proporções desses elementos e no conteúdo de sílica que irá controlar propriedades como viscosidade e densidade. Ao se polimerizar e formar longas ligações, as moléculas de sílica são capazes de reduzir a velocidade do fluxo, aumentando a viscosidade, que nada mais é que a resistência a fluir. Sendo assim, magmas félsicos são mais viscosos e lentos que magmas máficos. A densidade também está diretamente relacionada com o conteúdo de sílica, como ela possui baixa densidade, magmas ricos em sílica são menos densos que magmas pobres em sílica.



### Refleta

Por que as rochas ígneas têm diferentes composições, cores e densidades se todas foram formadas a partir do resfriamento do magma?

Outro fator importante na diferenciação de magmas é a cristalização fracionada. A cristalização fracionada tem início com um magma primário, do tipo ultrabásico (pouca sílica e rico em Mg

e Fe), que ao ascender e resfriar-se passa a gerar núcleos de cristais. Uma vez que esses cristais são formados, o líquido restante encontra-se empobrecido em certos elementos químicos, que agora estão presentes na estrutura desses cristais, que ao cristalizar “afundam” e separam-se do restante do magma, num processo chamado de diferenciação. A tendência é que minerais ricos em Fe, Mg e Ca cristalizem-se primeiro, tornando o magma cada vez mais félsico com a sucessão dos processos de cristalização fracionada. A ordem na qual os minerais se cristalizam em determinadas temperaturas, empobrecendo o magma em certos constituintes é chamada de série de Bowen (Figura 2.1).

Figura 2.1 | Série de reação de Bowen e a ordem de cristalização dos minerais durante a cristalização fracionada



Fonte: Fairchild et al. (2009, p. 344)

Se esse magma gerado em profundidade se resfriar e originar rochas, elas serão chamadas de rochas plutônicas. A principal característica desse tipo de rocha está em grãos de tamanho grande, formando uma textura grossa, devido ao resfriamento lento do magma em profundidade. Granitos, gabros e peridotitos são exemplos de rochas plutônicas de diferentes tipos de magmas. As rochas ígneas são classificadas principalmente a partir de sua cor, composição mineralógica e textura. A cor de cada tipo de rocha reflete a sua composição mineralógica e química, podendo

indicar a partir de qual tipo de magma ela foi formada. Podem ser: leucocráticas, rocha de cor clara, possui entre 0 e 33% de minerais de cor escura; mesocráticas, rocha de coloração intermediária, possui entre 34 e 66% de minerais de cor escura e; melanocráticas, rocha de cor escura, possui acima de 67% de minerais de cor escura.

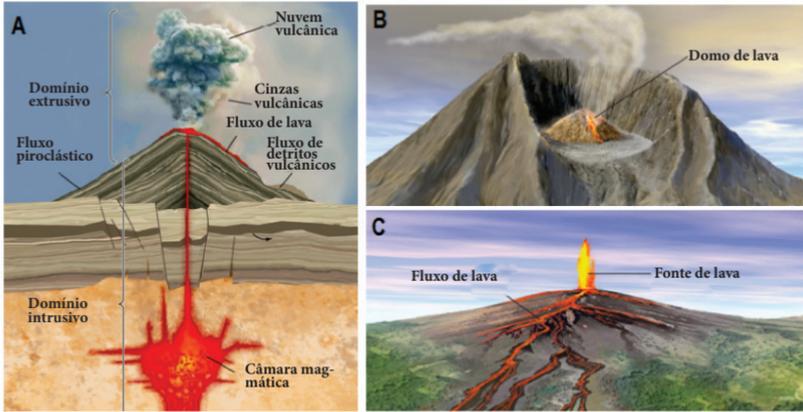
Quanto à composição mineralógica podem ser classificadas como félsica (cor clara), composta por minerais de quartzo, ortoclásio (K feldspato), muscovita (mica) e plagioclásio, ou máfica (cor escura), constituída principalmente por minerais de olivina, biotita (mica), anfibólio e piroxênio. Rochas consideradas intermediárias apresentam composição mista entre esses grupos de minerais. A obsidiana, ou vidro vulcânico, pode ter composição tanto félsica quanto máfica, mas por ter estrutura interna amorfa sempre tem cor escura.

A textura trata da relação entre os constituintes cristalinos e vidro (quando presente), e o tamanho dos grãos reflete na taxa de resfriamento e conseqüentemente no ambiente de cristalização dos minerais. Rochas que apresentam cristais maiores que 5 mm possuem textura grossa, refletem na lenta taxa de cristalização e são classificadas como rochas plutônicas, ou seja, se formam em grandes profundidades, como granitos e gabros. Aquelas com cristais entre 1 e 5 mm são consideradas de textura média e ocorrem em rochas cristalizadas em ambiente hipoabissal, ou seja, nem tão profundo nem extrusivo, como é o caso dos diques de diabásio. Por fim, rochas com textura fanerítica (cristais menores que 1 mm) são as chamadas rochas extrusivas, como basaltos e riolitos.

Uma das melhores maneiras de se estudar a origem dos magmas, e o próprio interior da Terra, é por meio dos vulcões. De modo geral, vulcões apresentam estruturação semelhante entre si (Figura 2.2a). São constituídos pela (I) câmara magmática, situada na base da litosfera onde as rochas adjacentes sofrem fusão e o magma é gerado, (II) o conduto vulcânico, que é por onde o magma é transportado até a (III) cratera, de onde é expelido. Além da cratera principal, fissuras nas laterais do vulcão podem se abrir e também expelir lava, são as chamadas erupções fissurais

nas quais cones vulcânicos não chegam a ser gerados. Nesse tipo de erupção o magma que sai da câmara magmática é levado até a superfície por meio de “canos” condutores de magma, os chamados diques, que cortam as rochas adjacentes de diferentes litologias. Quando esses diques são paralelos às camadas de rocha adjacentes são chamados de *sill*.

Figura 2.2 | A) Aspectos morfológicos de um vulcão; B) Vulcão do tipo estratiforme; C) Vulcão do tipo escudo



Fonte: adaptada de Marshak (2008, p. 154 e 161).

O produto vulcânico mais comum resultante de erupções é a lava, este fluido altamente viscoso que ao se resfriar dará origem às novas rochas. Dois tipos de lavas são os mais comuns, as básicas ou basálticas e as félsicas ou ácidas. Lavas oriundas de magmas básicos possuem menor quantidade de voláteis associada e temperatura variando de 1000 a 1200 °C, esse fator contribui para que o fluxo, que é menos viscoso devido à menor quantidade de sílica presente, se espalhe por grandes distâncias a partir do núcleo da erupção, esta que pode ser fissural e não estar associada a um vulcão, dando origem aos chamados derrames vulcânicos. Quando oriundas de magmas félsicos, com alto teor de  $\text{SiO}_2$ , as lavas são denominadas ácidas ou riolíticas, ou seja, um riolito nada mais é que um granito resfriado rapidamente. Esse tipo de lava apresenta temperatura inicial mais baixa, entre 800 e 1000 °C, tende a acumular maior quantidade de gases e associado ao alto teor de sílica apresenta fluxo mais viscoso e conseqüentemente mais lento que as lavas basálticas. Devido à alta viscosidade, o acúmulo desse

tipo de lava alcança dezenas e até centenas de metros de altura, porém não vai muito distante do núcleo da erupção.

Assim, o tipo de magma que cada vulcão expelle está diretamente relacionado com as variações na morfologia de cada vulcão e no tipo de erupção. Erupções vulcânicas de lavas basálticas são raramente explosivas e estão associadas a vulcões do tipo escudo, os quais cobrem extensas áreas com seus derrames de lava. Os derrames são classificados com base nas suas feições de superfície, base, núcleo e estruturas associadas, e retratam variações químicas, de taxa de erupção e oscilações de relevo, os tipos mais comuns de derrames são o tipo *á á* e *pahoehoe*. *Derrames depahoehoe* são muito comuns no Havaí e o termo significa lava em corda, devido às feições retorcidas em sua superfície que lembram cordas.



### Exemplificando

Atualmente, no Brasil não existem vulcões ativos, mas isso não significa que eles nunca existiram. A Formação Serra Geral (Figura 2.3), Bacia do Paraná, abrange uma área de aproximadamente 917.000 km<sup>2</sup> e corresponde a um enorme volume de derrames de lava gerados por extensa atividade vulcânica há aproximadamente 135 milhões de anos, durante a separação das placas tectônicas Sul-Americana e Africana.

Figura 2.3 | Derrames basálticos da Formação Serra Geral, Serra do Rio do Rastro, Santa Catarina



Fonte: elaborada pelo autor.

Quando expelidas e solidificadas abaixo da água, as lavas adquirem a forma de almofadas de até 1 m de diâmetro, pois o magma básico entra em contato com a água fria e solidifica-se instantaneamente, criando uma película vítrea muito fina que contrasta com o interior da "almofada" resfriada mais lentamente.

Figura 2.4 | Aspectos estruturais de lava em corda, *pahoehoe*, *‘a‘ā* e *almofadas*, da esquerda para a direita



Fonte: <<https://image.slidesharecdn.com/vulcanologia-131213105154-phpapp02/95/vulcanologia-18-638.jpg?cb=1386931988>>. Acesso em: 8 jan. 2017.

Ao contrário das erupções de lavas basálticas, lavas ácidas tendem a causar maiores estragos devido ao conteúdo de voláteis encontrado, pois nesses magmas, água e gases ficam confinados em profundidade e quando chegam à superfície a pressão cai e são liberados com força explosiva, juntamente com a lava e fragmentos de rocha adjacentes, as bombas vulcânicas. Essas explosões são as chamadas piroclásticas, e expelem também alta quantidade de cinzas vulcânicas que acumulam em camadas nas laterais dos vulcões formando rochas chamadas tuffos. Cada camada dessas pode revelar um evento explosivo, conhecidos como estratovulcões.

Ao contrário das rochas ígneas plutônicas, em que o resfriamento é lento e os minerais cristalizam lentamente, nas rochas vulcânicas a queda de temperatura é brusca, dessa forma, os minerais têm tamanho muito pequeno e não podem ser identificados a olho nu, caracterizando uma textura chamada afanítica. No caso de lavas ricas em sílica há formação de obsidiana ou o vidro vulcânico.



**Pesquise mais**

Se você tem interesse em conhecer e entender melhor sobre as características dos vulcões ao redor do mundo, recomendamos

a leitura do capítulo 17 do livro *Decifrando a Terra*, intitulado "Vulcanismo" e que traz um excelente resumo sobre a morfologia dos vulcões.

TEIXEIRA, W. Vulcanismo: produtos e importância para a vida. In: TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R. **Decifrando a Terra**. 2009. 624 p. Disponível em: <<http://geografialinks.com/site/wp-content/uploads/2010/03/17-VULCANISMO.pdf>>. Acesso em: 17 jan. 2017.

## Sem medo de errar

Vamos retomar o contexto apresentado no início desta seção, em que você e seus alunos fizeram uma pequena viagem a campo para reconhecer os diferentes tipos de rochas e aplicar os conhecimentos adquiridos em sala de aula de maneira prática. Ao voltar, você, professor, entregou as amostras coletadas das diferentes rochas vistas no primeiro dia e pediu aos seus alunos que identificassem seus ambientes de formação junto com uma pequena explicação.

Com relação aos questionamentos, como era possível que uma rocha com minerais tão bem formados estivesse lado a lado com outra em que nada era visto, e porque isso acontece? Como você viu, o local onde esse magma se solidifica implica propriedades texturais dos minerais constituintes das rochas, sendo assim, o resfriamento em regiões mais profundas da crosta ocorre lentamente e grandes cristais, por vezes euédricos, têm tempo de se formar, ao contrário das lavas resfriadas na superfície, que apresentam textura afanítica. Dessa forma, as rochas com cristais grandes que você viu em campo resfriaram-se em profundidade, por isso os cristais puderam crescer.

Como explicar então a presença de uma rocha escura de textura fina, lado a lado ao granito visitado no primeiro dia? A essa estrutura alongada cortando as rochas adjacentes se dá o nome de dique. Diques são alimentadores de magma e podem ocorrer ao lado de rochas sedimentares, metamórficas e ígneas intrusivas, pois formam-se depois destas, possuindo textura fina, pois já se resfriam em regiões frias da crosta.

E o que faz com que ambas as rochas de coloração escura sejam tão distintas entre si? Essa diferença de cor está nos diferentes tipos de magmas, já que o granito forma-se a partir de magma félsico, e o gabro, a rocha com minerais verde-escuro bem formados a partir de magmas básicos.

## Avançando na prática

### Vulcões

#### Descrição da situação-problema

Os recentes episódios com erupções vulcânicas que causaram interrupções no tráfego aéreo mundial levaram você, professor, a apresentar um tour pelos vulcões atualmente ativos ao redor do mundo, por exemplo, o Etna na Itália e o Kilauea no Havaí. Você notou que a morfologia desses dois vulcões é muito diferente, o Kilauea não é tão alto, porém estende-se por uma vasta área, ao contrário do Etna que possui um cone alto, porém com diâmetro menor.

Ao final do documentário os alunos começaram a levantar alguns questionamentos: por que apesar de estarem frequentemente expelindo lava esses vulcões não expelem cinzas vulcânicas? O que faz com que um vulcão tenha uma extensão lateral tão grande e pouca altura, enquanto o outro se estende por uma área tão pequena, mas possui cone vulcânico alto?

#### Resolução da situação-problema

Essas diferenças estão diretamente ligadas ao tipo de magma que os vulcões expelem. Você deve recordar que ao longo desta seção foi apresentada a classificação dos magmas em função do seu conteúdo de sílica. A sílica é fator controlador na viscosidade do magma, desta maneira, magmas félsicos, ou seja, aqueles ricos em sílica tendem a ser menos fluidos e os vulcões desenvolvidos apresentarão cone alto com diâmetro pequeno. Em contrapartida, magmas básicos e ultrabásicos, que contêm menos sílica, são mais fluidos e por isso fluem por distâncias mais longas, dando origem a vulcões com cone baixo, mas de grande extensão em forma de escudo, como

são assim referidos. Além da viscosidade, vimos que magmas félsicos, associados a voláteis, são mais propícios a gerar erupções do tipo explosivas, expelindo lava a grandes alturas e também cinzas vulcânicas. As erupções do tipo efusivas, aquelas que ocorrem em vulcões de magma máfico, tendem a fluir sem explodir, causando danos apenas ao longo do caminho percorrido pela lava.

## Faça valer a pena

**1.** O conteúdo de sílica presente em um magma é fator determinante em sua classificação, bem como no controle de propriedades, como viscosidade e até tipos de minerais. Sobre as rochas ígneas e suas relações com os tipos de magma, é correto afirmar que:

- a) O granito é uma rocha com pouca sílica gerada a partir de magmas máficos.
- b) O basalto é uma rocha com alto conteúdo de sílica gerada a partir de magmas máficos.
- c) O riolito é uma rocha gerada a partir de magmas félsicos.
- d) O diabásio é uma rocha gerada a partir de magmas máficos.
- e) O granito é uma rocha com muita sílica gerada a partir de magmas máficos.

**2.** Vulcão havaiano atrai turistas com duas cavidades em erupção ao mesmo tempo

Fonte: <<http://g1.globo.com/natureza/noticia/2016/08/vulcao-havaiano-atrai-turistas-com-duas-cavidades-em-erupcao-ao-mesmo-tempo.html>>. Acesso em: 2 fev. 2017.

Sobre erupções vulcânicas é correto afirmar:

- a) Lavas ácidas são pouco viscosas.
- b) Lavas ácidas são mais viscosas.
- c) Lavas ácidas dão origem a grandes campos de derrames basálticos.
- d) Lavas ácidas dão origem a estruturas nas rochas conhecidas como lava em corda.

e) Lavas ácidas formam derrames do tipo a'a'.

**3.** "As cinzas expelidas por um vulcão na ilha de Java levaram ao fechamento de cinco aeroportos e ao cancelamento de centena de voos nestas quinta e sexta-feira (10/07) na Indonésia.

O vulcão Raung, a cerca de 150 quilômetros do aeroporto internacional de Bali, está em erupção há várias semanas. O nível de atividade aumentou na semana passada, e, nesta sexta-feira, ele expeliu cinzas e detritos a uma altura de 3,8 mil metros."

Fonte: <<http://www.dw.com/pt-br/cinzas-de-vulc%C3%A3o-provocam-caos-a%C3%A9reo-na-indon%C3%A9sia/a-18575153>>. Acesso em: 2 fev. 2017.

O basalto é um tipo de rocha:

- a) Plutônica
- b) Vulcânica
- c) Sedimentar
- d) Metamórfica
- e) Carbonática

## Seção 2.2

### Rochas sedimentares

#### Diálogo aberto

Caro aluno, na seção anterior você estudou sobre as rochas ígneas. Nesta seção, continuaremos abordando as rochas. No entanto, agora analisaremos toda a dinâmica externa de nosso planeta, focando nos processos que auxiliam na modelagem da paisagem à nossa volta. A compreensão dos agentes externos é fundamental, não somente para entendermos os processos naturais que afetam nossa vida nas cidades, mas também para investigarmos a ocorrência de recursos naturais.

Para que você consiga entender a aplicabilidade do conteúdo, vamos imaginar uma situação hipotética. Você, como professor de uma escola de ensino médio, está atualmente trabalhando os assuntos ligados às rochas sedimentares. Por isso, para que os alunos consigam visualizar os tipos de rocha sedimentar existentes, você decidiu levar cinco diferentes materiais para a sala de aula, os quais estavam dentro de alguns recipientes: 1º) argila – partículas finas com diâmetro menor que 0,0039 mm; 2º) silte – partículas finas com diâmetro entre 0,062 e 0,0039 mm; 3º) areia – partículas mais grossas com diâmetro entre 0,062 e 2 mm; 4º) cascalho – partículas bem grossas com diâmetro entre 4 e 75 mm; e 5º) uma solução hiperconcentrada de NaCl (sal de cozinha).

Com esses materiais em mãos, você começou sua explicação abordando a origem dos sedimentos, que ocorre por meio dos processos de intemperismo e erosão, depois você mostrou como esses materiais que você levou para a aula se movimentam, inclusive mostrando vídeos disponíveis na internet. Por último, você mostrou como eles ficam depositados nos ambientes de sedimentação e, finalmente, como são transformados em rochas sedimentares, as quais são rígidas e coesas, diferentemente dos materiais que as formam, que são inconsolidados.

Após essa contextualização teórica, você chamou os alunos para a frente da sala e, utilizando os materiais ali expostos, fez uma atividade mais dinâmica, pedindo a participação de todos, para que eles pudessem efetivamente aprender em conjunto. Durante essa atividade, os alunos mais entusiasmados e interessados logo “quebraram o gelo” e perguntaram algumas coisas: você trouxe quatro materiais sólidos e um líquido, por que isso? Se essas partículas estiverem fluindo em um rio, por exemplo, quais serão carregadas por maiores distâncias, e por quê? Como que esses sedimentos soltos ficam agrupados de maneira tão coesa?

Agora é com você! Para que consiga responder às questões dos seus alunos, você deve ficar atento aos tipos de sedimentos que existem, como eles se movimentam por meio dos agentes de transporte e, concluindo, como essas partículas soltas acabam se tornando rochas. Leia atentamente o livro didático, ele o auxiliará nessa tarefa. Bons estudos!

## Não pode faltar

Na seção anterior, você aprendeu sobre as rochas ígneas, de modo que destacamos como elas são formadas, quais os seus tipos, modos de origem e características mineralógicas e químicas. Lembre-se de que, tanto as rochas ígneas plutônicas quanto as vulcânicas estão relacionadas à dinâmica interna do planeta. Agora, nesta seção, abordaremos as rochas sedimentares, as quais estão ligadas a processos relacionados com a dinâmica externa (exógena) da Terra. No entanto, para estudarmos as rochas sedimentares, ou seja, o produto final, temos que, primeiro, compreender como os sedimentos chegam ao ambiente de sedimentação, para então serem transformados em rochas.

A trajetória dos sedimentos começa quando ele ainda se encontra na forma de minerais dentro do material parental, isto é, uma rocha preexistente. A partir do momento que a rocha, seja ela sedimentar, ígnea ou metamórfica, se encontra exposta às condições da dinâmica externa da Terra, ela começa a sofrer um desequilíbrio e fica suscetível à deterioração causada pelos agentes

intempéricos. O **intemperismo** é o nome dado a um conjunto de modificações, tanto físicas quanto químicas, que as rochas sofrem ao aflorarem na superfície terrestre causando o enfraquecimento delas. Portanto, há basicamente dois tipos fundamentais de intemperismo: i) intemperismo físico e ii) intemperismo químico.

O intemperismo físico engloba alguns processos que causam a separação dos minerais, que antes estavam coesos, transformando a rocha em um material friável, ou seja, enfraquecido. Dentre os tipos de intemperismo físico, destacamos: i) variação diária e sazonal da temperatura, a qual causa expansão e contração térmica das rochas, causando o seu enfraquecimento; ii) alívio de pressão, causado pela exumação de massas rochosas mais profundas (alta pressão atuante) para porções mais rasas da crosta (baixa pressão atuante) gerando uma série de fraturas; e iii) penetração de raízes, que forçam sua passagem pelas fraturas das rochas em busca de nutrientes, expandindo as aberturas já existentes.

O intemperismo químico, por sua vez, compreende uma série de reações químicas que os minerais sofrem, principalmente, devido à percolação de água. Aqui destacaremos duas reações: i) dissolução é quando ocorre a solubilização dos minerais, que são separados em íons e dissolvidos na água, fenômeno muito comum nas rochas carbonáticas, visto que elas são instáveis às águas ácidas; e ii) hidrólise, é uma reação que acontece quando a água enriquece-se com  $\text{CO}_2$  dissolvido para formar o ácido carbônico, tornando a água ácida, quebrando a estrutura do mineral e liberando elementos que se recombina para formar os argilominerais (como a caulinita).



#### Pesquise mais

Para conhecer outros tipos de intemperismo que afetam as rochas e os solos da superfície da Terra, sugerimos a leitura do Capítulo 6 do livro de Wicander & Monroe, denominado "Intemperismo, Erosão e Solo", p. 123, disponível em sua biblioteca virtual, no portal Cengage Learning.

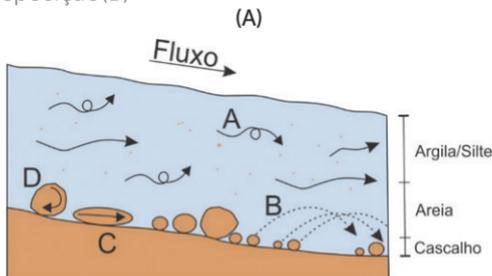
WICANDER, R.; MONROE, J. S. **Fundamentos de geologia**. Tradução H. O. Avritcher; revisão técnica M. A. Carneiro. Cengage Learning. Edições, São Paulo, 2009. 508p.

Existe um dicionário de termos geológicos on-line feito pelo serviço geológico do Brasil (<http://sigep.cprm.gov.br/glossario/>). Você pode utilizar ele no decorrer dos estudos desse livro!

Uma vez enfraquecida, a rocha fica suscetível à mobilização, pois seus fragmentos, agora menores, sofrem **erosão**. É pela ação da água, do vento, do gelo e das ondas que os grãos gerados durante o intemperismo são remobilizados de seu local de origem e transportados para outros locais. Essa etapa, conhecida na geologia sedimentar como **transporte**, envolve o carregamento das partículas por maiores distâncias. Se analisarmos o sedimento grão a grão, percebemos alguns tipos particulares de deslocamento dos sedimentos: i) os sedimentos finos (como argilas e silte) são sustentados pelo fluido que o carrega, fluindo em suspensão; ii) os sedimentos mais grosseiros (como areia e cascalho) deslocam-se por outros processos como saltação, arrasto e rolamento (Figura 2.5a).

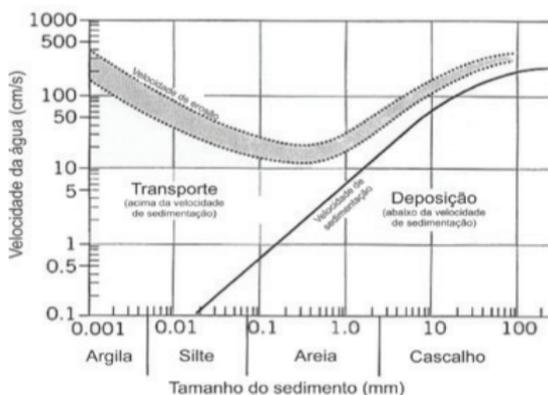
A partir do momento que essas partículas sofrem uma diminuição na sua velocidade, elas começam o processo de **deposição**, que ocorre a diferentes taxas, dependendo do diâmetro e peso do sedimento. Partículas grandes e pesadas (cascalhos) são as primeiras a sedimentarem, na sequência ocorre a deposição dos sedimentos com tamanho médio e peso intermediário (areia) e, por último, os sedimentos pequenos e leves (silte e argila), que são mobilizados por longas distâncias, mesmo que o fluido que os transporte tenha perdido quase que totalmente seu vigor. O gráfico da Figura 2.5b ilustra a relação entre o diâmetro das partículas e a velocidade do agente de transporte, nesse caso a água.

Figura 2.5 | Mecanismos de transporte grão a grão (A) e gráfico da relação transporte x deposição(B)



Fonte: elaborada pelo autor.

(B)



Fonte: adaptado de <[https://dlgb.files.wordpress.com/2008/09/hjulstrom\\_curve\\_task.jpg](https://dlgb.files.wordpress.com/2008/09/hjulstrom_curve_task.jpg)>. Acesso em: 16 set.2016.



Refleta

Acima expomos os mecanismos de transportes das partículas grão a grão, ou seja, de forma livre. No entanto, você acha que é somente assim que os sedimentos se movimentam? Explique.

Mencionamos o caso dos sedimentos clásticos (ou siliciclásticos, afinal os minerais mais abundantes e estáveis do nosso planeta são silicatos), isto é, aqueles depositados na forma de fragmentos. No entanto, há outro grupo de sedimentos na Terra, os sedimentos bioquímicos. Esses sedimentos são, na verdade, íons ou moléculas dissolvidas nas águas do solo, rios, lagos e mares que se precipitam por meio de mudanças impostas nas condições ambientais (por exemplo, a evaporação da água de uma lagoa hipersalina condiciona a precipitação de halita) de forma a gerar uma reação (bio)química. Algumas vezes distinguimos os sedimentos químicos dos bioquímicos, pois estes, geralmente, se formam devido à atividade biológica.



Exemplificando

As conchas de moluscos bivalves, que possuem um exoesqueleto calcário, cujo mineral foi secretado pelo organismo, é um exemplo de sedimento bioquímico.

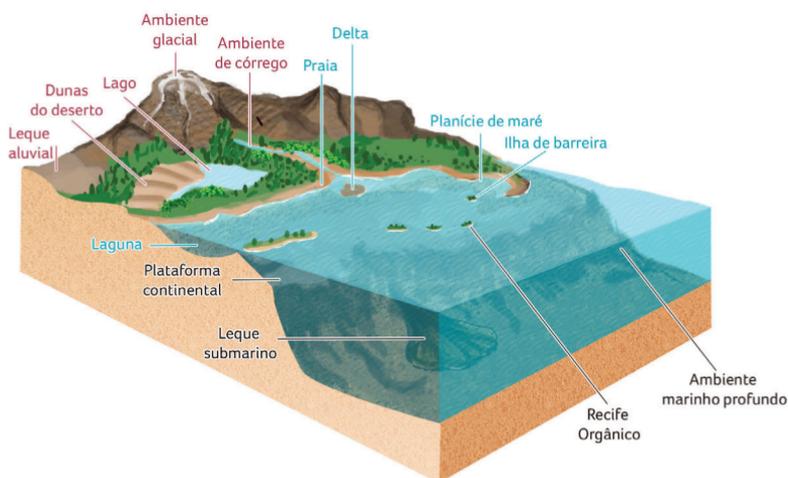
Figura 2.6| Conchas de moluscos



Fonte: <[https://c2.staticflickr.com/2/1490/25542395250\\_00fffa676\\_b.jpg](https://c2.staticflickr.com/2/1490/25542395250_00fffa676_b.jpg)>. Acesso em: 13 jan. 2017.

O transporte dos sedimentos para o seu destino final é extremamente complexo e a deposição dos sedimentos nos seus distintos ambientes é governado por fatores de ordem climática, topográfica (geomorfológica), geológica, entre outros. Por isso, definimos um **ambiente de sedimentação** como qualquer área que permita o acúmulo de sedimentos e que possua características físicas, químicas e biológicas bem definidas que as distinga de outros ambientes. De forma geral, dividimos os ambientes em: a) continentais; b) costeiros (transicionais); e c) marinhos. Em cada um desses, há outros subambientes específicos, conforme mostra a Figura 2.7.

Figura 2.7 | Ambientes de sedimentação continentais (vermelho), transicionais (azul) e marinhos (preto)



Fonte: adaptada de Wicander & Monroe (2009, p. 147).

No ambiente continental destacam-se os ambientes de sedimentação relacionados, principalmente, à ação da água e do vento. O ambiente fluvial é o principal responsável pelo carregamento dos sedimentos, mas como a dinâmica fluvial é muito ativa, o balanço erosão/transporte/deposição é bastante complexo. Tratando apenas da deposição, duas porções do ambiente fluvial ganham destaque: a) o canal fluvial, que é onde os sedimentos mais grosseiros (areia e cascalho) ficam acumulados; e b) a planície de inundação, região externa ao canal que somente é acessada em épocas em que o nível d'água extravasa a calha do rio e onde há uma intercalação de sedimentos finos e grosseiros.

Os leques aluviais, também denominados cones de dejeção, são um ambiente no qual sedimentos de variados tamanhos (mal selecionados) e que sofreram pouco transporte (texturalmente imaturos), ficam acumulados próximos à região do sopé de áreas montanhosas. Os ambientes lacustres, por sua vez, destacam-se pela acumulação de sedimentos nos lagos, isto é, corpos d'água continentais que, a depender da configuração topográfica e hidrológica, podem apresentar comunicação com outros corpos d'água (por exemplo, mares e rios). Além disso, as condições climáticas podem influenciar, no caso de ambientes áridos, na taxa de evaporação da água, fazendo com que a salinidade seja alterada, o que muitas vezes induz a precipitação de sedimentos químicos nesses lagos.

Na região costeira temos os ambientes deltaicos, que são caracterizados pela formação de uma trama de canais distributários (em forma da letra grega  $\Delta$ ), na região da foz dos rios, os quais avançam em direção ao mar. Além disso, observa-se a ocorrência de ambientes estuarinos, os quais possuem, numa visão em planta, um formato de funil. Nessa região, como a água do mar avança em direção ao continente (devido à ação das correntes e da maré), há maior influência de sedimentos trazidos do mar e também da salinidade, que é maior. A diferença entre deltas e estuário reside no fato de que aqueles entregam água e sedimentos provenientes do continente para o mar, enquanto que estes fazem justamente o oposto, redistribuindo o sedimento marinho continente adentro. Outro subambiente costeiro importante é a praia. Nessa porção geográfica, os sedimentos retrabalhados e

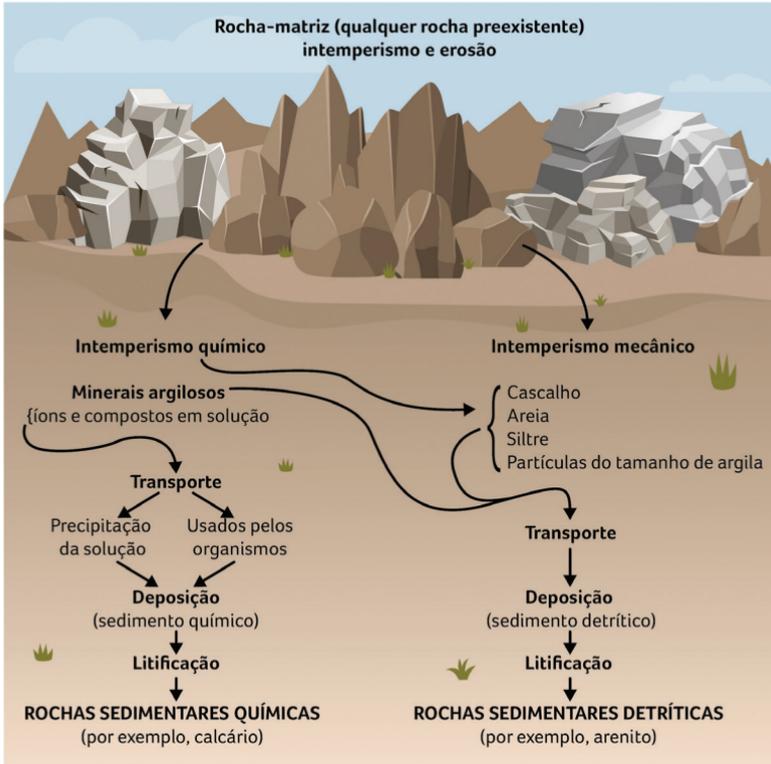
remobilizados pela ação das ondas acabam ficando depositados na forma de extensos corpos lateralmente contínuos. Devido à alta energia das ondas há uma predominância de sedimentos arenosos, geralmente bem selecionados e arredondados, isto é, texturalmente maduros.

Já o ambiente marinho é, costumeiramente, dividido em: 1) plataforma continental, que correspondem às partes submersas mais rasas; 2) talude continental, que corresponde à porção formada pela quebra abrupta do relevo submarino; e 3) planície abissal, uma zona de topografia suave localizada em águas profundas, além do sopé do talude continental. Na plataforma continental há um predomínio de sedimentos grosseiros, no entanto, à medida que avançamos em direção à planície abissal, os sedimentos mais finos vão sendo depositados gradualmente, devido à perda de energia de transporte e, conseqüentemente, formam extensos depósitos de sedimentos pelágicos (sedimentos finos de águas profundas). Entretanto, de tempos em tempos, durante eventos catastróficos altamente energéticos, os sedimentos grosseiros podem invadir até mesmo as porções mais profundas dos oceanos, formando leques submarinos.

O acúmulo final desses sedimentos, sejam eles siliciclásticos ou químicos, nesses ambientes não garante a formação da rocha sedimentar, isso porque até o momento de sedimentação eles estão inconsolidados. A formação da rocha sedimentar depende da etapa de litificação, que pode ser considerada a última etapa do "ciclosedimentar" (Figura 2.8).

A litificação, ou diagênese, envolve uma série de processos físico-químicos que irão converter o sedimento em rocha sedimentar. Na verdade, a litificação é normalmente restrita à compactação e cimentação, dois processos diagenéticos. Além desses, outros dois processos diagenéticos são comuns: dissolução e recristalização. De qualquer maneira, a ocorrência desse fenômeno pós-deposicional faz com que os sedimentos depositados inicialmente sejam alterados, tanto do ponto de vista mineralógico quanto textural.

Figura 2.8 | Trajetória dos sedimentos até sua transformação em rocha sedimentar



Fonte: Wicander & Monroe (2009, p. 144).



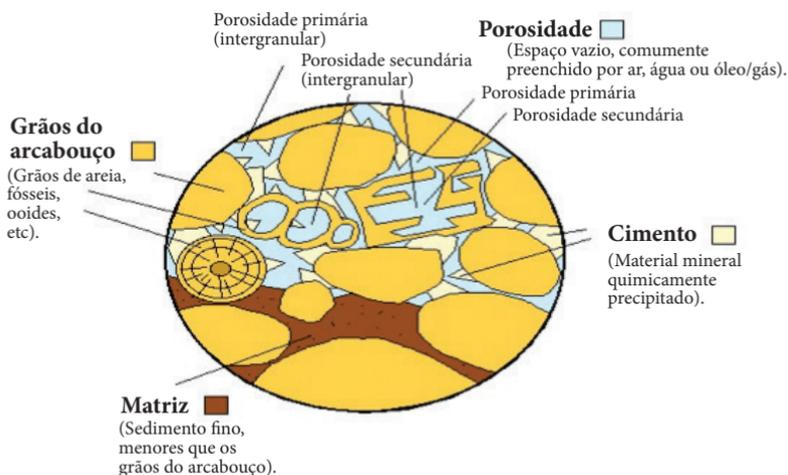
### Assimile

**Diagênese:** conjunto de processos superficiais e subsuperficiais, físicos e químicos, que atuam sobre os sedimentos, desde a sua deposição até a sua consolidação.

Logo, se considerarmos os componentes petrográficos das rochas sedimentares, conseguiremos distinguir dois grandes grupos: 1º) os componentes primários (deposicionais), que são os grãos do arcabouço (refere-se à fração principal, por exemplo, num arenito o tamanho predominante dos grãos está entre 0,062 e 2 mm, que representa a areia), matriz (material fino que se entremeia aos grãos do arcabouço) e os poros (volume de espaço vazio entre os grãos

e a matriz); e 2º) os componentes secundários (diagenéticos), que são o cimento (solução introduzida após a deposição das rochas) e a porosidade secundária (formada pela interação química entre os minerais e a solução diagenética). A Figura 2.9 ilustra de forma didática e simplificada os principais componentes das rochas sedimentares.

Figura 2.9 | Componentes primários e secundários das rochas sedimentares



Fonte: adaptada de <<http://www.gly.uga.edu/railsback/1121SedRockComps.jpeg>>. Acesso em: 4 dez. 2016.

Visto isso, podemos agora classificar as rochas, dando-as nomes que facilitam a comunicação e o entendimento sobre aspectos práticos. Apesar de existirem inúmeros critérios utilizados para a classificação, normalmente usamos critérios texturais e mineralógicos para designar tanto as rochas siliciclásticas quanto as bioquímicas (por exemplo, as carbonáticas).

Dentre os critérios texturais, e tratando das rochas siliciclásticas, o mais usado é a granulometria (tamanho) dos grãos do arcabouço. Nesse caso, rochas com grãos grossos (> 2 mm) são chamadas de conglomerados, rochas com grãos médios (entre 2 e 0,062 mm) são denominadas arenitos, rochas com grãos finos de tamanho silte (0,062 – 0,0039 mm) são designadas de siltitos e rochas com partículas menores que 0,0039 mm (argilas) recebem distintos nomes, sendo os mais importantes os argilitos e os folhelhos (apresentam fissilidade, ou seja, tendência em dividir-se em folhas segundo a estratificação).

Para as rochas carbonáticas, por exemplo, também empregamos termos granulométricos, acrescentados do prefixo “calc”, para referir-se à sua mineralogia. Portanto, os calcirruditos são rochas carbonáticas de grãos grossos, os calcarenitos são rochas de grãos do tamanho de areia e os calcilutitos são rochas de grãos carbonáticos finos. A composição mineralógica do carbonato também define se a rocha é um calcário (a maioria da rocha é formada por calcita) ou um dolomito (a rocha é majoritariamente composta por dolomita –  $MgCa(CO_3)_2$ ).



### Pesquise mais

Para saber mais detalhes sobre a classificação das rochas sedimentares, recomendamos a leitura do capítulo 7 de Wicander & Monroe (2009), denominado “Sedimentos e Rochas Sedimentares”, p. 143, este disponível em sua biblioteca virtual.

WICANDER, R.; MONROE, J. S. **Fundamentos de geologia**. Tradução H. O. Avritcher; revisão técnica M. A. Carneiro. Cengage Learning Edições, São Paulo, 2009. 508p.

A formação de extensos pacotes de rochas sedimentares ocorre nas bacias sedimentares, que são depressões na crosta terrestre onde há o acúmulo de sedimentos ao longo de milhões de anos. Acompanhadas pela subsidência tectônica e soterramento dos sedimentos superpostos, essas bacias vão crescendo em espessura. A origem das bacias está ligada a processos de escala regional, relacionados com a Tectônica de Placas. A formação dessas depressões ocorre, geralmente, em zonas divergentes em que através do movimento de separação relativo entre as placas há o desenvolvimento de duas fases de subsidência: 1ª) subsidência mecânica, que inicia-se pelo estiramento da litosfera e a geração de blocos abatidos; 2ª) subsidência térmica, na qual após o estiramento e afinamento da litosfera, há um maior fluxo de calor em direção à superfície, causando a ascensão de material magmático que pode extravasar para a superfície terrestre. Com o tempo, a litosfera, em conjunto com a astenosfera começa a esfriar, ganhando volume e aumentando sua densidade, causando um novo aprofundamento.

Há um terceiro mecanismo de subsidência que está relacionado

à compensação isostática. Esse fenômeno está relacionado à imposição de uma sobrecarga litosférica por meio do desenvolvimento de cadeias de montanhas, por exemplo. Como esta é mais densa e volumosa, ela arqueeia uma determinada região próxima, causando a formação de depressões na periferia do orógeno (cadeia de montanhas). Em muitos casos, a geração da bacia sedimentar está fundamentada na ocorrência de mais de um desses mecanismos ou até mesmo por fases em que um é mais predominante que o outro e vice-versa. O Quadro 2.1 representa algumas bacias sedimentares conforme seu enquadramento tectônico.

Quadro 2.1| Classificação das bacias sedimentares de acordo com seu contexto tectônico, com tipos de bacias e exemplos

CLASSIFICAÇÃO DAS BACIAS SEDIMENTARES		
Contexto Tectônico	Tipo de Bacia	Exemplo
Divergente	Rifte	Bacia do Recôncavo, BA
Divergente	Proto-oceânicas	Mar vermelho, África/ Oriente Médio
	Oceânicas	Zona intraoceânica do Oceânico Atlântico (próxima à Dorsal Mesoatlântica)
Convergente	Trincheiras de subducção	Zona de trincheira entre Peru e Chile
	Bacia Trás-Arco ( <i>Backarc</i> )	Mar do Japão
	Bacia Ante-Arco ( <i>Forearc</i> )	Zona Ante-Arco dos Andes Centrais, Chile
Transformante	Bacia <i>pull-apart</i>	Mar Morto, Oriente Médio
Intraplaca	Intracratônica	Bacia do Paraná
	Margem Passiva	Bacia de Campos, RJ

Fonte: adaptado de Nichols (2009).

## Sem medo de errar

Relembrando a situação hipotética lançada no início do livro didático, você levou cinco diferentes materiais para a sala de aula (argila, silte, areia, cascalho e uma solução química feita com NaCl). O objetivo era apresentar os principais grupos de sedimentos que temos na Terra, deixando a aula muito mais expositiva e didática. Esses

materiais que você trouxe foram utilizados ao final da explicação teórica e, assim que você os apresentou, os alunos começaram a surgir com suas dúvidas, as quais são expostas novamente aqui: você trouxe quatro materiais sólidos e um líquido, por que isso? Se essas partículas estiverem fluindo em um rio, por exemplo, quais serão carregadas por maiores distâncias, e por quê? Como que esses sedimentos soltos ficam agrupados de maneira tão coesa?

A primeira pergunta ilustra bem a diferença entre os principais grupos de sedimentos que temos, os quais serão fundamentais para a divisão das rochas sedimentares. Como você deve se lembrar, os sedimentos clásticos (ou siliciclásticos) são fragmentos de rochas preexistentes que foram “quebrados” em partículas menores pela ação do intemperismo e erosão. Portanto, esses sedimentos são, na verdade, grãos físicos de outras rochas, por isso você levou a argila, o silte, a areia e o cascalho, para representar esses sedimentos. Já os sedimentos químicos (ou bioquímicos, dependendo da situação) são íons ou moléculas dissolvidas nas águas do solo, rios, lagos e mares que se precipitam por meio de mudanças impostas nas condições ambientais, por exemplo, a evaporação da água. Isso justifica você ter levado o recipiente com a solução hiperconcentrada e NaCl (sal de cozinha).

Com relação à segunda pergunta, você deve lembrar seus alunos que a distância percorrida pelos sedimentos é variável, mas depende, fundamentalmente, da energia do fluido que o transporta e o do seu peso. Levando em consideração a situação da pergunta, quando o rio estiver com alta energia (após uma grande tempestade, por exemplo) ele conseguirá carregar praticamente qualquer tamanho de sedimento. No entanto, quando a tempestade passar e, conseqüentemente a energia se dissipar, ele irá transportar apenas as partículas mais finas, as quais fluem por suspensão, isto é, ao sabor das correntes do rio. Logo, a situação mais comum é que as partículas finas (argila e silte) sejam levadas a maiores distâncias, enquanto as mais grossas (areia e, principalmente, cascalho) ficam acumuladas mais a montante.

Finalmente, solucionando o último questionamento, você deve enfatizar que a transformação dos sedimentos em rochas sedimentares envolve uma série de processos físico-químicos, os quais acontecem durante a litificação. Entre eles, os principais são a compactação,

a qual diminuirá o espaço entre os grãos, e a cimentação, que irá preencher os espaços vazios, ligando os componentes primários da rocha, ou seja, os grãos do arcabouço e a matriz. Assim, a rocha ficará coesa e rígida.

## Avançando na prática

### Geologia no cotidiano

#### Descrição da situação-problema

Durante uma de suas viagens de férias, na qual visitou o Deserto de Atacama e uma praia chilena, você, professor, notou uma grande diferença na areia desses dois locais e percebeu que poderia usar esses materiais para exemplificar aos seus alunos no próximo ano alguns dos processos de intemperismo e transporte de sedimentos. Dessa forma, você levou um saquinho com a areia da montanha, repleto de grãos mais grosseiros e irregulares de diversas cores, e um saquinho da areia branca, puramente composta por grãos de quartzo (extremamente resistentes) bem arredondados da praia para casa.

Durante a aula prática sobre processos sedimentares, você levou essas amostras para o laboratório de ciências da sua escola, para que os alunos pudessem observar as diferenças entre as areias com uma lupa. Eles ficaram muito intrigados e lhe perguntaram: por que esses materiais são tão diferentes se ambos são areia? Como é possível que a areia da montanha tenha grãos tão irregulares, angulosos, quando comparada com a areia da praia? O que faz com que a areia da praia tenha apenas grãos de quartzo? E, o mais importante, o que esses aspectos nos indicam sobre os processos sofridos por esses sedimentos?

#### Resolução da situação-problema

Para responder a essas questões, lembre ao longo da seção os processos de transporte e deposição sofridos pelos fragmentos logo após a ação intempérica. Como você deve recordar, fragmentos maiores são transportados através de saltação, arrasto e rolamento, durante esse processo os grãos vão se chocando uns com os outros

de forma que seus grãos vão ficando cada vez mais arredondados. Ao longo do transporte, grãos de minerais menos resistentes, como feldspatos e micas são alterados e fragmentados mais facilmente para argila e silte e apenas os grãos tenazes (resistentes à fragmentação e alteração) de quartzo continuam sua viagem.

Esses indícios sugerem então, que areia da praia é constituída quase que unicamente por quartzo, pois este é o mineral mais resistente ao processo de transporte, e uma vez que os grãos são bem arredondados, sugere-se que eles viajaram grande distância desde sua rocha fonte até sofrerem deposição. Já os minerais maiores, de diversos tamanhos e altamente angulosos encontram-se depositados próximos à rocha que os originou, caso contrário tais constituintes não estariam presentes nem os grãos seriam angulosos devido ao curto transporte que não foi suficiente para causar arredondamento dos grãos, como acontece na areia da praia.

### Faça valer a pena

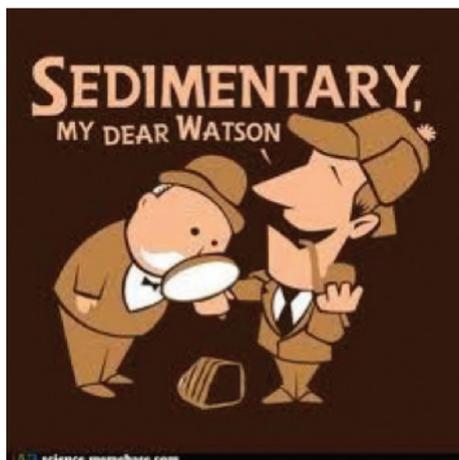
**1.** A diagênese é o processo de alterações físicas e químicas que leva à formação das rochas sedimentares (por exemplo, arenitos, siltitos, folhelhos, entre outros), as quais representam 75% de todas as rochas expostas na superfície terrestre.

Assim, sobre o processo de formação das rochas sedimentares, a diagênese, é correto afirmar que:

- a) A compactação não é um tipo de diagênese.
- b) A dissolução é um tipo de diagênese.
- c) A dissolução não é um tipo de diagênese.
- d) O arrefecimento é um tipo de diagênese.
- e) O metamorfismo é um tipo de diagênese.

**2.** As rochas sedimentares são compostas por sedimentos, sejam eles físicos (fragmentos) ou químicos. No entanto, apesar de parecer simples, conforme aparenta mostrar a figura a seguir, o reconhecimento e o estudo das rochas sedimentares podem ser bastante complicados,

principalmente devido à grande complexidade dos processos que envolvem a sua formação.



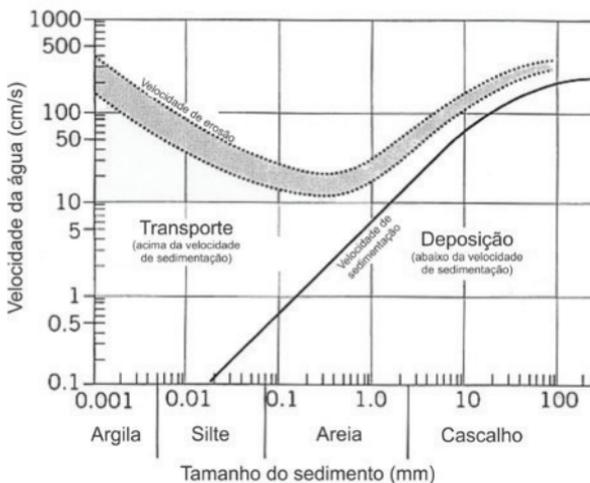
Fonte: <<https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/236x/27/8e/3a/278e3a5f024f0f27469b6cec12cb01fd.jpg>>. Acesso em: 5 dez. 2016.

Sobre as rochas sedimentares, assinale a alternativa verdadeira:

- a) As rochas sedimentares dividem-se em dois grandes grupos: as siliciclásticas e as carbonáticas.
- b) Os principais componentes deposicionais das rochas são os grãos do arcabouço, a matriz e os poros primários.
- c) Tanto a porosidade secundária quanto a matriz são elementos pós-deposicionais, isto é, diagenéticos.
- d) As rochas sedimentares são classificadas apenas quanto à sua textura.
- e) A diagênese envolve a transformação apenas dos sedimentos por compactação e cimentação.

**3.** No início do século XX, o geógrafo sueco Henning Filip Hjulström produziu um gráfico para determinar se um rio erode, transporta ou deposita sedimentos. Esse gráfico (figura a seguir) conhecido como curva de Hjulström é

muito utilizado por hidrólogos e geólogos, e leva em conta o tamanho da partícula e a velocidade da água.



Fonte: adaptado de <[https://dlgb.files.wordpress.com/2008/09/hjulstrom\\_curve\\_task.jpg](https://dlgb.files.wordpress.com/2008/09/hjulstrom_curve_task.jpg)>. Acesso em: 16 set. 2016.

Considerando as informações e os dados da curva de Hjulström, é possível afirmar que:

- a) O cascalho possui maior velocidade de deposição que a areia.
- b) A areia possui maior velocidade de deposição que o cascalho.
- c) O silte possui maior velocidade de deposição que o cascalho.
- d) O silte possui maior velocidade de deposição que a areia.
- e) A argila possui maior velocidade de deposição que o silte.

## Seção 2.3

### Rochas metamórficas

#### Diálogo aberto

Caro aluno, nas Seções 2.1 e 2.2 desta unidade você conheceu os processos que dão origem às rochas ígneas e sedimentares, ligadas à dinâmica interna e externa da Terra. Nesta seção, estudaremos as transformações pelas quais essas passam, até originar as rochas metamórficas e encerrar, ou dar início, a um novo ciclo das rochas. Considerando que muitos dos processos metamórficos são também responsáveis pela concentração de recursos minerais, estudar rochas metamórficas é fundamental.

Imagine então que você, como conhecedor das rochas metamórficas, foi convidado por um colega seu, também professor, a realizar uma atividade prática com ele e seus alunos, estudantes de graduação em geologia da universidade local. Vocês os levaram a uma viagem de campo com o intuito de realizarem o levantamento geológico de uma determinada área contendo variações litológicas. Para isso, vocês foram até uma pedreira de granito usada como rocha ornamental e ao retornar, apenas 500 m longe dessa pedreira, iniciaram o levantamento ao longo da rodovia. O perfil realizado pelos alunos tinha extensão total de 150 m, ao longo dos quais foram feitos três pontos espaçados em 50 m para coleta de dados. No primeiro ponto, o mais próximo da pedreira, eles encontraram uma rocha escura (preto esverdeada) de alta coesão e sem estruturação visível. Já no segundo local, afloravam rochas escuras (cinza amarronzada) fortemente foliadas com certo brilho sedoso e certos minerais maiores que, você professor, identificou como sendo estaurolita. No terceiro e mais distante afloramento, apareceram rochas mais avermelhadas, com a foliação mais fraca que a das rochas do ponto anterior. Você pediu aos seus alunos para anotarem todos os detalhes possíveis em cada ponto, e fazer uma tabela que refletisse na disposição espacial desses afloramentos, dos mais distantes aos mais próximos da pedreira visitada.

No caminho de retorno, você pediu aos alunos que utilizassem as anotações feitas em campo para refletirem e responderem os questionamentos: que tipo de rochas são essas? Qual a sua relação com a pedreira, se existir? O que a estruturação pode nos dizer sobre o grau metamórfico dessas rochas? E a paragénese mineral, qual a fácies ou zona metamórfica dessas rochas?

Refleta sobre esses pontos você também. Depois, tente respondê-los ao término desta seção, na qual estudaremos as rochas metamórficas existentes, sua origem e modo de ocorrência, classificação a partir de texturas, estruturas e os tipos de metamorfismos que ocorrem. Boa leitura!

## Não pode faltar

Nas Seções 2.1 e 2.2 desta unidade você estudou os processos que dão origem às rochas ígneas e sedimentares e as características estruturais, mineralógicas e texturais intrínsecas a cada uma delas. Nesta seção, para encerrar o ciclo das rochas, estudaremos processos que alteram rochas ígneas e/ou sedimentares em termos de composição e estruturas no estado sólido, originando uma rocha metamórfica.

À rocha original, que foi metamorfizada, é dado o nome de **protólito**, que quando exposto a determinadas condições de pressão e temperatura (seja ele ígneo, sedimentar ou até metamórfico) passa por uma série de reações, ainda em estado sólido, as quais alteram características químicas, texturais, estruturais e mineralógicas para formar uma nova rocha.



### Assimile

Protólito é o nome dado a uma rocha que foi posteriormente metamorfizada, podendo ser de qualquer natureza, seja ela de origem ígnea, sedimentar ou até metamórfica.

Por exemplo, o gnaiss é uma rocha metamórfica com protólito granítico, ou o xisto é uma rocha metamórfica com protólito sedimentar.

Em geral, processos de metamorfismo estão associados aos processos tectônicos, em zonas de margens convergentes onde há o desenvolvimento de grandes cadeias de montanhas, mas também ocorrem associados às dorsais meso-oceânicas, ao longo de zonas de falha ou em crateras de impactos meteoríticos. Isso acontece, pois é nessas regiões que **fatores condicionantes** do metamorfismo, como alta temperatura, pressão e presença de fluidos atuam.

Devido aos processos tectônicos, rochas sedimentares podem ser transportadas para o interior da crosta, onde a temperatura é mais alta. Dessa forma, alguns dos minerais presentes nas rochas se tornam instáveis e recristalizam para minerais estáveis em alta temperatura, como a granada, por exemplo. Muitas vezes esses minerais são usados como geotermômetros para estimar a temperatura de recristalização, já que cada um apresenta um determinado intervalo de estabilidade de recristalização e o aumento da temperatura é proporcional ao aumento na profundidade, o chamado grau geotérmico, em que a temperatura aumenta em média 30 °C por km. Em geral, as rochas são metamorizadas em temperaturas entre 200 °C e 850 °C, podendo atingir limites de 650 °C a 1200 °C dependendo do protólito e da presença de água no sistema. Da mesma forma que a temperatura, a pressão aumenta com a profundidade, causando transformações composicionais e texturais no protólito.

A pressão na superfície da Terra é de aproximadamente 1 bar ou 1 atm. Em regiões profundas da crosta, em que ocorre o metamorfismo, as rochas são submetidas a pressões litostáticas na ordem de 12 kbar, ou seja, 12 mil vezes maior que a pressão na superfície. Em função dessa pressão, muitos dos minerais recristalizados se desenvolvem seguindo uma orientação preferencial de forma, dando aspecto de "folhas" ou lâminas à rocha.



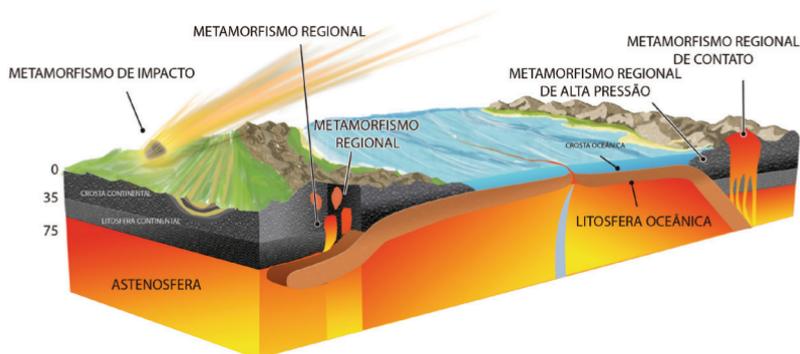
Refleta

É comum que os processos metamórficos ocorram sob condições de alta pressão e temperatura. Em qual situação, ambiente tectônico, é possível que ocorra metamorfismo de alta pressão, mas baixa temperatura? Justifique.

Durante a transformação do protólito em seu equivalente metamórfico ocorre uma série de reações químicas que buscam reduzir a energia livre do sistema até que este atinja um novo estado de equilíbrio. Para que essas alterações nas rochas ocorram, a rocha precisa passar por determinados **processos físico-químicos do metamorfismo**. Algumas reações envolvem apenas fases sólidas, outras fases fluidas resultando na cristalização de minerais hidratados ou a alteração de fases fluidas resultando em uma fase anidra e outra rica em  $H_2O$ . Reações são favorecidas em rochas de grãos finos, mais porosas e constituídas por minerais hidratados, quando submetidas a altas temperaturas. Algumas rochas, apesar de expostas a altas condições de temperatura e pressão por um determinado tempo, podem permanecer imutáveis devido à sua constituição anidra, maciça e de granulação grosseira.

Devido a fatores como localização, extensão crustal e parâmetros físicos envolvidos, os processos que dão origem às rochas metamórficas apresentam características específicas, que refletem essas condições, e por isso são classificados em: metamorfismo regional, metamorfismo de contato e metamorfismo de impacto (Figura 2.10).

Figura 2.10 | Os tipos de metamorfismo e onde ocorrem



Fonte: Press et al. (2006, p. 135).

○ **metamorfismo regional**, ou dinâmico, está geralmente associado aos cinturões orogênicos, nos limites convergentes

de placas, em que se formam as cadeias de montanhas e alcançam extensas regiões e níveis profundos da crosta. As transformações metamórficas ocorrem devido à ação combinada de temperatura e pressão (650 °C a 750 °C e de 8 kbar a 12 kbar). Esse tipo de metamorfismo é o responsável pela existência da maioria das rochas metamórficas do planeta, estas que se encontram fortemente deformadas (dobras e falhas) e também apresentam estrutura foliada.

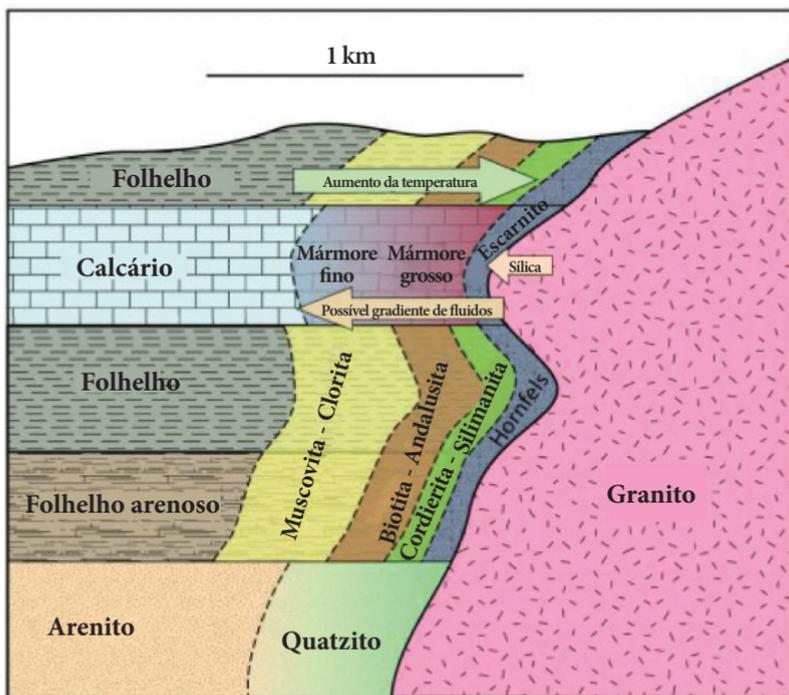
O **metamorfismo de contato**, ou termal, ocorre nas rochas encaixantes de intrusões magmáticas, cujo calor emitido pelo magma do corpo intrusivo altera os minerais da rocha encaixante formando uma auréola de metamorfismo ao redor da intrusão. A extensão dessa auréola depende do tamanho, da temperatura do corpo intrusivo injetado, e também do tempo de atuação da intrusão. Em profundidade, onde as rochas adjacentes já se encontram em temperatura elevada, a intrusão não causa tanto metamorfismo quanto em regiões intermediárias da crosta. É característico de auréolas apresentarem zoneamento metamórfico, ou seja, nas proximidades do corpo intrusivo a assembleia será de minerais de alta temperatura, como minerais anidros, granada e piroxênio. Já nas porções mais distais há o predomínio de minerais hidratados, estáveis em baixa temperatura, principalmente micas.



### Exemplificando

A intrusão do corpo granítico causa aumento de temperatura nas rochas adjacentes (Figura 2.11), e possivelmente percolação de fluidos. Devido a esse aumento de temperatura as rochas que se encontram na auréola de metamorfismo são recristalizadas. O arenito passa a ser quartzito, o calcário é transformado em mármore e as rochas argilosas são metamorfizadas para xisto.

Figura 2.11 | O desenvolvimento das fases e assembleias minerais no metamorfismo de contato



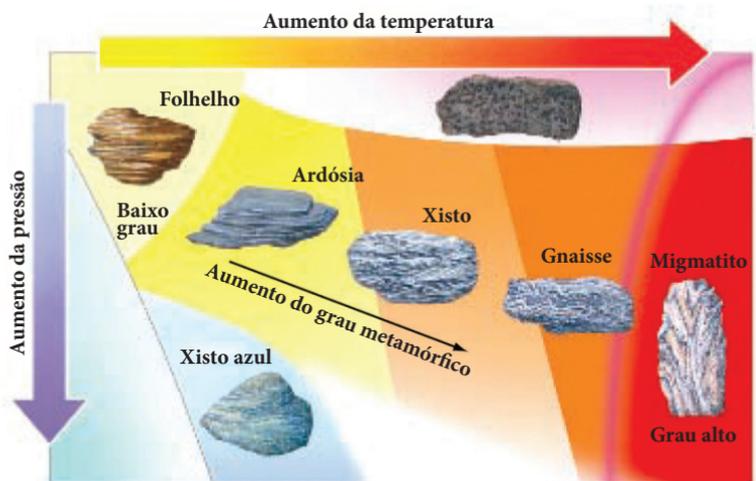
Fonte: <<http://kellyandrade99.wixsite.com/minimal-layout-pt/blank-kw73e?lightbox=dataitem-1ofvsufx>> Acesso em: 19 dez. 2016.

Um terceiro tipo, porém menos comum na crosta terrestre, é o **metamorfismo de impacto**, este tipo acontece de forma localizada, pois está associado ao impacto de corpos meteoríticos. Durante o choque a energia é liberada na forma de ondas, que fraturam as rochas e formam a cratera de impacto, e de calor (pode atingir até 5.000 °C), vaporizando as rochas ao redor. Essas ondas são dissipadas muito rapidamente e os minerais se reequilibram instantaneamente, formando polimorfos de alta pressão nos minerais, stishovita e coesita do quartzo, por exemplo.

Fatores como pressão, temperatura e assembleias minerais também são usadas para classificar as rochas dentro de um **grau metamórfico**. As rochas formadas sob condições de baixa temperatura, entre 200 °C e 320 °C, são consideradas rochas de grau baixo, como ardósias e filitos (Figura 2.12). Enquanto as

formadas em temperaturas acima de 600 °C, gnaisses e migmatitos, por exemplo, são as chamadas rochas metamórficas de alto grau. Rochas de grau intermediário são formadas dentro desse intervalo de temperatura.

Figura 2.12 | Exemplos de rochas metamórficas de acordo com o grau metamórfico



Fonte: Marshak (2008, p. 250).

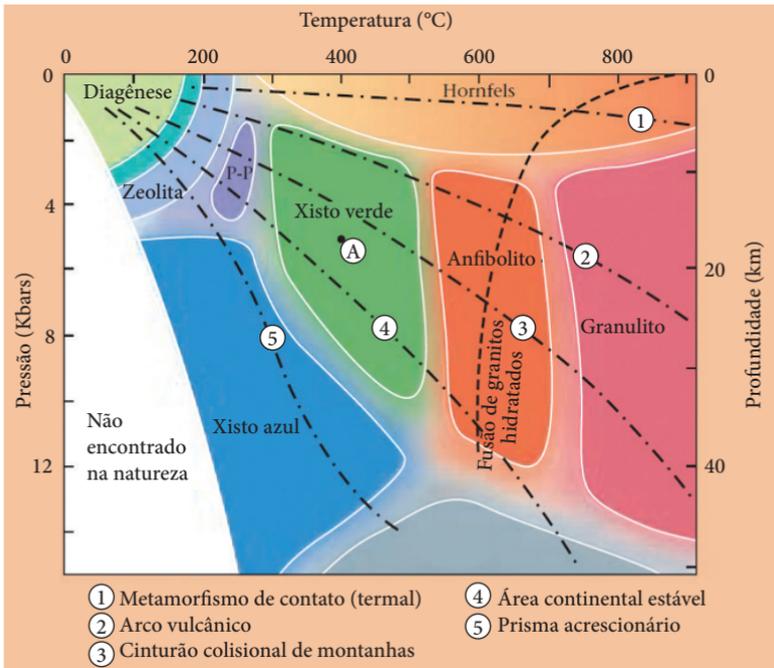
Durante o metamorfismo a temperatura e pressão aumentam progressivamente, causando recristalização e neocristalização, e como consequência grãos mais grossos ou novos minerais, respectivamente. Quanto mais alto o grau de uma rocha, mais "seca" ela será em termos de minerais que possuem água em sua composição. Quando o metamorfismo ocorre ao mesmo tempo que a pressão e a temperatura diminuem, ocorre o chamado **retrometamorfismo**. Para que o retrometamorfismo aconteça é necessária a presença de fluidos na rocha.

Os processos de alteração que ocorrem durante o metamorfismo buscam atingir um nível de equilíbrio e estabilidade entre as fases minerais e as condições de pressão e temperatura sob as quais foram formadas. Como consequência, certos minerais desenvolvem-se em intervalos de temperatura e pressão específicos, esses intervalos são chamados de zonas metamórficas. Cada **zona metamórfica** é definida pelo aparecimento de minerais-índice de: clorita, biotita,

granada, estauroлита, cianita e silimanita, da temperatura mais baixa para a mais alta.

Assembleias minerais, ou paragéneses mineral, é um conjunto de minerais que ocorrem associados, pois formaram-se sob as mesmas condições termodinâmicas (pressão, temperatura e voláteis) e apresentam equilíbrio. Além de marcarem zonas metamórficas também definem variações no grau metamórfico em função da pressão e temperatura, por isso rochas metamorfizadas sob condições semelhantes e que apresentam a mesma assembleia mineral pertencem a uma mesma **fácies metamórfica** (Figura 2.13).

Figura 2.13 | As diferentes fácies metamórficas nas quais as rochas metamórficas são formadas



Fonte: Marshak (2008, p. 242).

A fácies xisto verde se desenvolve em baixo grau e é marcada pela presença de minerais de clorita, epidoto e actinolita (anfíbólio). A fácies anfíbólio é caracterizada por minerais de gradiente médio, na transição entre metamorfismo de médio para alto grau. Em protólitos de rochas básicas a paragéneses mineral é constituída por hornblenda

e plagioclásio. Já as rochas de protólito pelítico apresentam biotita, muscovita e granada em abundância. A fácies granulito é marcada por alta pressão e temperatura, e pelo desaparecimento de fases minerais hidratadas e aparecimento de minerais como ortopirôxenos e olivina, ambos anidros. A fácies hornfels ocorre em auréolas de metamorfismo de contato e apresenta mineralogia variada. Já a fácies xisto azul é marcada por assembleias minerais que indicam alta densidade e baixa temperatura, como lawsonita, aragonita, clorita, e glaucofânio mineral de cor azul que dá nome à fácies. Por fim, a fácies eclogito apresenta minerais desenvolvidos em alta pressão (>12 kbar) e alta temperatura, como no caso de placas oceânicas transportadas para o manto em zonas de subducção.



### Pesquise mais

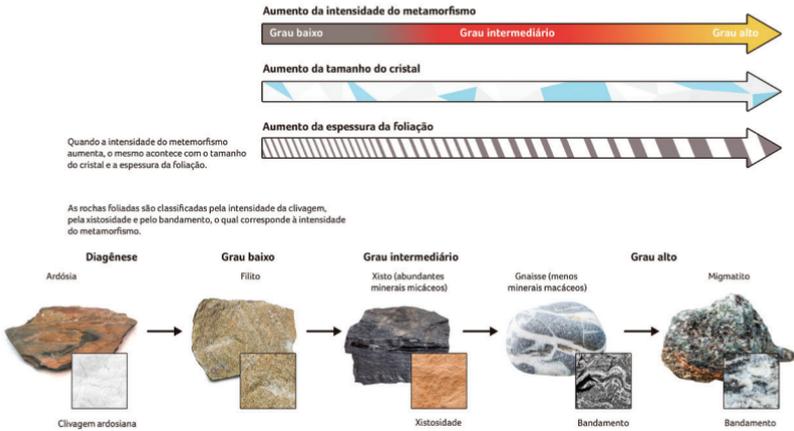
Se você se interessou e gostaria de saber mais sobre as rochas metamórficas, o capítulo 18, Rochas Metamórficas, do livro *Decifrando a Terra*, poderá ajudá-lo.

FAIRCHILD, T. et al. **Decifrando a Terra**. 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009.

Disponível em: <<http://geografialinks.com/site/wp-content/uploads/2010/03/18-ROCHAS-METAM%C3%93RFICAS.pdf>>. Acesso em: 3 fev. 2017.

Combinado com as paragêneses minerais, fácies e grau metamórfico, aspectos estruturais são muito importantes durante a descrição e classificação de rochas metamórficas. A textura, ou estrutura em uma rocha metamórfica é diretamente determinada pelo tamanho, forma e orientações dos seus constituintes minerais. A estrutura mais comum de rochas metamórficas é a foliação, uma vez que a pressão exercida sobre a rocha faz com que os minerais placoides, como micas e clorita, cresçam com forte orientação de forma, formando planos paralelos que se repetem ao longo da rocha. Se essa foliação for fraca, se diz que a rocha tem clivagem ardosiana. Com o aumento do grau metamórfico, os cristais de mica crescem e os planos de foliação se tornam mais proeminentes e definidos (Figura 2.14), até que essa foliação passe a ser considerada bandamento composicional devido à segregação dos minerais em rochas de grau mais alto, como gnaisses e migmatitos.

Figura 2.14 | A progressão da estruturação das rochas com o aumento do grau metamórfico



Fonte: Press (2006, p. 234).

## Sem medo de errar

Retomando o cenário do início da unidade, você e seu colega levaram estudantes de graduação em geologia da universidade local para uma atividade de campo em que eles tiveram a oportunidade de estudar com mais afinco as rochas metamórficas. Para que isso ocorresse, você os levou até uma pedreira e fez uma parada de 500 m depois para que os alunos realizassem um perfil. Você pediu aos alunos que utilizassem as anotações feitas em campo para refletirem e responderem aos questionamentos: Que tipo de rochas são essas? Qual a sua relação com a pedreira, se existir? O que a estruturação pode nos dizer sobre o grau metamórfico dessas rochas? E a paragênese mineral, qual a fácies ou zona metamórfica dessas rochas?

Como vimos ao longo da unidade, o metamorfismo pode ser do tipo regional ou de contato. Nesse caso, a presença da rocha coesa sem estruturação definida é compatível com o tipo de rocha proveniente do metamorfismo de contato. Vimos que esse tipo de rocha se forma na auréola interna desse tipo de metamorfismo, que na região teria sido causado pela intrusão do corpo que deu origem à rocha de granulação grossa da pedreira, o granito.

Agora você também já sabe que as rochas metamórficas são classificadas quanto ao grau, fácies e zona metamórfica, de acordo com a temperatura, pressão e paragênese mineral presentes. Sendo assim, as rochas mais próximas ao corpo intrusivo (pedreira), tendem a ser de grau mais alto (alta T), apresentarem foliação melhor desenvolvida devido ao crescimento dos minerais serem favorecidos nessas condições, além da paragênese mineral zona da biotita/estaurolita, por isso a cor escura e o brilho sedoso e a presença de cristais de estaurolita no segundo ponto do perfil. Quanto mais longe da fonte de calor, mais baixo o grau metamórfico e estruturação da rocha metamorfozada, por isso é seguro dizer que a rocha avermelhada do ponto mais distante da pedreira encontra-se na transição do filito para o xisto, uma rocha de baixo grau metamorfozada em condições da fácies xisto verde.

## Avançando na prática

### Os enigmas das rochas metamórficas

#### Descrição da situação-problema

Imagine agora que depois de terminar a graduação, você resolveu se especializar em geologia e recursos naturais e, visando isso, buscou por possíveis programas de pós-graduação que lhe oferecessem a qualificação desejada. Feito isso, você se inscreveu no processo seletivo, enviou os documentos, participou de uma entrevista, mas, para ser finalmente aceito, você teria que realizar uma prova de conhecimento específico de geologia. Por isso, para não desperdiçar a oportunidade de realizar uma especialização numa área do conhecimento que você tanto deseja, você precisa estudar.

Com os livros em mãos, você decidiu elaborar uma série de esquemas e resumos que lhe auxiliam no processo de aprendizagem. Nesse momento, você estava estudando sobre o processo de metamorfismo e as rochas metamórficas, mas algumas dúvidas começaram a surgir: Quais são os fatores condicionantes mais importantes para a transformação das rochas? Quais são os tipos de metamorfismo que existem? O que é grau metamórfico e quais os seus exemplos?

## Resolução da situação-problema

Como você estudou nesta seção, há pelo menos três fatores que influenciam no processo de metamorfismo de uma rocha, os quais levam a modificações na estrutura, textura e composição mineralógica do protólito (a rocha mãe). Os fatores principais são: 1) temperatura, pois acima de 200 °C os minerais das rochas começam a sofrer reações químicas criando novos arranjos e assembleias; 2) pressão, que auxilia no processo de transformação da textura e mineralogia; e 3) ocorrência de fluidos, já que os fluidos transportam, além de CO<sub>2</sub> dissolvido, substâncias químicas solúveis em água quente sob pressão que reagem com os componentes mineralógicos de outras rochas, transformando-os e podendo, inclusive, gerar depósitos de minérios valiosos.

Com relação à sua segunda dúvida, estudamos que há o metamorfismo regional, aquele que ocorre por meio do aumento gradual de pressão e temperatura, como o que ocorre nas zonas de montanhas e subducção, o metamorfismo de contato, que está relacionado ao aumento de temperatura pontual, sem muita influência da pressão, e por fim, o metamorfismo de impacto, menos comum, associado à temperatura super alta e pressão.

Concluindo e respondendo ao seu último questionamento, você deve se lembrar que o grau metamórfico refere-se à intensidade do metamorfismo que determinada rocha experimentou, ou seja, ele reflete, de certa forma, a temperatura e pressão que causaram a transformação da rocha. O grau metamórfico pode ser baixo, intermediário ou alto. A distinção é normalmente feita por meio dos minerais-índice dentro de uma assembleia de minerais, por isso, minerais como a clorita e biotita geralmente indicam metamorfismo de baixo grau, ao passo que granada e estauroilita sugerem rochas de grau intermediário e sillimanita e piroxênio estão geralmente associados a altos graus de metamorfismo.

### Faça valer a pena

**1.** Devido a fatores como localização e extensão na crosta, parâmetros físicos envolvidos e o tipo de rocha

metamórfica originada, podemos dizer sob qual tipo de regime determinada rocha foi metamorfizada.

Levando em conta as informações apresentadas acima, assinale a alternativa correta:

- a) Metamorfismo regional não está associado a rochas deformadas.
- b) Metamorfismo de contato é desenvolvido nas rochas encaixantes de intrusões magmáticas.
- c) Metamorfismo de contato é responsável por gerar estruturação nas rochas, como foliação.
- d) Metamorfismo de impacto ocorre em profundidade crustal.
- e) Metamorfismo de contato ocorre devido ao impacto de corpo meteorítico com a superfície do planeta.

**2.** Os mármore são talvez a rocha metamórfica mais conhecida para o público em geral. Grande parte de sua fama se deve à sua utilização como rocha ornamental, destinada principalmente ao adorno e revestimento de móveis e paredes nas residências e edifícios. No entanto, o mármore não é a única rocha metamórfica que possuímos. Na realidade, temos uma infinidade de rochas metamórficas que são importantes tanto do ponto de vista científico quanto industrial.

Com relação às rochas metamórficas, seus minerais e características, é verdadeiro afirmar que:

- a) A natureza do protólito (rocha mãe) pouco influencia na geração da rocha metamórfica.
- b) Os fluidos gerados durante o metamorfismo podem transportar substâncias químicas raras que poderão dar origem a depósitos minerais econômicos (jazida mineral).
- c) O metamorfismo regional somente acontece em uma determinada região, geralmente pouco extensa.
- d) Para diagnosticar se uma rocha é metamórfica, utilizamos apenas a sua mineralogia.
- e) Por se tratar de uma rocha pouco coesa, o quartzito não pode ser utilizado como brita na construção civil.

**3.** No planeta Terra existem três grupos de rochas: as ígneas, as sedimentares e as metamórficas. Os dois primeiros grupos de rochas são formados por intermédio dos processos de resfriamento do magma e litificação, respectivamente. No entanto, as rochas metamórficas são formadas a partir de modificações de uma rocha já preexistente, o chamado protólito.

Assim, sobre o grupo das rochas metamórficas, é correto afirmar que sua origem se dá a partir da:

- a) Transformação da textura e estrutura do protólito por meio do aumento da temperatura, pressão e presença de fluidos.
- b) Transformação da estrutura e composição mineralógica do protólito por meio do aumento da temperatura, pressão e presença de fluidos.
- c) Transformação da textura e composição mineralógica do protólito por meio do aumento da temperatura, pressão e presença de fluidos.
- d) Transformação da estrutura, textura e composição mineralógica do protólito por meio do aumento da temperatura, pressão e presença de fluidos.
- e) Transformação da estrutura e composição mineralógica do protólito por meio da redução da temperatura, pressão e presença de fluidos.

# Referências

FAIRCHILD, T. et al. **Decifrando a Terra**. 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009.

MARSHAK, S. Earth: **portrait of a planet**. 3. ed. Nova Iorque: W. W. Norton & Cia Ltda., 2008.

NICHOLS, G. **Sedimentology and stratigraphy**. Blackwell Publishing Company. p. 432, 2009.

PRESS, F. et al. **Para entender a Terra**. Tradução: MENEGAT, R. (coord.). 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

WICANDER, R., MONROE, J. S. **Fundamentos de geologia**. Tradução H. O. Avritcher; revisão técnica M. A. Carneiro. São Paulo: Cengage Learning Edições, 2009. 508p.

# Geologia aplicada

## Convite ao estudo

Caro aluno, nas Unidades 1 e 2 deste livro foram abordados os eventos que originaram o Universo, o Sistema Solar e o planeta Terra, bem como os processos responsáveis pela formação e alteração das rochas ígneas, sedimentares e metamórficas e os fenômenos capazes de alterar essas rochas, como a erosão e terremotos. Agora, você conhecerá técnicas utilizadas por geólogos ao estudarem as mais diversas rochas, na tentativa de identificar os fenômenos naturais que aconteceram no planeta há milhões de anos para contar a história geológica da Terra. Seja por meio de métodos relativos, seja por meio do registro fóssil utilizado por paleontólogos, ou métodos absolutos, como as datações isotópicas, conhecer o passado é fundamental para entender o presente. Portanto, ser capaz de compreender o tempo geológico da Terra e os princípios básicos da paleontologia é um dos resultados de aprendizagem que esperamos de você nesta unidade.

Além disso, entender o presente não só se faz importante em termos de conhecimento, mas principalmente na busca por recursos naturais, como a água. Assim, outro resultado de aprendizagem esperado é o de saber a dinâmica das águas superficiais e subterrâneas, muito importante e necessária na atualidade, em tempos de escassez e uso indiscriminado de aquíferos, para que o futuro desse recurso essencial seja assegurado.

Para assimilar melhor esses conteúdos, incentivamos você se colocar novamente na posição de docente (tanto de colégio como universidade). Imagine que você, no colégio, aproveitou o final do bimestre para fazer uma avaliação mais abrangente dos

seus alunos, de modo que eles necessitassem refletir de modo crítico e aplicar os seus conhecimentos abordando conceitos e métodos de estratigrafia, datações relativas e do ciclo hidrológico. Adicionalmente, sua função na universidade demandará trabalho de extensão e interação com a sociedade. Ao final desta unidade, você e os seus alunos terão desenvolvido a capacidade de relacionar os eventos do passado com os acontecimentos do presente e assim compreender melhor a dinâmica atual de transformações que moldam a cada dia o ambiente a nossa volta.

Refleta: quais processos levaram à atual configuração dos continentes? Quais as técnicas utilizadas para datar os fósseis encontrados? E como tudo isso influencia no meio à nossa volta e na disponibilidade de recursos naturais?

Isso é uma amostra do que você deverá saber para passar aos seus estudantes. Você precisará guiá-los na busca por essas e outras respostas. Portanto, o estudo desta unidade de ensino, que envolverá geocronologia, paleontologia e hidrogeologia, será fundamental para aquisição dos conhecimentos que serão transmitidos a eles e para alcançar os nossos resultados de aprendizagem pretendidos!

# Seção 3.1

## Geocronologia

### Diálogo aberto

Nesta seção, estudaremos a história geológica da Terra no que se refere às modificações físicas e químicas do planeta ao longo de 4,6 bilhões de anos, e os sucessivos eventos de colisão e separação de continentes que formaram cadeias de montanhas e zonas de subducção. Conheceremos também, como surgiram as primeiras formas de vida e a diversificação das espécies, até as grandes extinções que aniquilaram os dinossauros possibilitando que os mamíferos e os humanos dominassem. Adicionalmente, você conhecerá as principais ferramentas e métodos utilizados pelos geólogos para encaixar as peças do quebra-cabeça que é a história geológica da Terra!

Retomando a situação do “Convite ao estudo”, você, professor, avaliará agora a assimilação do conteúdo e o pensamento crítico dos alunos. Em uma simulação, você os levou à quadra de esportes do colégio onde havia, previamente, desenhado no chão variações litológicas e estruturas geológicas, como aquelas encontradas pelos geólogos em serviço. Cada aluno percorreu um trajeto já definido de sete paradas, que abrangia todas as variações do local, ao longo do qual deveria fazer um desenho e anotações sobre suas observações. O primeiro aluno começou seu trajeto e na primeira parada identificou um xisto, uma rocha metamórfica, de cor verde. No segundo ponto verificou que a rocha se tratava de uma ardósia, outra rocha metamórfica, porém de cor vermelha. Chegando no terceiro ponto, notou uma mudança abrupta na cor e litologia das rochas causada por uma falha, pois o xisto de cor verde voltou a aparecer, assim como a ardósia que também se repetiu no quarto ponto. Na sua quinta parada o primeiro aluno observou que os dois tipos de rochas, a ardósia do ponto anterior e o arenito, que agora estava à sua frente, faziam contato em

um ângulo de aproximadamente 30°. Na sexta parada observou que a rocha agora se tratava de um calcário que, assim como o arenito, é uma rocha sedimentar e que estes não se encontravam perturbados pela falha. Por fim, no sétimo ponto, deparou-se com uma rocha ígnea vulcânica de cor escura.

Na sala de aula, você ofereceu uma informação importante, a de que a rocha ígnea se tratava de um dique de diabásio, e que este cruzava todas as litologias percorridas por seus alunos. Ao final desse "mapeamento" seus alunos serão capazes de reconstruir a evolução geológica dessa área e responder: quais foram as primeiras rochas da simulação a se formarem? E as últimas? Por que o xisto e a ardósia se repetiram? Qual a ordem de acontecimento desses eventos?

Monte esse quebra-cabeça com eles por intermédio da resolução dessas questões! Você deverá saber e apresentar aos seus alunos alguns conceitos básicos de estratigrafia, como o princípio da sobreposição de camadas e relações de corte apresentados ao longo do livro, por isso, comece agora a estudá-lo para juntar as peças desse quebra-cabeça e divirta-se!

## **Não pode faltar**

Na unidade anterior, você estudou sobre os três tipos de rochas que existem na Terra, mas talvez não tenha se dado conta de que, para que atualmente elas coexistam em nosso planeta, há um certo intervalo de tempo implícito nessa história geológica. Por exemplo, uma rocha sedimentar jamais poderia ter sido a primeira rocha a ser formada, afinal, sua gênese está relacionada ao processo de alteração intempérica de uma rocha preexistente. O mesmo é válido para as rochas metamórficas que são oriundas da modificação de uma rocha-mãe, o protólito. Portanto, em geologia, o estudo do tempo é fundamental.

Se analisarmos do ponto de vista científico, podemos estimar a idade da Terra de duas formas: absoluta e relativamente. O primeiro, utiliza-se de isótopos (principalmente radioativos) para calcular a

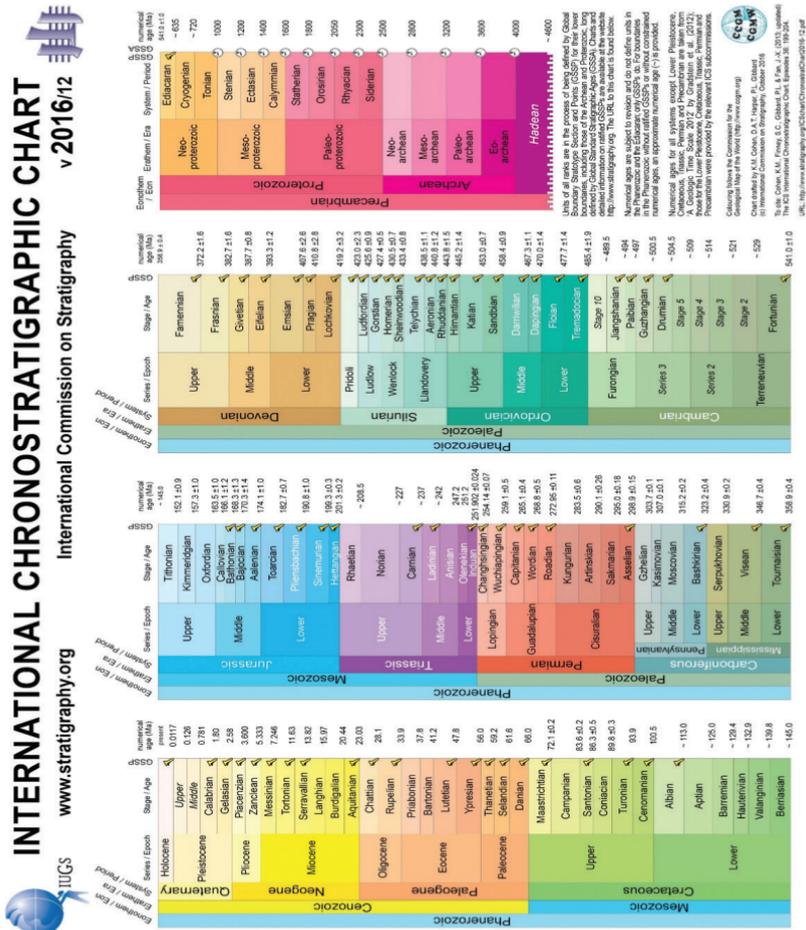
idade das rochas, minerais e até mesmo dos eventos geológicos, como a formação do próprio planeta Terra. O segundo, baseia-se nos dados paleontológicos para estudar determinados eventos de forma relativa, isto é, sem precisar a idade exata em termos numéricos. Entretanto, não devemos assumir que um método é melhor que outro, pois ambos se complementam.

A prova disso é que toda a construção da Tabela do Tempo Geológico (mais recentemente denominada de Tabela Estratigráfica Internacional) é fruto da colaboração entre diferentes áreas, em especial a paleontologia, estratigrafia e geocronologia isotópica. É a partir do advento dessa tabela que nós conseguimos nos “localizar” no tempo e entendermos todas as mudanças que ocorreram no nosso planeta, sem nos perdemos na magnitude do tempo geológico. Afinal, nos perdermos na imensidão do tempo geológico é fácil, de modo que a frase cunhada por James Hutton (1726-1797) – “Não encontramos vestígio algum de um começo, nem perspectiva de um fim” – é absolutamente válida.

Foi Hutton, aliás, quem também consagrou o termo Tempo Profundo (*Deep Time*) e, muito por causa dessa perspectiva difusa, é comum o emprego de analogias para associarmos a vastidão do tempo geológico. Uma analogia empregada como algo mais corriqueiro no nosso dia a dia, é como se fosse uma pista de correr (GUIMARÃES, 2014). Nessa analogia, o autor utiliza-se da comparação do tempo, em bilhões ou milhões de anos, com a distância em metros, desconsiderando as evidências existentes do Éon Hadeano (que na analogia representaria 56 m), deixando a história da Terra com 4 bilhões de anos registráveis em 400 m, de modo que cada metro da pista cobriria 10 milhões de anos! Para se ter uma ideia, o Éon Fanerozoico, quando há o início da intensificação do registro de vida, começaria apenas nos 54,1 m finais da corrida, o que representa somente cerca de 11,86% de toda a história geológica da Terra.

Voltando à Tabela do Tempo Geológico, representada na Figura 3.1, vemos que a divisão em Éons, Eras, Períodos e Épocas, não é um mero detalhe, afinal ela reflete importantes acontecimentos que marcaram, do ponto de vista geológico e biológico, a evolução do nosso planeta.

Figura 3.1 | Tabela do Tempo Geológico, definida pela Comissão Internacional de Estratigrafia



LICCARDO, A.; GUIMARÃES, G. B. (Org.). Geodiversidade na educação. In: GUIMARÃES, G. B. **Tempo geológico**. Ponta Grossa: Estúdio Texto. 136 p., 2014. Disponível em: <<http://files.geocultura.net/200001394-b2d4db3ce0/Geodiversidade%20na%20Educa%C3%A7%C3%A3o%20-%20Livro.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

SOARES, M. B. (Org.). A paleontologia na sala de aula. In: \_\_\_\_\_  
**Os fósseis e o tempo geológico**. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Paleontologia, 2015, 714 p. Disponível em: <<https://drive.google.com/open?id=0B2mK57ObVQY3cWIEZKJicHBQNGc>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

Fazendo um paralelo com a maneira que os fatos históricos são registrados, vemos que ao descrever a história da humanidade, os historiadores apontam guerras, economia, líderes governamentais importantes e grandes invenções que moldaram a sociedade como conhecemos hoje. Para descrever a história do planeta Terra, geólogos se concentram em eventos de geração de cadeias de montanhas, distribuição dos continentes, evolução das formas de vida e alterações climáticas, grandes modificações que ocorreram no passado, ao longo dos 4,6 bilhões de anos, dividido em Éons, Eras, Períodos, Épocas e Andares.

No começo da história de nosso planeta durante o Éon Hadeano, que se estende do nascimento da Terra até o primeiro registro de crosta continental (3,6 Ga), a superfície do planeta se assemelhava a um oceano de magma, enquanto processos de diferenciação aconteciam internamente e a colisão de um protoplaneta originou a Lua. Há 4,4 Ga houve uma queda no calor gerado pela radiação e a superfície começou a esfriar, possibilitando a presença de água na sua fase líquida e a formação de pequenos oceanos. Há 3,85 Ga já existiam regiões continentais e marinhas no planeta, como sugere uma rocha sedimentar marinha encontrada na Groelândia.

Apenas no Éon Arqueano é que rochas crustais continentais tiveram origem, porém ainda não se sabe se já existia atividade tectônica ou não naquela época. Rochas menos densas (félsicas a intermediárias) teriam se originado próximas a vulcões de

"pontos quentes" (*hot spots*) e sucessivas colisões agruparam esses blocos em massas de terra cada vez maiores, dando origem aos protocontinentes, até que no final do Arqueano aproximadamente 80% da crosta continental já havia sido formada, possibilitando o surgimento dos rios. Ainda durante o Arqueano ocorreu, possivelmente, o acontecimento mais importante da história da Terra: o surgimento da vida! O registro fóssil mais antigo de bactérias e algas está em rochas de 3,2 Ga, os estromatólitos. O estromatólito é uma rocha formada pela atividade de cianobactérias que secretam muco, no qual sedimentos em deposição ficam grudados, gerando camadas. No final do Arqueano o oxigênio se acumulava lentamente, os primeiros continentes já existiam e a atividade tectônica teve início, formando os primeiros cinturões de montanhas, nas quais já ocorria erosão.

Durante o Éon Proterozoico, nosso planeta já se parecia um pouco mais com o atual, de grandes continentes e atmosfera rica em oxigênio. Nesse Éon, que compreende quase metade da história da Terra (2,5 Ga a 542 Ma), todas as massas continentais da Terra se aglomeraram, há 1 Ga, para formar o primeiro supercontinente, conhecido como Rodínia. Estudos sugerem que entre 800 Ma e 600 Ma atrás, Rodínia se separou e que as massas que hoje correspondem aos continentes da Índia, Antártica e Austrália colidiram-se formando o supercontinente, denominado Panótia. Foi no Proterozoico que a atmosfera passou a ser rica em oxigênio, permitindo o surgimento das BIFs (do inglês *Banded Iron Formations* – Formações Ferríferas Bandadas), principal fonte do minério de ferro mundial, e a diversificação das formas de vida, agora evoluídas para formas mais complexas, como a Fauna de Ediacara.

Há 542 Ma, o Éon Fanerozoico, do termo grego "faneros" que significa vida visível, tinha início. Dividido pelos geólogos entre as eras Paleozoica, Mesozoica e Cenozoica, enfatiza as mudanças nas formas de vida, mas também retrata as principais mudanças físicas do planeta. No início da Paleozoica o supercontinente Panótia se repartiu, dando origem ao continente Laurentia ao norte, e Gondwana ao sul. Ao mesmo tempo, no início do período Cambriano houve a explosão da vida e no Ordoviciano o registro fóssil, indicando que uma diversificação da vida como jamais vista, que durou aproximadamente 20 milhões de anos, aconteceu

e apesar disso nenhum indício de animais terrestres foi encontrado, afinal a vida era restrita ao ambiente marinho.

Apenas no final do período Devoniano é que os primeiros anfíbios caminharam sobre a Terra. Após um pico na temperatura e elevação do nível do ar, o clima terrestre esfriou consideravelmente e a Terra entrou num período de glaciação. No final da era Paleozoica uma série de colisões continentais resultou na amalgamação do supercontinente Pangeia, o qual existiu por aproximadamente 100 Ma, quebrando-se durante a era Mesozoica, no final do período Jurássico e início do Triássico, formando o Oceano Atlântico Norte e mais tarde o Oceano Atlântico Sul, com a ruptura do Gondwana. No período Triássico, os primeiros dinossauros apareceram, juntamente com os primeiros ancestrais dos mamíferos. O final do período Cretáceo marca também o início da era Cenozoica e a extinção de 90% das plantas oceânicas e 75% das plantas terrestres, além dos dinossauros e diversas outras espécies de animais, como consequência do famoso evento K-T, em que um meteoro de 10 km de largura se chocou com a Terra.

Durante a era Cenozoica o supercontinente Pangeia ainda estava em processo de ruptura, e foi nesse período que a Índia avançou para norte, chocando-se com a Ásia e dando origem à cordilheira de montanhas do Himalaia. Foi também durante o Cenozoico que a temperatura do planeta caiu rapidamente, dando início a uma nova era glacial e causando sucessivos episódios de aumento e regressão do nível do mar. Quando os céus finalmente clarearam após a catástrofe do evento K-T, plantas e animais se recuperaram e diversificaram mais uma vez, como os grupos de mamíferos atuais, seguido pelo surgimento do primeiro ancestral humano conhecido, Homo, há 2.4 Ma.

Para chegarmos ao entendimento dessa história evolutiva da Terra, no entanto, alguns princípios e conceitos estratigráficos tiveram que ser estabelecidos. Um dos princípios mais basilares é o do Uniformitarismo, que admite que as leis da natureza são imutáveis, ou seja, não mudaram através do tempo. Isso implica assumir que todos os fenômenos naturais que vemos hoje em dia já aconteciam também no passado. Essa concepção está também relacionada à postulação dos conceitos estratigráficos, difundidos

inicialmente por Nicolas Steno (1638-1686), que são: 1) princípio da superposição; 2) princípio da horizontalidade original; e 3) princípio da continuidade lateral.

O princípio da superposição das camadas diz que em qualquer sucessão de estratos (rochas) sedimentares que não tenham sofrido qualquer tipo de perturbação tectônica, a rocha mais antiga está localizada abaixo das rochas sucessivamente mais novas, localizadas acima. Já o princípio da horizontalidade original diz que, como a deposição das partículas sedimentares que são transportadas por um fluido acomodam-se pela ação da gravidade, a maior parte das estratificações deve ser horizontal, de modo que os estratos inclinados devem ter sofrido perturbação posterior à sua deposição.

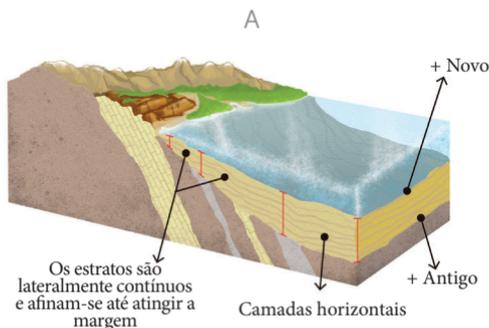


Refleta

Será que todos os sedimentos são depositados horizontalmente e que estratos inclinados somente podem ocorrer devido a alguma ação posterior? Por que será que Hutton pensava somente nos estratos horizontalizados?

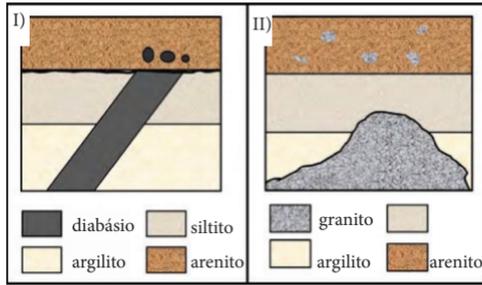
Finalmente, o princípio da continuidade lateral considera que os estratos sedimentares são contínuos e que as camadas se estendem em todas as direções até que sua espessura afine em direção às margens da bacia sedimentar, até atingir a espessura de zero. A Figura 3.2A ilustra os três princípios explicados anteriormente na forma de um bloco diagrama.

Figura 3.2 | Princípios estratigráficos estabelecidos por Steno, em 1669 (A) e outros concebidos por Hutton (B)



Fonte: adaptada de Press et al. (2006, p. 250).

B



Fonte: adaptada de Soares (2015, p. 111).

Adicionam-se a esses três princípios estabelecidos por Steno, mais outros dois concebidos por Hutton: i) Princípio das relações de corte (ou intersecção); e ii) princípio das inclusões. O primeiro diz que uma rocha intrusiva (por exemplo, um dique de diabásio), que corta outra camada de rocha ou uma sequência de camadas, é mais jovem do que a camada cortada. Afinal, para ser cortada, a rocha já deveria existir (Figura 3.2Bi). O segundo conceito estabelece que, uma rocha que contenha fragmentos de outra rocha (por exemplo, um arenito com inclusões de granito) é mais jovem que a rocha que deu origem a esses fragmentos (Figura 3.2 Bii).

Dessa maneira, temos alguns conceitos que ajudam a estabelecer a ordem cronológica relativa, sem dizer em números as idades das rochas. No entanto, foi somente na segunda metade do século XIII que, junto com os conceitos paleontológicos de Georges Cuvier (1769-1832) e William Smith (1769-1839), que serão vistos posteriormente, que a base para a datação relativa baseada em fósseis começou a ser difundida. Portanto, a datação relativa baseia-se tanto nos princípios estratigráficos quanto nos princípios paleontológicos, de forma a juntar um quebra-cabeça completo sobre a história geológica de uma determinada região.



**Assimile**

Segundo o princípio da superposição de camadas, postulado por Steno em 1669, as camadas superiores sempre representarão rochas mais novas que aquelas de camadas mais profundas, desde que elas não tenham sofrido qualquer tipo de perturbação tectônica.

A datação começa a ganhar números mais precisos a partir do momento da descoberta da radioatividade, que ocorreu no século XIX. Logo o século seguinte passaria a experimentar um boom na aplicação da radioatividade, e na geologia isso não foi diferente. Naquela época, os geólogos perceberam que podemos, através de alguns minerais que as rochas hospedam, datar eventos geológicos de maneira consideravelmente precisa. Isso é possível através da utilização de isótopos instáveis (radioativos – U (urânio), Th (tório) e Pb (chumbo), por exemplo) presentes em cristais com concentrações elevadas desses elementos químicos. Um dos minerais mais utilizados é o zircão, que é altamente resistente a altas temperaturas e possui U em quantidade suficiente para utilizarmos no processo de datação.

De maneira simplificada, utilizamos o fenômeno do decaimento radioativo para o cálculo da idade das rochas (e eventos geológicos que elas representam). O elemento químico que possui um núcleo atômico instável (elemento-pai) decairá, após determinado tempo, num novo elemento de (1669) núcleo atômico estável (elemento-filho), através de três processos: a) emissão de partícula (s) alfa; b) emissão de partícula (s) beta; e c) captura de elétron.



### Exemplificando

Exemplificando, o elemento  $^{87}\text{Rb}$  (Rubídio) decai para  $^{87}\text{Sr}$  (Estrôncio, número atômico 37) através da emissão de uma partícula beta.

Para nos referirmos ao tempo em que essa desintegração acontece, utilizamos o conceito de meia-vida, que pode ser entendido como o tempo necessário para que metade da quantidade original de átomos instáveis presentes no elemento-pai se transforme em átomos estáveis do elemento-filho. Em geologia, utilizamos alguns isótopos específicos, como pode ser observado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 | Lista dos isótopos mais utilizados para datação de eventos geológicos e suas respectivas meias-vidas

Elemento-Pai (Radioativo)	Elemento-Filho (Estável)	Meia-Vida (bilhões de anos)
Potássio 40 ( $^{40}\text{K}$ )	Argônio 40 ( $^{40}\text{Ar}$ )	1,3
Rubídio 87 ( $^{87}\text{Rb}$ )	Estrôncio 87 ( $^{87}\text{Sr}$ )	48,3
Samária 147 ( $^{147}\text{Sm}$ )	Neodímia 143 ( $^{143}\text{Nd}$ )	106
Tório 232 ( $^{232}\text{Th}$ )	Chumbo 208 ( $^{208}\text{Pb}$ )	14,01
Urânio 235 ( $^{235}\text{U}$ )	Chumbo 207 ( $^{207}\text{Pb}$ )	0,704
Urânio 238 ( $^{238}\text{U}$ )	Chumbo 206 ( $^{206}\text{Pb}$ )	4,47
Rênio 187 ( $^{187}\text{Re}$ )	Ósmio 187 ( $^{187}\text{Os}$ )	42,3

Fonte: Teixeira et al. (2003, p. 322).

Esses elementos não formam minerais, mas sim, ocorrem como “impurezas” dentro de minerais formadores de rochas. Por isso, quando nos referimos à idade da rocha, na verdade, estamos determinando a época em que o elemento ficou “preso” no mineral (ou seja, quando o sistema fechou). Isso acontece a uma determinada temperatura (temperatura de bloqueio), que é variável para cada mineral.

Com essa informação em mãos, aplicamos a seguinte fórmula, conhecida como equação fundamental da geocronologia:

$$N = N_0 e^{\lambda \cdot t}$$

$$t = \left(\frac{1}{\lambda}\right) \ln \left(\frac{N_0}{N}\right) \text{ se } N_0 = N + F, \text{ então:}$$

$$t = \left(\frac{1}{\lambda}\right) \ln \left(1 + \frac{F}{N}\right)$$

onde:

$N$  = número de átomos do isótopo radioativo (elemento-pai) medido na amostra hoje

$N_0$  = número inicial de átomos do isótopo radioativo no momento do fechamento do sistema

$F$  = número de átomos do isótopo radiogênico (elemento-filho) medido na amostra hoje

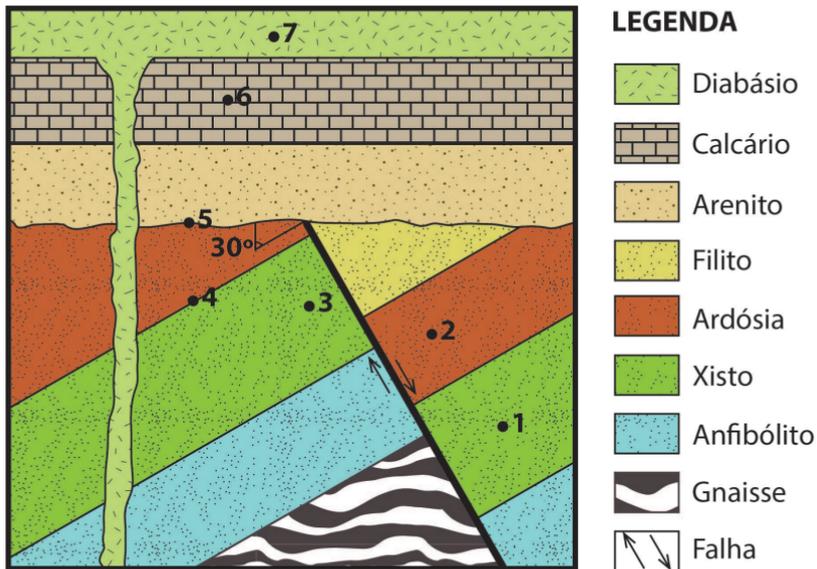
$t$  = tempo decorrido desde o fechamento do sistema isotópico (idade do sistema)

$\lambda$  = constante de desintegração do elemento-pai

## Sem medo de errar

Vamos relembrar o contexto apresentado no início desta seção, em que você realizou uma atividade com seus alunos para simular uma situação vivida por um geólogo durante um mapeamento de campo, levando-os em uma jornada na quadra da escola onde um mapa geológico havia sido desenhado. Se você reler a descrição do mapa no “Diálogo aberto”, verá que ele se assemelha à Figura 3.3:

Figura 3.3 | Mapa geológico da quadra de esportes



Fonte: elaborada pelo autor.

Agora responderemos: quais foram as primeiras rochas a se formarem? E as últimas? Por que o xisto e a ardósia se repetiram? Qual a ordem de acontecimento desses eventos?

Seguindo o princípio de superposição de camadas, e considerando que aquilo que você viu ao longo do trajeto representasse, de 1 ao 7, a camada mais inferior para a camada mais superior (Figura 3.3), as rochas metamórficas, xisto e ardósia seriam as mais antigas. Mas além disso, que outro fator colabora

com essa afirmação? Como você viu no início da seção, as rochas metamórficas são formadas pela alteração de um protólito, sendo assim, se o evento que causou o metamorfismo e deu origem ao xisto e à ardósia fosse posterior à origem do arenito e do calcário (rochas sedimentares), estas também se encontrariam metamorfozadas.

O contato abrupto notado por seus alunos entre os pontos 2 e 3 e que se refere a uma falha (Figura 3.3) é posterior ao metamorfismo, como sugere a repetição das camadas metamorfozadas de xisto e ardósia, mas anterior à deposição das rochas sedimentares, pois estas não se encontram perturbadas pela falha. Segundo o princípio de relação corte, que postula que uma rocha intrusiva (por exemplo, um dique de diabásio) que corta outra camada de rocha ou uma sequência de camadas, é mais jovem do que a camada cortada, afinal, para ser cortada a rocha já deveria existir, chega-se à conclusão de que o dique de diabásio foi a última rocha a se formar.

Agora que você já sabe que o xisto e a ardósia são as rochas mais antigas, que o diabásio é a mais nova e que o arenito e o calcário vieram depois do xisto, mas antes que o dique, fica mais fácil montar o quebra-cabeça e reconstruir a história de evolução dessa área. Sendo assim, pode-se dizer que o xisto e a ardósia foram metamorfozados (provavelmente a partir de um protólito sedimentar) e mais tarde retrabalhados, causando a inclinação de suas camadas em 30 graus e a formação da falha, possivelmente normal, causando a repetição da camada mais inferior, xisto, e depois da ardósia. Depois disso, ocorreu a formação do arenito e do calcário e, por fim, a atividade vulcânica na região teve início e um dique de diabásio irrompeu cortando a sequência de rochas.

## Avançando na prática

### Corrida geológica

#### Descrição da situação-problema

Imagine-se na seguinte situação: você está dando aula numa escola de ensino médio para turmas que estão se preparando para

o vestibular. Após uma rápida busca pela internet, você percebeu que, nos últimos dias, tem surgido várias notícias sobre geologia e paleontologia, inclusive com descobertas importantes para a ciência.

Visto isso, você já ficou antenado na possibilidade de assuntos sobre essas áreas caírem no vestibular. Visando cobrir os assuntos mais relevantes, você decidiu abordar um pouco sobre o tempo profundo, o tempo geológico. Por isso, você decidiu elaborar uma atividade fora da sala de aula, na pista de atletismo do colégio, seguindo uma orientação próxima à mostrada no exemplo de Guimarães (2014).

Uma ideia que veio à sua cabeça foi a de separar os grupos de acordo com os principais Éons e eras (e quando pertinente, os períodos), pedindo para que eles caminhassem ao longo da pista e, à medida que avançassem, os alunos teriam que mencionar o tempo que estavam passando e algum fato importante que ocorreu naquela época. Isso seria feito até o último grupo chegar nos períodos geológicos atuais. No entanto, durante a preparação dessa atividade você teve algumas dúvidas: quais são as divisões do tempo geológico? Que tipo de eventos preciso selecionar para que os alunos estudem? Como poderia dividir o Éon Fanerozoico?

### **Resolução da situação-problema**

Como você aprendeu ao longo desta seção, o tempo geológico é dividido em quatro unidades principais, são elas: Hadeano, Arqueano, Proterozoico e o Fanerozoico. Esses Éons abrangem grandes intervalos de tempo e são divididos de acordo com mudanças geológicas e paleontológicas ocorridas na Terra. Dentro de cada uma delas, podem ocorrer subdivisões, como é o caso do Fanerozoico. O detalhamento dos eventos ocorridos dentro de cada era paleozoica, levou os cientistas a dividirem essas unidades em períodos, os quais refletem mudanças climáticas, biológicas e geológicas bastante expressivas. O refinamento dos dados pode levar a uma divisão em épocas e andares, caso haja alguma descoberta científica válida relativa àquela idade.

Além disso, a seleção de tópicos a serem abordados pelos alunos envolve eventos de geração de cadeias de montanhas, distribuição dos continentes, evolução das formas de vida e alterações climáticas, grandes modificações que ocorreram no passado, ao longo dos 4,6

bilhões de anos, afinal são esses tipos de alterações que ficam, de certa forma, registrados nas rochas e minerais.

Por último, como vimos anteriormente, o Éon Fanerozoico é dividido em Paleozoico, Mesozoico e Cenozoico, cada qual com subdivisões de períodos importantes na história evolutiva da Terra.

### Faça valer a pena

**1.** Sabe-se que os princípios da superposição, horizontalidade original e continuidade lateral difundidos por Nicolas Steno são fundamentais para a disposição do empilhamento vertical das rochas, e assim estabelecer um contexto estratigráfico detalhado.

Assim, é correto afirmar que o princípio da superposição de Steno infere que:

- a) Em uma sucessão de estratos sedimentares, que tenham sofrido qualquer tipo de perturbação tectônica, a rocha mais antiga está localizada na base do empilhamento.
- b) Em uma sucessão de estratos sedimentares, que não tenham sofrido qualquer tipo de perturbação tectônica, a rocha mais antiga está localizada na base do empilhamento.
- c) A deposição das partículas sedimentares, que são transportados por um fluido, acomodam-se pela ação da gravidade.
- d) A deposição das partículas sedimentares, que são transportados por um fluido, acomodam-se pela ação dos ventos.
- e) A deposição das partículas sedimentares, que são transportados por um fluido, acomodam-se pela ação do resfriamento.

**2.** A concepção de tempo profundo em nosso planeta é um conceito de grande debate e interesse dos cientistas desde a Idade Média. Um dos mais conhecidos geólogos, o famoso James Hutton (foto a seguir), foi um dos primeiros a difundir teorias a respeito do tempo e seus registros.



Fonte: <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/68/James\\_hutton\\_field.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/68/James_hutton_field.jpg)>. Acesso em: 16 jan. 2017.

Sobre o Uniformitarismo, publicado por Hutton em 1795, é correto afirmar que refere-se à:

- a) Noção que as leis artificiais atuais se repetiam no passado.
- b) Noção que as leis naturais pretéritas se repetem no passado.
- c) Noção que as leis artificiais pretéritas se repetem no passado.
- d) Noção que as leis naturais atuais se repetiam no passado.
- e) Noção que as leis naturais do passado se repetem no presente

**3.** Em meados de 1956, o geoquímico americano Clair Cameron Patterson do Instituto Tecnológico da Califórnia, a partir da análise dos valores dos elementos urânio-chumbo (U-Pb) de meteoritos concluiu que o planeta Terra tinha aproximadamente 4,55 bilhões de anos. Essa conclusão foi um marco no método de datação absoluta.

Sabendo-se que o método de datação absoluta baseia-se no decaimento radioativo, é correto afirmar que a meia-vida do:

- a) Potássio 40 ( $^{40}\text{K}$ ) é de 48,8 bilhões de anos.
- b) Potássio 40 ( $^{40}\text{K}$ ) é de 40,8 bilhões de anos.
- c) Tório 232 ( $^{232}\text{Th}$ ) é de 14,01 bilhões de anos.
- d) Tório 232 ( $^{232}\text{Th}$ ) é de 14,7 bilhões de anos.
- e) Tório 232 ( $^{232}\text{Th}$ ) é de 24,01 bilhões de anos.

## Seção 3.2

### Paleontologia

#### Diálogo aberto

Caro aluno, nesta unidade passaremos a estudar os principais assuntos que norteiam os fundamentos de paleontologia, ou seja, aprenderemos mais sobre os fósseis e sua importância na compreensão dos princípios básicos da geologia e paleontologia fundamentados em uma visão sistêmica e evolutiva. Você saberá o que são fósseis, quais seus tipos e como eles se formam e ficam preservados. Também aprenderá como eles são utilizados para auxiliar na compreensão da evolução da vida e do tempo geológico e de que forma são utilizados para delimitar ambientes geológicos pretéritos, contribuindo na reconstrução paleobiogeográfica e paleoecológica.

Para fortalecer esses conceitos imagine-se agora você como professor da disciplina de paleontologia de uma conceituada universidade do seu estado, referência em pesquisa na área do Cenozoico. Recentemente na Ilha de Marajó, estado do Pará, uma assembleia de fósseis da fauna Neógena Tropical Sul-Americana, da Formação Pirabás, foi encontrada, o que acabou por interromper a construção de um Eco Resort no local. Como um estudioso da área de paleontologia, você foi chamado pelos líderes da ilha para avaliar e ensinar à comunidade local a importância dessa descoberta.

Durante esse dia de conversas e palestras na ilha, muitas dúvidas surgiram entre os membros da comunidade, como: o que é um fóssil? Por que essas descobertas são consideradas fósseis? Qual a principal diferença entre fóssil e animais vivos? Todo animal morto pode ser considerado um fóssil? Por que é tão importante preservá-los?

Como professor e estudioso na área, você deve responder às perguntas da comunidade. Como você as responderia? Para isso, leia o "Não pode faltar" e encontre as respostas, boa leitura!

## Não pode faltar

Durante a seção anterior você estudou a história geológica da Terra, adquiriu percepção de tempo geológico e foi apresentado a alguns métodos de datação. Para complementar, nesta seção, estudaremos a paleontologia.

Como você já deve saber, a paleontologia é a ciência que estuda os fósseis, registros da vida antiga, e como tal é necessário que o paleontólogo siga uma determinada metodologia. É sua função descrever e classificar os fósseis, além disso, deverá entender a evolução e a interação dos seres pré-históricos com seus antigos ambientes, a distribuição e a possibilidade de datação das rochas portadoras de fósseis. A paleontologia é uma ciência interdisciplinar que utiliza conceitos de várias áreas para entender e construir o passado, como a geografia (paleogeografia), a climatologia (paleoclimatologia), a ecologia (paleoecologia), entre outras. Mas, a utilidade da paleontologia não para por aí. Grandes construtoras e empresas petrolíferas possuem profissionais dessa área, ou seja, não é importante somente para a ciência, mas para o desenvolvimento planejado e sustentável da nossa sociedade.

Antes de começarmos a estudar mais sobre os fósseis, é importante conhecer o que é um fóssil e quais os seus tipos. A palavra fóssil tem origem no latim e significa "ser desenterrado" ou "extraído da Terra". Logo, os fósseis são restos ou vestígios (traços) de animais, vegetais e de outros micro-organismos (como algas, fungos, bactérias etc.) que viveram em um passado remoto e que hoje se encontram preservados nas rochas sedimentares. Há um consenso que para ser considerado fóssil, ele deve ter vivido há mais de 11 mil anos, isso significa, antes do Holoceno, que é a época geológica atual. Evidências que tenham menos de 11 mil anos são consideradas subfósseis.

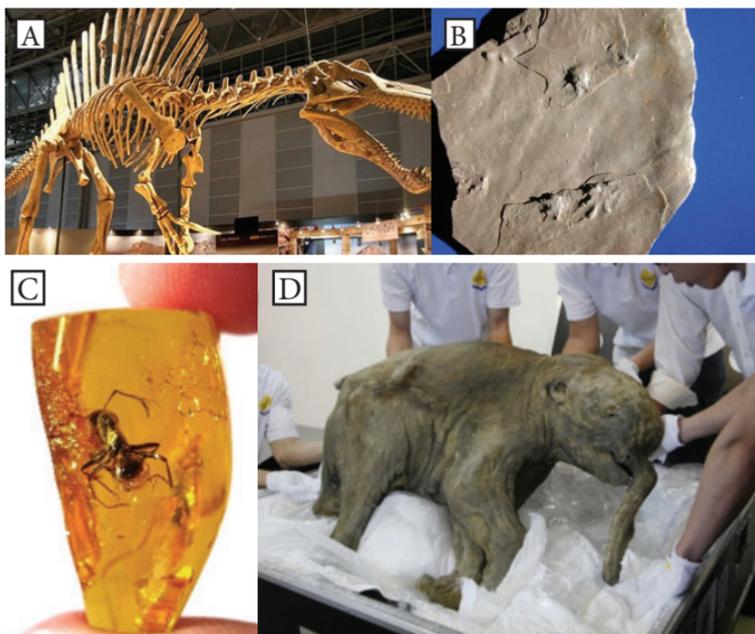
De forma abrangente, os fósseis (Figura 3.4A-F) são divididos em dois grupos: a) fósseis corpóreos e b) fósseis-traço (vestígios). Os fósseis corpóreos (restos) são representados por restos orgânicos provenientes, principalmente, das partes "duras" dos seres vivos. Por exemplo, carapaças de moluscos (conchas), ossos e dentes, se estivermos tratando dos animais ou, no caso de partes vegetais, os

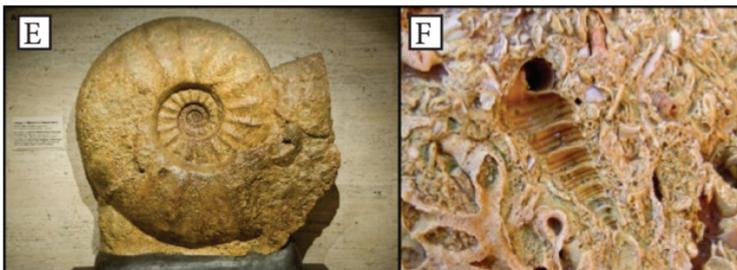
troncos, folhas etc. Além disso, é comum que essas partes duras deixem impressões, moldes e contramoldes nas rochas, enquanto que os próprios restos (a parte mole, como as vísceras por exemplo) não ficam preservados. Os fósseis-traço, por sua vez, são mais conhecidos como icnofósseis, pois compreendem o registro das atividades que os organismos desenvolveram enquanto vivos, e que agora encontra-se gravado em um substrato. São incluídos como vestígios os ovos e ninhos fossilizados, pegadas, pistas (sequência de pegadas), perfurações, escavações e também os coprólitos, isto é, fezes fossilizadas dos animais. Além disso, já foram documentados casos em que tanto as partes duras quanto as moles ficaram preservadas, como são os casos de mamutes lanudos (fossilizados no gelo) e insetos (âmbar).



### Exemplificando

Figura 3.4 | (A): Exemplo de fóssil do tipo corpóreo; (B): Exemplo de icnofóssil; (C): Exemplo de um fóssil preservado em âmbar; (D): Exemplo de fóssil preservado no gelo (criólise); Exemplos de fóssil (E) contramolde e (F) molde externo





Fontes: (A): <<https://imgnzn-a.akamaized.net/2014/09/12/12102900197120-t480x280.jpg>>; (B): <<http://www.fossilmuseum.net/chnofossils/pf51/PFO101A.jpg>>; (C): <<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b6/Amber2.jpg>>; (D): <<http://meioambiente.culturamix.com/blog/wp-content/uploads/2013/06/Recriao-Mamute-do-Gelo-2.jpg>>; (E): <[https://c1.staticflickr.com/3/2245/2142233928\\_912c0633c0\\_b.jpg](https://c1.staticflickr.com/3/2245/2142233928_912c0633c0_b.jpg)>; (F): <<http://webpages.fc.ul.pt/~cmsilva/Paleotemas/Moldagem/Moldagem.htm>>. Acesso em: 26 jan. 2017.

Para que possamos estudá-los é necessário que esses registros fiquem preservados na forma de fósseis, caso contrário, não seria possível. Isso ocorre através da fossilização, que é um conjunto de processos de ordem física, química e biológica que evitam a decomposição natural do ser que morre. Para que isso ocorra é necessário algumas condições, dentre elas: i) rápido soterramento – evitando que o intemperismo aja diretamente sobre o ser morto; ii) ausência de atividade bacteriana – afinal, as bactérias auxiliam na decomposição dos tecidos e matéria orgânica em geral; e iii) modo de vida do animal e composição química de seu esqueleto – animais que já vivem em ambientes com condições propícias (pântanos, mangues) ou que possuem esqueletos de composição química estável, terão maior chance de preservação.

Os processos de fossilização são complexos e dependem de alguns fatores que ocorrem imediatamente após a morte do indivíduo ou ao longo do tempo geológico. Os fósseis também sofrem as mesmas interferências físico-químicas das rochas sedimentares e, portanto, sofrem diagênese, transformando-se em materiais consolidados dentro das rochas. Por esse motivo, assim como as rochas sedimentares, sua composição química pode ser modificada.

Como apontado anteriormente, para que esses processos de fossilização ocorram e os fósseis fiquem preservados no registro geológico, é preciso alguns fatores (soterramento, ausência de

atividade bacteriana etc.). Essas condições são normalmente restritas a determinados ambientes de sedimentação em que a quantidade de aporte sedimentar, ou seja, o volume de sedimento depositado, é alta e a taxa de oxigenação é suficientemente baixa para que pouca (ou nenhuma) bactéria encontre condições propícias para seu desenvolvimento. Como a luz solar estimula a propagação da atividade bacteriana, os ambientes de sedimentação ideais para a preservação fossilífera são lagos, lagoas, mares, mangues, pântanos, entre outros, com sedimentos finos em suspensão e relativamente profundos, de modo que haja pouco no fundo do corpo aquoso.

Existe uma extensa gama de processos de fossilização e estudá-los a fundo seria impossível. Aqui destacaremos alguns dos tipos principais que ocorrem nos grupos de fósseis apresentados anteriormente. Como os restos são, normalmente, partes duras dos organismos, possuem um alto potencial de preservação, visto que são compostos por sílica (espículas de esponja), carbonato de cálcio (conchas de moluscos marinhos) e quitina (exoesqueletos de alguns artrópodes), e em alguns casos até celulose. Sua preservação de forma ocorre quando são preservadas as partes duras e moles dos organismos sob condições excepcionais, como no caso do âmbar e criopreservação (gelo). O âmbar nada mais é do que uma resina viscosa secretada por algumas gimnospermas e ao secar endurece e aprisiona o organismo, deixando-o completamente preservado. Já o gelo, por se formar a baixas temperaturas, evita que ocorra a decomposição das partes moles dos organismos e acaba preservando muito bem alguns seres vivos.



### Refleta

As rochas arenosas (arenito, por exemplo) são depositadas normalmente em ambientes oxigenados, com constante ação de correntes aquosas ou subaéreas. Você esperaria encontrar um fóssil, que necessita de baixa oxigenação, nessas condições? Por quê?

Nos casos de fósseis preservados em âmbar e gelo, apresentados acima, não há alteração na composição química dos seres fossilizados, no entanto, isso nem sempre acontece. Aliás, normalmente, os fósseis acabam sendo alterados devido a

novas condições físico-químicas a que estão submetidos quando soterrados. Neste caso, os minerais originais, que constituíram o organismo, são transformados em outros em processos de carbonificação, recristalização, substituição, incrustação, permineralização e concreção. A carbonificação (incarbonização) ocorre quando o carbono presente nos organismos fica preservado enquanto os outros minerais foram perdidos. Esse processo é mais comum em restos vegetais depositados em condições de baixa concentração de  $O_2$ , como nos fundos de lagos. A recristalização ocorre quando minerais instáveis são modificados em outras formas minerais mais estáveis às atuais condições geológicas. Esse rearranjo mineralógico é comum em conchas e exoesqueleto de alguns organismos e chega a destruir algumas feições associadas à morfologia dos restos. No entanto, não há modificação química (composicional), somente alteração da estrutura mineralógica, como a transformação da aragonita para calcita.

A modificação química implicará ocorrência de outro processo de fossilização, denominado de substituição. Nesse processo, o mineral original dos restos é substituído por outro, pois este encontra-se abundante no meio geológico atual. Cada processo de substituição pode envolver diferentes minerais e, por isso, há nomes específicos para determinadas situações: a) silicificação, quando ocorre substituição dos minerais originais por sílica; b) piritização, quando os minerais originais (geralmente  $CaCO_3$ ) são substituídos por pirita; c) limonitização, quando envolve a substituição por limonita, um óxido de ferro hidratado; e d) carbonatação, que compreende a substituição por carbonatos. Nesses processos, apesar da alteração mineralógica, a forma (morfologia) dos fósseis permanece inalterada.

Em alguns ambientes geológicos específicos, os restos acabam sofrendo um processo de incrustação, ou seja, em vez de ocorrer a substituição ou recristalização do mineral que forma o indivíduo, uma fina camada de mineral é precipitada sobre a carapaça, protegendo-o. Isso ocorre, por exemplo, em cavernas onde a água é saturada em relação a determinados minerais. Um outro processo é a permineralização, que acontece quando os sedimentos que se encontram ao redor do fóssil são transportados para cavidades ou pequenas fraturas que ocorrem nos fósseis. A concreção é outro

processo que ocorre nos restos fossilizados, e está ligado à geração de um envoltório mineralizado originado pela decomposição do fóssil que, ao liberar alguns compostos, desencadeia algumas reações químicas que, porventura, precipitam alguns minerais.

Por último, existe um tipo de fossilização em que os restos de organismos foram totalmente destruídos e, o único registro preservado é o seu molde. Por exemplo, caso um organismo seja preenchido por sedimentos nas cavidades internas e seu exoesqueleto dissolvido posteriormente, teremos um molde. Quando o esqueleto desse organismo é dissolvido, ele pode ser preenchido por sedimentos ou minerais secundários, diferentes de sua composição inicial, formando uma estrutura idêntica à original. Dessa maneira teremos um contramolde.

Adicionalmente aos princípios da estratigrafia, que você viu na seção anterior, dois novos princípios paleontológicos vieram contribuir para o entendimento da evolução das espécies. O primeiro, concebido por Georges Cuvier (1769-1832), estabelece que cada camada de rocha abriga um conjunto de fósseis diferente das camadas subjacentes e sobrejacentes e que, geralmente, os fósseis das camadas inferiores apresentavam propriedades mais primitivas se comparados com os fósseis das camadas superiores. O segundo, idealizado por William Smith (1769-1839), determina que as mesmas sucessões de rochas sedimentares afloram em distintas regiões e que cada camada apresentava fósseis específicos. Smith também notou que os fósseis mais antigos se posicionavam nos estratos inferiores e os mais novos, sucessivamente acima, a partir disso, ficou estabelecido o princípio da "Sucessão Faunística".

Complementarmente às observações de Smith surgiu o princípio da Correlação Fóssil, que estabelece que camadas de rochas encontradas em áreas geográficas distantes uma das outras podem ser correlacionadas de acordo com os fósseis que hospedam. Para que isso seja feito, é necessário analisar fósseis que possuam características singulares, que sejam característicos de uma unidade estratigráfica, tanto em idade quanto em ambiente deposicional, em que é possível mapear sua extensão lateral. Além disso, é preciso que a distribuição geográfica apresente curta amplitude vertical (ter surgido e se extinto rapidamente), tenha

rápida taxa de dispersão, e seja facilmente identificável e abundante. Chamamos esses fósseis de fósseis-guia ou fósseis-índice.



Quadro 3.1 | Listagem de alguns fósseis-guia (fósseis-índice) de cada período das eras Paleozoica e Mesozoica

ERA GEOLÓGICA	PERÍODO GEOLÓGICO	FÓSSIL-GUIA
Mesozoico	Cretáceo	Moluscos bivalves ( <i>Inoceramus sp.</i> )
	Jurássico	Amonites ( <i>Perisphinctes sp.</i> )
	Triássico	Cefalópode ( <i>Trochitesubbullatus</i> )
Paleozoico	Permiano	Foraminíferos fusulinídeos ( <i>Parafusulinabosei</i> )
	Carbonífero	Corais ( <i>Lophophyllidiumproliferum</i> )
	Devoniano	Braquiópodes ( <i>Mucrospirifer mucronatus</i> )
	Siluriano	Nautilóides ( <i>Hexamoceras hertzeri</i> )
	Ordoviciano	Graptólitos ( <i>Pendeograptus fruticosus</i> )
	Cambriano	Trilobita ( <i>Paradoxides sp.</i> )

Fonte: elaborado pelo autor.

A história da vida na Terra começa no Arqueano, com os primeiros vestígios de atividade biológica, marcado pelas bactérias filamentosas de Apex Chert e pelos estromatólitos há cerca de 3,5 bilhões de anos. Os estromatólitos são rochas produzidas por, majoritariamente, cianobactérias fotossintetizantes, as quais formam pequenas lâminas microbianas capazes de aprisionar sedimentos finos e, com o tempo, formar uma estrutura rochosa estratificada. É no Proterozoico, com o aumento da atmosfera, que a vida começa a se diversificar e proliferar, com o aparecimento dos primeiros seres multicelulares (metazoários da Fauna de Ediacara) e também com o surgimento do esqueleto (conchas). No Paleozoico, começa a explosão da vida – no Cambriano (Paleozoico Inferior) – com o estabelecimento dos principais

filos de invertebrados, metazoários com exoesqueleto (trilobitas, braquiópodes, equinodermos e moluscos) e algas calcárias. O Ordoviciano marca o período de incremento na biodiversidade e complexidade da cadeia alimentar, na qual surgem os primeiros corais e primeiros vertebrados (peixes agnatos, sem mandíbula – ostracodermes). No final do Ordoviciano uma das cinco maiores extinções em massa dizimam grande parte da fauna e flora marinha. Após ela, inicia-se o Siluriano, momento em que devido às novas condições vigentes no ambiente marinho, temos o aparecimento dos peixes ósseos e cartilagosos. Nesse período também temos a conquista do ambiente terrestre com a presença das primeiras plantas (avasculares), e animais terrestres começam a invadir o continente. Logo após o Siluriano, temos o período Devoniano, que se destaca pelo aumento novamente da biodiversidade, bem como os intercâmbios faunísticos entre os mares quentes de todo o planeta. Neste também temos um grande momento evolucionar com o aparecimento dos primeiros tetrápodes (anfíbios) e das plantas vasculares. Ao fim do Devoniano, novamente uma grande extinção em massa dizima a fauna do Paleozoico Médio. Em seguida a essa extinção, inicia-se o Carbonífero, o qual é marcado pela grande concentração de oxigênio dissolvido na atmosfera e a presença de grandes florestas (que futuramente formariam extensos depósitos de carvão), bem como a presença de insetos gigantes (Meganeura), dos primeiros répteis e das gimnospermas.

O Permiano (Paleozoico Superior) começa a se moldar quando as grandes porções continentais começam a se unir e formar a Pangeia, causando uma continentalização generalizada e estabelecimento de cenários áridos. Nas regiões temperadas, no entanto, desenvolve-se a "Flora de Glossopteris", que marca o período. Os amniotas diversificam-se, dividindo-se em duas linhagens: Diapsida, que inclui os répteis e as aves, e a Synapsida, que inclui grupos extintos como pelicossauros, dicinodontes, cinodontes, e que hoje é representada apenas pelos mamíferos. Ao final do período, ocorre a maior extinção, que dizima 90% das espécies marinhas e muitas espécies terrestres.

Após a grande extinção permiana, o continente e o mar foram recolonizados e, devido à excelente continuidade das massas

continentais durante a existência da Pangeia, a fauna terrestre se tornou bastante cosmopolita. O período marca o aparecimento dos primeiros dinossauros, pterossauros e os mamíferos. O Jurássico marca o período em que os répteis dominaram o globo e os dinossauros eram os predadores majoritários. Os ares agora eram comandados pelos pterossauros, embora as aves também tenham começado a surgir na metade do período, que também viu o início da fragmentação da Pangeia. No Cretáceo, África e América do Sul começam a se separar, formando o Oceano Atlântico. É neste período também que as angiospermas (primeiras plantas com flor) começam a surgir, o que favoreceu o desenvolvimento de insetos e aves polinizadoras. Os mamíferos, agora mais diversificados, começam sua expansão.

Após o evento K-T, que ocasionou a dizimação dos dinossauros, os mamíferos passaram a dominar a Terra, aumentando, inclusive, seu porte. As aves também cresceram e se irradiaram no Paleógeno. No Neógeno houve o estabelecimento de uma intensa ligação entre os continentes, possibilitando um intercâmbio de flora e fauna. Com a expansão das gramíneas e desenvolvimento das savanas, os mamíferos pastadores passaram a dominar as paisagens. Ao final, extensas geleiras começam a constituir os polos e também se deslocam para as latitudes mais baixas, dando início a última "Era do Gelo", característica do período Pleistoceno. A megafauna de mamíferos do período (preguiças gigantes, mamutes, mastodontes e tigres-dentes-de-sabre) domina as paisagens. A chegada de populações de *Homo sapiens*, que estavam em ascensão, coincide com o desaparecimento da megafauna e as evidências de domínio do homem começam a marcar o registro geológico e caracterizar o Holoceno, o período atual.

O entendimento da evolução dos animais e vegetais nos auxilia, portanto, no estabelecimento de uma ordem cronológica para a ocorrência dos eventos gravados no registro geológico. Logo, todo o contexto evolutivo, calibrado em termos de idade, pode definir praticamente qualquer dúvida sobre as mudanças climáticas do passado, os ambientes de deposição das rochas, o surgimento de doenças e eventos de extinção, entre outras possibilidades.



Para aprender um pouco mais sobre a Paleontologia, veja o vídeo produzido pelo Prof. Rafael Casati, que explica de forma muito didática alguns conceitos abordados aqui no livro didático e que merecem ser reforçados.

CASATI, R. **Paleontologia Geral**. Disponível em: <[https://youtu.be/P76\\_dPex1eY](https://youtu.be/P76_dPex1eY)>. Acesso em: 18 jan. 2017.

## Sem medo de errar

Retomando o contexto da situação anterior, você como estudioso na área de paleontologia foi chamado para explicar à comunidade da Ilha de Marajó no estado do Pará sobre a importância de uma nova descoberta paleontológica na ilha: a assembleia de fósseis da fauna Neógena Tropical Sul-Americana. Durante essa palestra, a comunidade começou a participar com diversas perguntas, que você deve responder: o que é um fóssil? Por que essas descobertas são consideradas fósseis? Qual a principal diferença entre fóssil e animais vivos? Todo animal morto pode ser considerado um fóssil? Por que é tão importante preservá-los?

Para esclarecer as dúvidas dos moradores você pode explicar que fósseis são restos ou vestígios de animais, vegetais e de outros micro-organismos (como algas, fungos e bactérias) que viveram em um passado remoto e que hoje se encontram preservados nas rochas sedimentares. Pode adicionar à sua resposta, que para ser considerado fóssil eles devem ter vivido há mais de 11 mil anos, e quaisquer evidências preservadas em rochas ou em sedimentos que tenham menos de 11 mil anos são consideradas subfósseis. Sendo assim, animais mortos recentemente não podem ser considerados como tais.

Ao final da sua palestra lembre-se de ressaltar a importância da preservação desse tipo de registro, pois são os fósseis que possibilitam compreender parte dos fenômenos geológicos que ocorreram no

planeta ao longo de milhares de anos, retrabalhando e moldando a superfície do planeta. Relembre sua plateia que os fósseis guardam informações preciosas de como a vida se originou e dos processos evolutivos sofridos pelas diversas formas de vida que conhecemos atualmente.

## Avançando na prática

### Evolução da vida

#### Descrição da situação-problema

O coordenador do museu de paleontologia da Ilha de Marajó, que ao saber que você estava dando uma palestra sobre a nova descoberta na ilha, decidiu convidá-lo para elaborar um material didático explicativo sobre o tempo geológico e a evolução da vida, o qual seria exposto no Museu Evolução Geológica da Vida, localizado no centro da comunidade. Além disso, o coordenador solicitou que você se deslocasse até o local para inaugurar a exposição, que seria feita para um pequeno público de estudantes da área de meio ambiente da universidade, os quais estavam iniciando a vida universitária.

Durante a explicação, que estava sendo conduzida de maneira informal, os alunos começaram a perguntar sobre alguns aspectos pertinentes, afinal eles estavam bastante interessados no tema, que é pouco abordado no ensino médio. Um dos estudantes lhe perguntou: como foi estabelecida a base para interpretação do registro fóssil para entender a evolução da vida? Mais tarde, outro aluno o questiona: como é feita a correlação fóssil entre as camadas, se elas ocorrem em localidades tão distantes? E, para finalizar, outro estudante pergunta: qual o fóssil-guia mais utilizado para interpretar o início do Paleozoico, o Cambriano?

#### Resolução da situação-problema

Para responder aos questionamentos desses alunos, e deixá-los ainda mais interessados pelo assunto, você poderia respondê-los da seguinte maneira: 1ª) com relação à primeira pergunta, você deve destacar que existe um princípio básico que rege toda a interpretação

da evolução da vida considerando o registro fóssilífero. Esse conceito fundamentou-se nos trabalhos de Cuvier e Smith, denominados de Princípio da Sucessão Faunística. Segundo esses autores, cada camada de rocha abrigava fósseis específicos que estavam distribuídos conforme uma ordem temporal sucessiva, ou seja, os fósseis mais primitivos (os mais antigos) estão nas camadas inferiores e os mais jovens, mais evoluídos, nas camadas sucessivamente acima, indicando sequência evolutiva; 2º) respondendo ao questionamento do segundo aluno, seria interessante você dizer a ele que a correlação entre camadas distantes é feita por meio da utilização de fósseis-guia, que são organismos que viveram, no passado, em condições específicas e em diversas localidades, ou seja, possuíam uma ampla distribuição geográfica. Além disso, sabemos que esses organismos tiveram uma curta amplitude vertical, isto é, teriam surgido e se extinto rapidamente. Adicionalmente, eles devem ser facilmente identificáveis e abundantes no registro paleontológico; e 3º) com relação ao fóssil-guia mais utilizado para identificar o Cambriano, responda ao aluno que os trilobitas são os mais utilizados, especialmente os do gênero *Paradoxides*.

### Faça valer a pena

**1.** A excepcional preservação de alguns fósseis os tornam fundamentais para o estudo e compreensão das espécies de animais e vegetais antigos e modernos, os modos de vida e habitat de organismos também nos ensinam muito sobre as condições paleoclimáticas e paleoecológicas, fundamentais até mesmo para a compreensão das mudanças climáticas atuais.

Sobre os processos de fossilização, preservação e seus condicionantes, é correto afirmar:

a) Para que os fósseis fiquem preservados, a taxa de soterramento tem que ser baixa, assim os sedimentos finos têm tempo para decantar.

b) O intemperismo atua de forma benéfica na preservação fóssilífera.

c) A substituição do mineral original da carapaça dos organismos por outro é denominado recristalização.

d) A silicificação é um exemplo de processo de fossilização por substituição.

e) A carbonização corresponde a um exemplo de processo de fossilização em que o carbono fica preservado, enquanto os outros elementos são expulsos.

**2.** Os fósseis são divididos, de uma maneira geral, em fósseis corpóreos, também denominados de restos, e fósseis-traço ou vestígios. Àqueles referem-se às partes preservadas de animais ou vegetais, enquanto estes compreendem os registros de atividades que os organismos realizaram quando vivos.

Considerando os tipos de fósseis, é possível julgar como verdadeira a seguinte alternativa:

a) Os coprólitos são restos de animais e, portanto, são exemplos de fósseis corpóreos.

b) As pistas são exemplos característicos de fósseis-traço.

c) Um tronco petrificado é um clássico exemplo de vestígio.

d) Os ovos de dinossauros são considerados fósseis corpóreos.

e) Os insetos presentes no âmbar são representantes do grupo de fósseis-traço.

**3.** As empresas de petróleo, em todo o globo, utilizam dados paleontológicos para reduzir cenários de incerteza. Muitas vezes, apenas com dados geológicos e geofísicos, ainda há muitas dúvidas sobre onde perfurar um poço a fim de obter informações que ajudem os geólogos a estabelecerem um modelo geológico acurado que represente a realidade e, dessa forma, máxime a produção de óleo e gás.

Sabendo que os fósseis-guia auxiliam na compreensão da geologia de um reservatório de óleo e gás, assinale a alternativa correta:

a) Quando perfuramos um poço e encontramos fósseis do gênero *Inoceramus*, sabemos que estamos no Proterozoico.

b) Quando perfuramos um poço e encontramos cefalópodes nautiloides do gênero *Hexamoceras* sabemos que se tratam de estratos do Devoniano.

- c) Ao perfurarmos um poço e encontrarmos trilobitas do gênero *Paradoxides*, estamos no Cambriano.
- d) Rochas com fósseis com amonites do gênero *Perisphinctes* são característicos do Ordoviciano.
- e) Amostras recuperadas durante a perfuração de um poço que continha fósseis de trilobitas do gênero *Paradoxides* foram interpretadas como do Mesozoico.

## Seção 3.3

### Hidrogeologia

#### Diálogo aberto

Caro aluno, nesta última seção estudaremos outro assunto importantíssimo da geologia aplicada, a água, um assunto muito debatido nas escolas, em educação ambiental. Considerada um recurso abundante e inesgotável durante muito tempo, hoje em dia sabemos que sua disponibilidade não é infinita. Muito pelo contrário, saber gerir os recursos hídricos e ensinar as próximas gerações a valorizá-los é, atualmente, um dos maiores desafios de nossa sociedade e, conseqüentemente, do professor.

Você perceberá que muitos aspectos hidrológicos e hidrogeológicos estão relacionados com a geologia, fato que demonstra a importância de todo o conhecimento anterior que você adquiriu. Por exemplo, a concentração de determinados elementos contaminantes na água, como o arsênio, está muitas vezes associada a minerais que ocorrem ao longo da trajetória da água, e não necessariamente a uma atividade poluidora. Por isso, é necessário conhecer o substrato geológico – e as atividades que nele se desenvolvem – por onde a água passou.

Vamos então imaginar agora uma situação hipotética para, posteriormente, aplicarmos os seus conhecimentos sobre hidrogeologia: todos os anos, um mês antes de celebrar o dia nacional e mundial da água (22 de março), o diretor da escola onde você trabalha pede aos professores para criarem atividades teórico-práticas e multidisciplinares para os alunos estudarem sobre o tema. Você, o professor de geografia, resolveu relacionar o tema das águas com geologia, biologia, matemática e química.

Para isso, decidiu elaborar uma maquete em 3D com diversos tipos de materiais que simulariam as rochas de uma região. A argila simularia as rochas mais finas, como os argilitos e folhelhos, já a esponja faria o papel dos arenitos, ao passo que a brita representaria os conglomerados. Intercalado a esses materiais, você colocou algumas finas placas de granito com algum espaçamento entre elas, simulando uma rocha fraturada. Feito isso, você moldou essa maquete para que ela parecesse uma região montanhosa, com vales e serras. Com esse modelo em mãos, você gostaria que seus alunos entendessem a relação entre as águas superficiais e subterrâneas, expondo a relação entre os elementos do ciclo hidrológico. No entanto, elaborando esse modelo, você achou que talvez seria importante debater em sala os seguintes pontos: quais são os elementos do ciclo hidrológico que devo simular para que os alunos entendam sua dinâmica? Dentre esses materiais, quais seriam camadas aquíferas e quais representariam um aquíclode? Se instalarmos poços de monitoramento, como poderíamos elaborar um mapa da superfície freática?

Que tal se preparar para essa aula e buscar conhecimento aqui, no livro didático? Aqui expomos sobre o ciclo hidrológico, as águas superficiais e subterrâneas e a vulnerabilidade dos aquíferos, destacando os aspectos básicos sobre fontes de contaminação e suscetibilidade diante da poluição das águas subterrâneas.

## **Não pode faltar**

Entender a dinâmica das águas passa, necessariamente, pela compreensão do ciclo hidrológico, é por meio desse mecanismo que conseguimos compreender a relação de interdependência entre os elementos da “geosfera” com os da hidrosfera, e de que forma eles influenciam na circulação das águas, o chamado ciclo hidrológico (Figura 3.5).

Figura 3.5 | O ciclo hidrológico, seus elementos principais e suas relações dinâmicas



Fonte: <<http://water.usgs.gov/edu/watercycleportuguese.html>>. Acesso em: 6 fev. 2017.

A análise do ciclo pode ser iniciada por meio do Sol, o agente que aciona toda a interação entre os elementos. Responsável pela evaporação das águas localizadas tanto no continente (rios, lagos, açudes etc.) quanto nos oceanos (mar e geleiras), o Sol também influencia na transpiração das plantas, as quais liberam o vapor d'água para a atmosfera. Juntos, evaporação e transpiração são referidos como evapotranspiração, pois separar a quantidade emitida por cada um é extremamente complicado. São esses dois elementos, juntamente com o processo de sublimação, que encaminham a água de volta para a atmosfera.

À medida que o vapor d'água sobe para a atmosfera, ele se condensa sob o efeito de temperaturas mais baixas, transformando-se em nuvens. Quando a nuvem já não consegue mais sustentar as gotículas de vapor, estas se precipitam em forma de gelo ou chuva. Em seu caminho descendente, boa parte da chuva, no entanto, evapora e fica na atmosfera. O resto atinge o mar e, mais importante, a área continental da Terra. Nesta situação, uma parcela da chuva poderá cair sobre as folhagens de coberturas vegetais, ficando retidas pelas folhas (interceptação).

No entanto, grande parte da água atinge a superfície terrestre de modo que sua trajetória poderá tomar, basicamente, dois rumos: escoamento superficial e infiltração (que levará ao acúmulo de água no subsolo, na forma de água subterrânea). O escoamento superficial ocorre principalmente através dos corpos de água (como rios, córregos, ribeirões e riachos), os quais concentram as águas em regiões canalizadas, os canais fluviais. A rede formada por vários canais fluviais que abrangem uma determinada área e, por fim, acabam fluindo por meio de um ponto único, é denominada bacia hidrográfica. É essa unidade geográfica, inclusive, que utilizamos como base para muitos estudos qualitativos e quantitativos de hidrologia.



### Assimile

A bacia hidrográfica é uma região, na superfície terrestre, na qual o escoamento superficial, em qualquer ponto, converge para um único ponto fixo, o qual denominamos de exutório.

Ao estudarmos uma bacia hidrográfica geralmente nos atentamos para alguns fatores importantes: 1º) em termos climáticos, destacamos a intensidade e duração da precipitação. Quanto mais intensa é a precipitação, mais rápido o solo irá atingir sua capacidade de infiltração, causando o direcionamento do excesso para o fluxo superficial. Além disso, quanto maior a duração da chuva, maior a chance de o escoamento superficial ocorrer de forma intensa; 2º) os aspectos fisiográficos, que incluem a área e forma da bacia hidrográfica, capacidade de infiltração, permeabilidade do solo e topografia da bacia. A área da bacia influencia no total de água captada, afinal, quanto maior a área da bacia, maior a quantidade de água concentrada nela. A forma da bacia irá influenciar a possibilidade da ocorrência de inundações, pois bacias compactas possuem a tendência de concentrar o escoamento no canal principal.

Com relação à capacidade de infiltração, quanto mais água infiltrar, menor será o escoamento superficial. Esse parâmetro também está associado à permeabilidade, isto é, quanto mais permeável o solo, maior será a quantidade de água subterrânea escoada e, conseqüentemente, maior a quantidade de água superficial que poderá ser absorvida. Por último, a topografia da bacia irá determinar, principalmente, a velocidade de escoamento da água, de forma que bacias íngremes (como as situadas

em regiões montanhosas) apresentam um escoamento superficial mais rápido e volumoso; e 3º) a ocorrência de obras hidráulicas, como barragens, aprisionam o escoamento d'água a montante de modo que retarda seu deslocamento a jusante, enquanto rios retificados e canalizados permitem um escoamento mais rápido.

A quantificação do escoamento superficial apoia-se em grandezas físicas que o caracterizam de forma mais precisa e indicativa. Dentre os índices principais, destacam-se: (A) a vazão do rio, ou seja, o volume de água ( $Q$ ) que atravessa uma seção perpendicular à direção de escoamento, durante uma unidade de tempo ( $s$ ), a qual normalmente expressamos em  $m^3/s$  ou  $L/s$ . A vazão medida ao longo de um determinado tempo nos permite a construção de um gráfico, chamado de hidrograma (hidrógrafa), muito utilizado para interpretar a evolução do escoamento superficial dos rios em épocas secas e úmidas; (B) altura linimétrica ( $h$ ), que refere-se à altura que o nível d'água atinge, em um determinado momento, em relação a um nível de referência (posto fluviométrico); (C) velocidade ( $V$ ), que expressa o espaço percorrido pela água e o respectivo tempo gasto para percorrer essa distância, medido em  $m/s$ ; (D) vazão específica ( $q$ ), calculada através da relação entre a vazão e a área de drenagem da bacia ( $L/s/km^2$ ); e (E) coeficiente de escoamento superficial ( $C$ ), que mede a relação entre o volume que escoou sobre a superfície do terreno ( $ES$ ) e o volume total precipitado ( $PT$ ). A Tabela 3.2 exemplifica alguns valores de  $C$ , também denominado de coeficiente de *runoff*.

Tabela 3.2 | Coeficiente de escoamento superficial ( $C$ ) de algumas superfícies artificiais e naturais

superfície	Coeficiente de <i>runoff</i> , $C$	
	intervalo	valor esperado
• pavimento		
asfalto	0,70 - 0,95	0,83
concreto	0,80 - 0,95	0,88
calçadas	0,75 - 0,85	0,80
telhado	0,75 - 0,95	0,85
• cobertura: grama solo arenoso		
pequena declividade (2%)	0,05 - 0,10	0,08
declividade média (2 a 7%)	0,10 - 0,15	0,13
forte declividade (7%)	0,15 - 0,20	0,18
• cobertura: grama solo pesado		
pequena declividade (2%)	0,13 - 0,17	0,15
declividade média (2 a 7%)	0,18 - 0,22	0,20
forte declividade (7%)	0,25 - 0,35	0,30

Fonte: ASCE (1969, p. 91).



## Pesquise mais

Para entender melhor sobre o escoamento superficial, recomendamos a leitura de *Princípios de hidrologia*, de Henrique de Melo Lisboa.

LISBOA, H. M. Princípios de Hidrologia.

Disponível em: [http://www.neagua.ufsc.br/tiki-download\\_file.php?fileId=51](http://www.neagua.ufsc.br/tiki-download_file.php?fileId=51). Acesso em: 09 -11 - 2017.

Ao fazermos uma análise direta, é possível notar na Tabela 3.2 que o coeficiente de escoamento superficial para solos é menor que os de superfícies artificiais (asfalto, concreto, calçadas e telhados), de forma que, conseqüentemente, a maior porcentagem da água que atinge o solo irá para o subsolo, pois água tende a se infiltrar. Apesar de a Tabela 3.2 exibir apenas valores de C para solos (com vegetação), boa parte da água que atinge os continentes não infiltra somente em solos porosos e permeáveis, mas também por meio de poros e fraturas nas rochas. Esse caminho natural de descendência da água faz com que elas, eventualmente, saturem os espaços vazios presentes nos solos e rochas, formando um reservatório subterrâneo, denominado aquífero. Um aquífero é, portanto, uma unidade hidrogeológica capaz de armazenar e transmitir água subterrânea em quantidade suficiente para o abastecimento, ou seja, ele precisa ser explorável de acordo com os métodos e tecnologias atuais.



## Exemplificando

Em geologia, o conceito de exploração refere-se à retirada, extração ou obtenção de qualquer recurso natural, normalmente não renovável, o qual se destina para fins de aproveitamento econômico.

No entanto, de acordo com as características geológicas, é natural que haja diferentes tipos de unidades hidrogeológicas se considerarmos a capacidade de armazenamento e transmissão de água, de modo que há outros 3 (três) conceitos fundamentais:

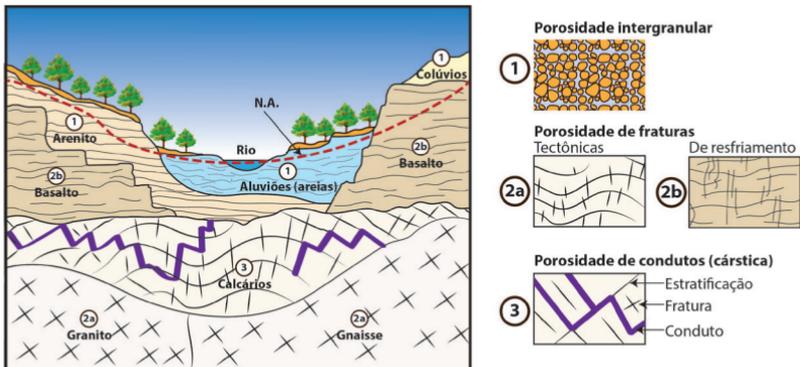
i. Aquiclude: unidade hidrogeológica que, embora armazene água, não possui a capacidade de liberá-la devido à sua baixíssima permeabilidade (exemplo, argila/argilito);

ii. Aquitarde: unidade hidrogeológica capaz de armazenar água, mas a liberam muito lentamente, pois possuem porosidade e permeabilidade baixas (exemplo, arenito com matriz argilosa); e

iii. Aquífero: unidade hidrogeológica que não possui capacidade nem de armazenar nem de transmitir a água, pois não há porosidade e permeabilidade (exemplo, granito não fraturado).

Com isso, vemos que a água subterrânea se move através dos poros das rochas, sedimentos e solos, afinal, diferentemente do senso comum, não há grandes espaços abertos no subsolo, com exceção das cavernas. Esses espaços vazios podem ocorrer de diferentes formas, dependendo do tipo de rocha e/ou solo. Nas rochas sedimentares siliciclásticas e solos (incluindo os solos coluvionares e aluvionares), de uma maneira geral, a porosidade predominante é a intergranular, ou seja, aquela situada entre os grãos. Já nas rochas ígneas e metamórficas (granito, gnaiss e basaltos, por exemplo), os poros são, na grande maioria, restritos às discontinuidades na rocha, e, portanto, a porosidade de fraturas é mais comum, tanto tectônicas quanto "atectônicas". Por último, nas rochas calcárias (sedimentares bioquímicas), é marcante a ocorrência de porosidade cárstica, gerada por meio da dissolução dos componentes da rocha (Figura 3.6).

Figura 3.6 | Esquema representativo dos tipos de rochas e sua porosidade principal



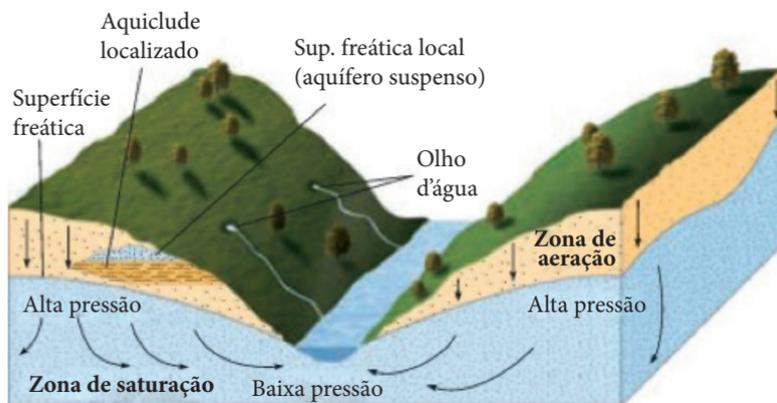
Fonte: adaptada de Karmann (2003, p. 121).

Embora a porosidade nos indique quanto de água pode ficar armazenado na rocha ou solo, ela não representa, necessariamente, a capacidade de transmissão de água subterrânea. Para isso, a propriedade que nos permite avaliar a facilidade com que a água flui é a permeabilidade. Em muitos casos, como nas rochas sedimentares siliciclásticas e solos, quanto maior a porosidade, maior tende ser a permeabilidade, embora a permeabilidade não dependa exclusivamente da porosidade, mas também da forma dos poros, da conectividade entre eles e da tortuosidade (o quão sinuoso é o caminho entre os poros).

O movimento vertical das águas subterrâneas se dá por meio da ação da gravidade, a qual conduz a água para regiões mais profundas, até que 100% do espaço poroso do reservatório subterrâneo (aquífero) esteja preenchido por água. Dessa maneira, quando a saturação atingir esse ponto, não há mais como armazenar água, pois toda a porosidade já se encontra ocupada. Entretanto, haverá zonas do solo ou rocha que não estarão totalmente preenchidas por água, mas sim por água e ar, ou somente ar. Dividimos, portanto, as zonas de acordo com o grau de saturação em: 1) zona saturada, de onde se extrai água para abastecimento, abaixo da qual 100% do espaço poroso é preenchido por água, sendo seu limite superior à superfície freática; e 2) zona não saturada (de aeração ou vadosa), porção em que os poros estão preenchidos por água e ar, em diferentes proporções.

A água localizada na zona saturada se move lateralmente através da diferença de gradiente hidráulico, isto é, devido à diferença de pressão que a água subterrânea está submetida. De modo geral, a água irá se movimentar das zonas onde a superfície freática está mais alta para as partes onde a superfície encontra-se mais abaixo, conforme mostra a Figura 3.7.

Figura 3.7 | Movimento da água subterrânea, superfície freática (principal e local) e olhos d'água em uma região de vales, comum em regiões montanhosas



Fonte: adaptada de Wincader; Monroe (2009, p. 294).

Como você pode também observar na Figura 3.7, a água subterrânea guarda uma estreita relação com os rios. Quando os rios recebem o aporte de água subterrânea ele é chamado de efluente, isto é, está recebendo uma contribuição da água subterrânea e, conseqüentemente, uma porcentagem de sua vazão se deve a isso (Figura 3.7). Em contrapartida, quando os rios carregam os aquíferos, eles são chamados de influentes, já que eles influenciam na recarga de água subterrânea. Isso acontece em épocas de seca, quando a superfície freática está abaixo do nível de vazão do rio.

Na Figura 3.7 também podemos notar a ocorrência de dois olhos d'água que surgem quando a superfície freática encontra a superfície topográfica. Cabe ressaltar aqui que as nascentes também originam dessa maneira.

A ferramenta que auxilia na interpretação da direção de fluxo subterrâneo, que indica se um rio é influente ou efluente, e ajuda no processo de diagnóstico ambiental e de engenharia, é o mapa potenciométrico. A confecção desse produto cartográfico se dá através de medidas da profundidade em que se encontra a superfície freática, registrada em vários pontos (poços de abastecimento, poços de monitoramento, piezômetros etc.), de forma que seja possível posicioná-los espacialmente. Dessa maneira, gera-se uma rede de

pontos onde a profundidade da superfície freática é conhecida. Ao fazer isso, podemos construir um mapa de isovalores que representam a posição relativa dessa superfície (geralmente em referência ao nível do mar – altitude). O mapa gerado assemelha-se a um mapa topográfico, só que nesse caso as curvas de nível correspondem a uma linha que une pontos de mesma cota da superfície freática.



### Refleta

Para que é importante saber a direção de fluxo das águas subterrâneas? Pense em alguns casos em que isso poderia ser aplicado.

Outro assunto importante a ser debatido é a vulnerabilidade dos sistemas aquíferos. Com o aumento populacional em taxas exponenciais, intensificação da urbanização, mudanças no uso e cobertura do solo, além de ocupação territorial não planejada, tem aumentado o número de casos de aquíferos contaminados e, dessa forma, com águas impróprias para o consumo. Em termos de fontes potenciais de contaminação, podemos citar alguns fatores: 1) zonas industriais e residenciais; 2) áreas de despejo de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU); 3) intrusão de água do mar (intrusão salina); 4) áreas de agricultura intensiva (uso de agrotóxicos); entre outros.

No entanto, avaliar a vulnerabilidade adiante da poluição não é uma atividade fácil. O estudo envolve o conhecimento sobre as atuais e futuras fontes de contaminação, associadas a informações de ordem geológica (principalmente litologia) e profundidade de ocorrência do aquífero. Em geral, áreas com aquíferos confinados, em que há uma camada superficial que protege as águas subterrâneas tende a apresentar uma baixa suscetibilidade à contaminação. Já aquíferos livres, como os situados em regiões de solos aluvionares e coluvionares, e aquíferos livre costeiros, situados ao longo de toda a zona litorânea, apresentam alta suscetibilidade, de modo que são extremamente vulneráveis à contaminação.

Conforme podemos observar, é necessário empregar uma metodologia adequada para sabermos e avaliarmos o grau de vulnerabilidade de um determinado aquífero, pois a complexidade do tema é ampla. Análises de águas e solos, muitas vezes, são necessárias

para uma completa caracterização, e em alguns casos, análises isotópicas são feitas para avaliação da fonte de contaminação, já que determinados isótopos podem estar associados às atividades naturais ou antrópicas.



### Pesquise mais

Para conhecer algumas metodologias empregadas na análise da vulnerabilidade dos aquíferos, recomendamos a leitura de Guiguer & Kohnke (2002).

GUIGUER, N; KOHNKE, M. W. Métodos para determinação da vulnerabilidade de aquíferos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2002. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/download/22314/14657>>. Acesso em: 7 fev. 2017.

## Sem medo de errar

Voltando à nossa situação prática lançada no início da seção, você, como professor de geografia de uma escola, está montando uma maquete 3D representativa, para celebrar o dia nacional e mundial da água. O objetivo é que você consiga explicar aos seus alunos a relação entre a água superficial e subterrânea, destacando os elementos do ciclo hidrológico. Planejando a atividade, você decidiu explorar alguns pontos que serão debatidos agora, são eles: quais são os elementos do ciclo hidrológico que você deve simular para que os alunos entendam sua dinâmica? Dentre esses materiais que você vai utilizar, quais seriam camadas aquíferas e quais representariam um aquíclodo? Como poderíamos elaborar um mapa da superfície freática para analisar a distribuição espacial da água subterrânea?

Primeiramente, você deve se lembrar que o ciclo hidrológico é caracterizado por alguns elementos que aportam água para a superfície terrestre e outros fenômenos que retiram água, levando-a para a atmosfera. Como vimos, a influência do Sol está relacionada

principalmente à evaporação e evapotranspiração, portanto, é essa a energia responsável pela dinâmica hidrológica. Após esses processos, o acúmulo de vapor d'água e gotículas em forma de nuvens faz com que, ao atingir o ponto de saturação, ocorra a condensação e precipitação na forma de chuva ou neve. Essa água irá cair sobre a superfície, podendo escoar superficialmente ou infiltrar no solo, alimentando os aquíferos. O ciclo continuará com a água subterrânea e superficial sofrendo o processo de evaporação/evapotranspiração e assim sucessivamente.

Considerando o segundo ponto, tanto a esponja quanto a brita formariam camadas aquíferas, já que ambas são bastante porosas e permeáveis e, dessa forma, configuram camadas que armazenam e transmitem água em quantidade suficiente para serem extraídas economicamente. Já a argila, que é constituída por uma assembleia de argilominerais, que é bastante porosa, mas sua permeabilidade é baixa, fato que configura essa camada como um aquíclodo, pois embora armazene água, não possui a capacidade de liberá-la.

Por último, vimos que a ferramenta que auxilia na visualização da distribuição espacial das águas subterrâneas e interpretação da direção de fluxo subterrâneo é o mapa potenciométrico. Sua confecção, como vimos, se dá através de medidas da profundidade em que se encontra a superfície freática, registrada em vários pontos, de forma que seja possível posicioná-los espacialmente. Dessa maneira, gera-se uma rede de pontos em que a profundidade da superfície freática é conhecida. Ao fazermos isso, constituímos um mapa que representa a posição relativa da superfície freática. Esse mapa assemelha-se a um mapa topográfico, mas, nesse caso, as "curvas de nível" correspondem a uma linha que une pontos de mesma cota da superfície freática.

## Avançando na prática

### Hidrogeologia prática e sociedade

#### Descrição da situação-problema

Na cidade em que você mora há uma zona industrial que foi planejada de forma equivocada, sem a consulta da população ou

qualquer entidade ligada à área de meio ambiente do município. Esse distrito industrial situa-se próximo às regiões de ocorrência de inúmeras nascentes e, inclusive, constitui-se como uma zona de recarga de aquíferos importantes da região, estando localizado nas porções mais altas de uma região montanhosa. Recentemente, houve um derramamento de óleo de uma refinaria, na qual os tanques de armazenamento acabaram vazando devido às más condições de manutenção. Uma parcela da população, que mora a jusante do local, está extremamente preocupada. Muitos utilizam a água das nascentes e a água de poços para o abastecimento. Para esclarecer algumas dúvidas sobre esse acidente e suas consequências, a repórter do jornal local lhe procurou para que você concedesse uma entrevista, elucidando algumas dúvidas mais comuns: é possível que o óleo contamine o aquífero de onde a população capta a água? Podemos considerar esse acidente de abrangência apenas local, mesmo que a água subterrânea atinja cursos hídricos? Como essa situação poderia ter sido evitada? É possível analisar áreas mais suscetíveis à contaminação?

### **Resolução da situação-problema**

Vamos debater brevemente agora algumas formas de responder a esses questionamentos. É importante que você se lembre de alguns assuntos que abordamos aqui nesta seção. Para responder à primeira pergunta, você deve se recordar da tendência de movimentação das águas subterrâneas, que fluem de zonas de alta pressão para zonas de baixa pressão, conforme vimos na Figura 3.7. Por isso, considerando a característica da região e a localização da área onde é feita a captação de água da comunidade próxima, que fica a jusante da zona industrial, podemos perceber que a água, possivelmente, irá fluir justamente para essa direção.

Com relação à segunda pergunta, vimos que as águas subterrâneas e superficiais possuem uma relação de interação, de modo que é possível que haja uma comunicação entre as duas águas. Como a água superficial escoar a uma velocidade mais rápida que a água subterrânea, podemos inferir que, caso a contaminação passe pelo aquífero e atinja o curso hídrico, o óleo poderá abranger mais comunidades, causando um acidente de proporção regional e não somente local.

Por fim, respondendo ao último questionamento da repórter, é possível dizer que a situação poderia ser evitada caso houvesse um planejamento adequado para a instalação da zona industrial. Conforme vimos, há ferramentas que ajudam a definir a vulnerabilidade de determinados aquíferos, de modo que a inclusão de tal ferramenta na etapa de planejamento da instalação poderia ter sido levado em conta. Assim, ao analisar a suscetibilidade dos aquíferos, teríamos uma ideia de áreas mais propícias para a construção de indústrias ou outras atividades potencialmente poluidoras.

### Faça valer a pena

**1.** Dentro das ciências da terra, o ramo que estuda o volume, distribuição e qualidade das águas subterrâneas é a hidrogeologia. Com a crescente demanda por água para consumo humano e crescimento econômico, esse ramo tem ganhado cada vez mais destaque.

Sabe-se que aquíclude, aquífero, aquítarde e aquífugo são unidades rochosas que podem ou não apresentar capacidade de armazenar e transmitir água, e sobre elas é correto afirmar:

- a) Um exemplo de aquíclude é o granito não fraturado.
- b) Um exemplo de aquífugo é o arenito com matriz argilosa.
- c) Um exemplo de aquífugo é o argilito.
- d) Um exemplo de aquíclude é o argilito.
- e) Um exemplo de aquíclude é o granito não fraturado.

**2.** Muitos pensadores e cientistas do século XXI acreditam que em um futuro não tão distante, cerca de 40 ou 50 anos, a humanidade enfrentará uma de suas maiores crises estruturais, a falta de água. Essa molécula polar, formada por dois íons de hidrogênio e um de oxigênio, é fundamental para a sobrevivência da vida na Terra.

Considerando as informações acima e o ciclo biogeoquímico da água, é correto afirmar que:

- a) Ao precipitar-se e atingir a superfície, a água pode escoar superficialmente ou infiltrar.

- b) Condensação é o processo de armazenagem de água nos oceanos.
- c) Condensação é o processo de armazenagem de água nos rios.
- d) Ao evaporar-se e atingir a superfície, a água pode escoar superficialmente ou infiltrar.
- e) Ao condensar-se e atingir a superfície, a água pode escoar superficialmente ou infiltrar.

**3.** O escoamento superficial é um termo muito comum dentro da hidrogeologia, ramo da geologia que lida com estudo das águas subterrâneas. Esse termo refere-se ao caminho e intensidade do fluxo das águas sobre o solo na bacia hidrográfica levando em consideração os fatores que influenciam, os quais são os aspectos fisiográficos, as chuvas e a ação humana.

Considerando as informações e seu conhecimento sobre o escoamento superficial, é correto afirmar que, para analisarmos a quantidade de escoamento superficial, devemos considerar os seguintes fatores:

- a) Horizontalidade, vazão e coeficiente de escoamento superficial de um rio.
- b) Horizontalidade, vazão e coeficiente de escoamento subterrâneo de um rio.
- c) Altura do nível d'água, vazão e coeficiente de escoamento superficial.
- d) Altura do nível d'água, vazão e coeficiente de escoamento subterrâneo.
- e) Altura do nível d'água, horizontalidade e coeficiente de escoamento subterrâneo.

# Referências

ASCE. **Design and construction of sanitary and storm sewers.** Manuals and Reports of Engineering Practice n. 37. New York. 1969.

CASATI, R. **Paleontologia geral.** Disponível em: <[https://youtu.be/P76\\_dPex1eY](https://youtu.be/P76_dPex1eY)>. Acesso em: 18 jan. 2017.

FREIRE, C. C.; OMENA, S. P. F. **Princípios de hidrologia ambiental.** 2005. 203p.

GUIGUER, N; KOHNKE, M. W. Métodos para determinação da vulnerabilidade de aquíferos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2002. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/download/22314/14657>>. Acesso em: 7 fev. 2017.

GUIMARÃES, G.B. Tempo Geológico. In: Liccardo, A.; Guimarães, G.B. (Orgs.). Geodiversidade na Educação. Ponta Grossa: Estúdio Texto. 136 p., 2014. Disponível em: <<http://files.geocultura.net/200001394-b2d4db3ce0/Geodiversidade%20na%20Educa%C3%A7%C3%A3o%20-%20Livro.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

KARMANN, I. Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica. In: TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T.R.; TOLEDO, M.C.; TAIOLI, F. (Ed.). **Decifrando a Terra.** São Paulo: Oficina de Textos. 2003.

PRESS, F.; GROTZINGER, J.; SIEVER, R.; JORDAN, T. H. **Para Entender a Terra.** Tradução: MENEGAT, R. (Coord.). 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

SOARES, M. B. (Org.). A paleontologia na sala de aula. In:..... **Os fósseis e o tempo geológico.** Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Paleontologia, 2015, 714 p. Disponível em: <<https://drive.google.com/open?id=0B2mK57ObVQY3cWIEZkJicHBQNGc>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

TEIXEIRA, W. et al. (Ed.). **Decifrando a Terra.** São Paulo: Oficina de Textos. 2003.

WICANDER, R.; MONROE, J. S. **Fundamentos de Geologia.** Tradução H. O. Avritcher; revisão técnica M. A. Carneiro. São Paulo: Cengage Learning Edição, 2009. 508p.



# Tópicos especiais em Geologia

## Convite ao estudo

Caro aluno, bem-vindo à última unidade da disciplina de *Fundamentos de Geologia*, denominada *Tópicos especiais em Geologia*.

Relembre que nas Unidades 1 e 2 você aprendeu sobre os fundamentos de geologia, desde a formação da Terra até alguns conceitos de petrologia. Avançando, na Unidade 3 você se dedicou ao estudo da geologia aplicada, na qual destacamos tópicos relacionados ao tempo geológico, datação de eventos, estratigrafia e, além disso, se dedicou ao estudo da paleontologia e das águas superficiais e subterrâneas. Dando prosseguimento ao que você aprendeu nessas últimas três unidades, o objetivo é conhecer agora alguns temas atuais que têm ganhado atenção do público em geral, como os recursos naturais e energéticos da Terra, alguns tópicos ligados à área de geologia ambiental e, por último, alguns temas modernos relacionados à geodiversidade, geoturismo e também sobre a geologia médica. O intuito é que você continue seus estudos visando conseguir completar o desafio de adquirir os conhecimentos básicos sobre geologia de maneira sistêmica.

Como de costume, apresentaremos uma situação para que você consiga se colocar numa realidade prática em que esses conteúdos aqui estudados são abordados e explicados de forma didática para seus futuros alunos. Imagine então que você resolveu dividir os conteúdos a serem trabalhados nesta unidade em tópicos para apresentação de seminários, pedindo que os alunos trabalhem em grupos diversificados, promovendo assim a integração entre os membros e o debate sobre a apresentação. Cada grupo, portanto, ficaria responsável por um tema específico, cabendo a eles apresentarem o conteúdo de maneira expositiva e interativa.

No entanto, antes deles apresentarem os seminários você pensou em ministrar algumas aulas para elucidar os conceitos e assuntos mais importantes, você resolveu pesquisar mais e se deparou com alguns questionamentos pontuais de reflexão, como: quais são os principais recursos naturais e energéticos da Terra? Quais são os impactos climáticos e ambientais da exploração desses recursos? De que maneira podemos incentivar o consumo conscientizado de qualquer recurso natural de nosso planeta?

Para que você consiga estar preparado para tratar esses e outros assuntos com seus alunos, você aprenderá quais são os principais recursos materiais da Terra, como petróleo, gás natural, carvão, *shale gas* etc., destacando conceitos de geologia de hidrocarbonetos e de economia de recursos naturais, bem como sobre energias alternativas. Veremos ainda sobre o meio ambiente e os impactos ambientais produzidos pela exploração dos recursos naturais, dando ênfase às atividades antrópicas e sua influência no clima e no ciclo natural do carbono. Por último, aprenderemos sobre a Teoria de Gaia e como a geodiversidade pode auxiliar na conscientização sobre a gestão dos recursos naturais da Terra.

Vamos aos estudos? Boa leitura!

# Seção 4.1

## Recursos naturais e energéticos

### Diálogo aberto

Nesta seção, caro aluno, conheceremos os recursos materiais da Terra, como o petróleo, o gás natural, o carvão e algumas energias alternativas.

Para que você comece a colocar a mão nos livros, é importante que você relembre a situação apresentada no *Convite ao estudo*. Nela, destacamos que você resolveu dividir os conteúdos a serem trabalhados nesta unidade em tópicos para apresentação de seminários aos seus alunos, e cada grupo ficaria responsável por um tema específico, cabendo a eles apresentarem o conteúdo. Para isso, com o intuito de fazer uma seleção dos assuntos principais, você começou a preparar a aula e pesquisar sobre os temas, para que você conseguisse explicá-los de forma compreensível.

Imagine que em sua sala no colégio no qual você trabalha, você começou sua busca, mas se deparou com alguns conceitos que você não se recordava: o que é um sistema petrolífero e quais são os principais elementos que o integram? Quais são os principais tipos de carvão e suas diferenças? Qual a fonte de energia relacionada ao gradiente geotérmico terrestre? Apesar de sua aparente simplicidade, esses conceitos são chaves e devem ser abordados por você em sua aula, afinal são temas recorrentes em provas de seleção e vestibulares. Portanto, a sua tarefa agora é ler o livro didático e responder a esses questionamentos que o capacitarão para a sua aula.

Por isso, é fundamental que você estude quais são os principais recursos naturais e energéticos mais utilizados pelo homem nos dias atuais, como eles são formados, onde eles ocorrem, quais os principais fatores responsáveis pela sua origem, acumulação e descoberta, destacando os conceitos geológicos utilizados para sua

prospecção. Além disso, conheceremos dois conceitos de economia de recursos naturais importantíssimos, recurso e reserva. Veremos também como o carvão é formado, quais suas características, compostos, idade de origem e concentração em C, descrevendo as mudanças que ocorrem em sua evolução. Por último, veremos quais são as energias alternativas existentes e suas principais vantagens e desvantagens. Que tal começarmos!? Bons estudos.

## Não pode faltar

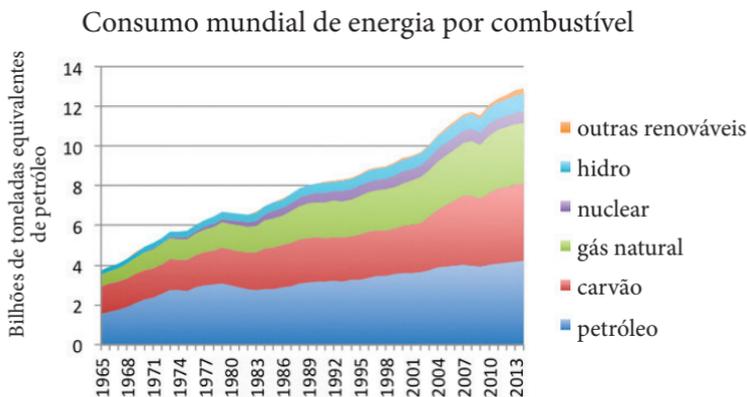
Petróleo, gás, carvão e energia nuclear, todas essas fontes de energia têm origem nas rochas. Por isso, para entender a fonte e as limitações desses recursos, e principalmente para encontrar alternativas energéticas, entender de geologia se torna fundamental. Ao longo das seções anteriores desta disciplina, você foi apresentado aos fenômenos que deram origem ao Universo e ao Sistema Solar e aos processos que moldaram a superfície do planeta Terra ao longo de 4,6 bilhões de anos. Agora que você já conhece melhor os processos geológicos que atuam na formação de rochas e minerais, vamos estudar os recursos que nela têm origem e são extremamente importantes para manter o estilo de vida das sociedades modernas desde a Revolução Industrial.

Qualquer recurso que seja obtido da crosta terrestre pode ser considerado como não renovável, pois a velocidade dos processos geológicos que os produzem é muito menor que a velocidade de consumo pela civilização. A sua disponibilidade depende de fatores como localização, distribuição e custo de extração, e por isso são geralmente referidos como reservas ou recursos. Uma **reserva** é um depósito já descoberto cuja exploração é economicamente viável, enquanto um **recurso** inclui as reservas conhecidas, mas também depósitos cuja exploração não é economicamente viável, ou seja, os custos da retirada desse recurso são mais altos que o possível lucro gerado com sua venda. Dependendo das condições econômicas e demanda de material no mercado, uma reserva pode se tornar um recurso, e um recurso uma reserva.

O “boom” causado pela Revolução Industrial aumentou a demanda por fontes energéticas na indústria, o setor que mais

consome energia. Por razões econômicas e de praticidade, os recursos mais utilizados (Figura 4.1) desde então são o petróleo, gás natural e carvão.

Figura 4.1 | Os tipos de fonte de energia mais consumidos no mundo

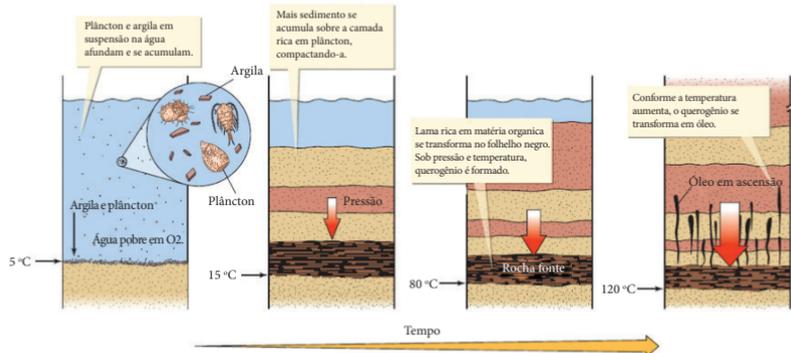


Fonte: <<https://goo.gl/3V3Dap>>. Acesso em: 20 fev. 2017.

Petróleo e gás são hidrocarbonetos (moléculas compostas de cadeias de carbono e hidrogênio) formadas em locais de grande acumulação de matéria orgânica. Ao contrário do que muitos imaginam, não são árvores ou dinossauros enterrados a maior fonte geradora dessa matéria orgânica, mas sim algas e plâncton. Quando morrem, esses microrganismos se depositam no fundo do oceano (Figura 4.2), que deve ser quieto para permitir que estes organismos se misturem com a argila, criando uma lama rica em matéria orgânica que, ao sofrer diagênese, dará origem a um folhelho negro. Quando essas rochas ricas em matéria orgânica, denominadas de **rocha fonte**, são soterradas e atingem profundidades de 2 a 4 km, sua temperatura aumenta em função do grau geotérmico do planeta.

Devido ao aumento de temperatura, reações químicas começam a ocorrer, liberando um composto químico chamado querogênio, e a rocha passa a ser chamada folhelho betuminoso. Caso a temperatura atinja mais que 90 °C, as moléculas de querogênio se transformam em óleo e gás natural. Em temperaturas superiores a 160 °C todo o óleo se transforma em gás natural, e acima de 250 °C qualquer matéria orgânica se transforma no mineral grafita.

Figura 4.2 | Processos de deposição, acumulação, soterramento e conversão de matéria orgânica em hidrocarbonetos



Fonte: Marshak (2008, p. 490).

Essa pequena variação de temperatura que permite a formação de óleo é chamada de **janela de maturação**. A um gradiente termal de 25<sup>o</sup>/km, estima-se que a janela de maturação se encontre entre 3,5 e 6,5 km de profundidade, enquanto o gás natural pode ocorrer em até 9 km de profundidade, limitando a ocorrência de gás e petróleo às porções mais superiores da crosta.

Reservatórios de hidrocarbonetos, ou acumulações de petróleo e gás natural, não ocorrem distribuídos aleatoriamente em qualquer tipo de rocha, muito pelo contrário, ocorrem em locais muito específicos. Para que um reservatório exista, a associação de quatro fatores geológicos é necessária: rocha fonte, rocha reservatório, migração e *trapa* (armadilha). A ocorrência desses componentes, junto com os processos de geração de hidrocarbonetos, constitui um **sistema petrolífero**. Além disso, há uma relação temporal exata para a ocorrência de uma acumulação, também denominada de *timing*.



### Assimile

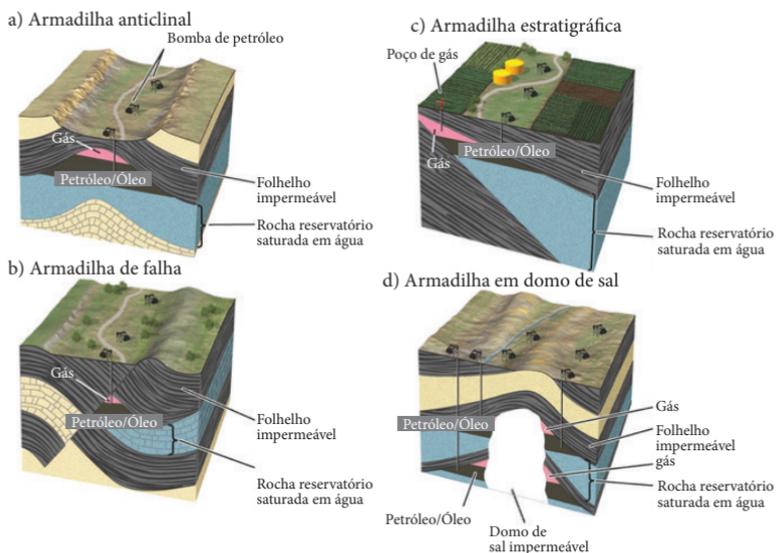
Óleo e gás natural se desenvolvem apenas onde rocha fonte (rica em matéria orgânica), migração, rocha reservatório e armadilha ocorrem associados e sob condições de pressão e temperatura específicas, a chamada janela de maturação.

Por exemplo, para que num determinado sistema petrolífero o hidrocarboneto fique armazenado na rocha reservatório, é preciso que, além da rocha reservatório já ter se formado após o início da migração do óleo, a rocha selante e a trapa tenham sua gênese anterior à chegada do óleo no reservatório, caso contrário o óleo irá escapar e não formará uma acumulação.

Dentro de um sistema, a rocha reservatório deve conter espaços em que óleo e gás possam se acumular (porosidade), e também precisa de canais pelos quais os hidrocarbonetos possam se mover (permeabilidade). A **porosidade** se refere à quantidade de espaço vazio em uma rocha, e pode ser na forma de poros ou fraturas. Tipicamente um folhelho apresenta 10% de porosidade, enquanto um arenito tem em média 35% de espaços vazios. Já a **permeabilidade** se refere ao grau de conexão entre os espaços vazios, ou seja, em uma rocha com alta permeabilidade os poros são conectados permitindo a migração do fluido. É importante se ter esses conceitos em mente na hora de procurar por possíveis rochas reservatório, uma vez que quanto mais alta a porosidade, mais alta tende a ser a permeabilidade e maior a possibilidade que a rocha hospede óleo possível de ser extraído.

De nada adianta que uma rocha reservatório possua alta permeabilidade e porosidade se o óleo gerado escapar da rocha para a superfície, daí a importância de uma *trapa* (Figura 4.3). Dentro de um sistema petrolífero, uma *trapa* é uma estrutura geológica que impede que os hidrocarbonetos continuem a migrar até a superfície. Para que se tenha uma *trapa* é necessária que ocorra uma combinação de rocha selante, esta pode ser qualquer rocha relativamente impermeável (xisto, sal, calcário não fraturado), e uma estrutura geométrica, dobras ou falhas por exemplo, que permita a acumulação dos hidrocarbonetos em uma área restrita.

Figura 4.3 | Tipos de armadilhas mais comuns em sistemas petrolíferos: a) armadilha em anticlinal; b) armadilha de falha; c) armadilha estratigráfica; d) armadilha em domo de sal



Fonte: Press et al. (2006, p. 555).

## Pesquise mais

Você já ouviu falar em gás de xisto ou *fracking*?

Assista ao documentário e descubra mais sobre esse novo combustível fóssil que tem chamado a atenção nos últimos anos.

Disponível em: <<https://goo.gl/BRHNLg>>. Acesso em: 3 maio 2017.

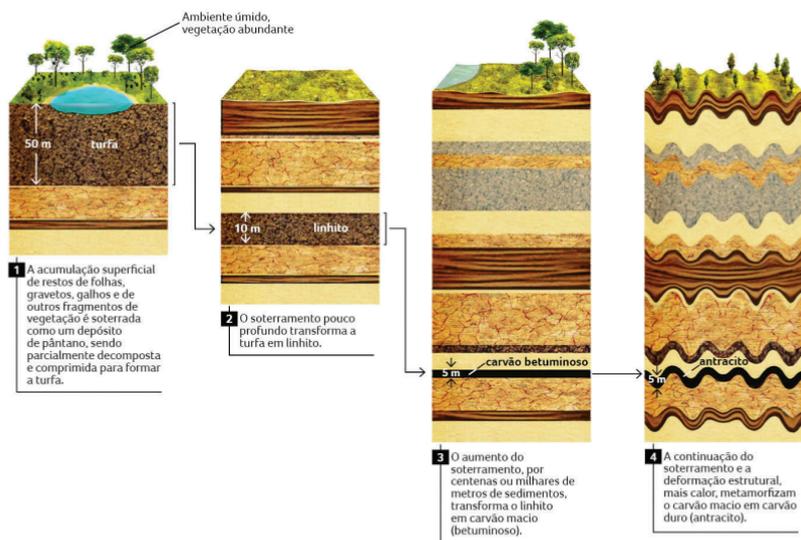
Além dos hidrocarbonetos, a segunda fonte energética mais utilizada no mundo é o carvão. O **carvão** é uma rocha sedimentar de cor escura, geralmente preta, inflamável, que consiste de uma mistura de carbono com outros compostos orgânicos, quartzo e argila. Ao contrário do petróleo, o carvão se forma a partir de troncos, galhões e folhas de plantas que outrora cresceram em florestas.

A maioria dos depósitos de carvão encontrados datam do período Carbonífero (entre 286 e 354 milhões de anos atrás), que recebeu esse

nome justamente devido à grande quantidade de carvão encontrada em suas camadas. O aparecimento de carvão nesse período foi favorecido pelo surgimento de plantas vasculares durante o Siluriano tardio (~420 Ma), pelo fato de que os continentes se encontravam próximos à linha do Equador, em que climas mais quentes favorecem o crescimento da vegetação, pois o nível do mar se encontrava alto nesse período.

Como a junção desses fatores contribuiu para a formação dos mais extensos depósitos de carvão do mundo? Assim como no processo de fossilização, a vegetação deve ser enterrada em locais pobres em oxigênio, para que a matéria orgânica seja incorporada aos sedimentos sem sofrer decomposição; a compactação transforma então a vegetação em turfa. Após sucessivos eventos de regressão e transgressão marinha dentro de uma bacia, as camadas de turfa eventualmente ficam acumuladas (Figura 4.4), expulsando toda a água que ainda restava devido ao peso das camadas superiores. Em profundidades de 4 a 10 km, o calor interno da Terra é suficientemente alto para aquecer a turfa e acelerar reações químicas que destroem as fibras restantes das plantas liberando hidrogênio, nitrogênio, e enxofre na forma de gás, que deixam para trás um resíduo com alta concentração de carbono. Com concentrações a partir de 70% de carbono esse resíduo já é considerado carvão.

Figura 4.4 | Estágio de formação do carvão



Fonte: adaptada de Press et al. (2006, p. 558).

A partir dos níveis de concentração em carbono, o carvão pode ser classificado em linhito carvão betuminoso e antracito (Tabela 4.1). O **linhito** é um material marrom-escuro, macio e muito parecido com o carvão, com 70% de carbono. Em temperaturas mais altas, entre, o linhito se transforma em um material preto fosco, conhecido por **carvão betuminoso**. Em temperaturas ainda maiores, de 200° – 300 °C, o carvão betuminoso se torna um material preto brilhoso, o **antracito**.

Tabela 4.1 | Classificação dos tipos de carvão e poder de queima de acordo com a quantidade de carbono

MATERIAL	% C	Conteúdo Energético <sup>1</sup>	RANK
<b>Turfa</b>	50	1.500 kcal/kg	
<b>Linhito</b>	70	3.500 kcal/kg	BAIXA QUALIDADE
<b>Carvão Betuminoso</b>	85	6.500 kcal/kg	MÉDIA QUALIDADE
<b>Antracito</b>	95	7.500 kcal/kg	ALTA QUALIDADE

<sup>1</sup>Uma caloria é a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura da água em 1 °C.

Fonte: Marshak (2008, p. 504).

Como a vegetação que dará origem ao carvão é depositada em meio aos sedimentos, o carvão ocorre intercalado com camadas de rochas sedimentares, por isso, geólogos procuram por sequências sedimentares formadas em ambientes tropicais e semitropicais, marinho raso a fluvial ou deltaico. Quando procuram por antracito, geólogos devem procurar por rochas em cinturões colisionais, em que as temperaturas são altas o suficiente para transformar a turfa em antracito.

Como são recursos naturais finitos, estima-se que reservas de hidrocarbonetos e carvão sejam exauridas dentro de um século se o ritmo de consumo dessas fontes continuar o mesmo. Além disso, a exploração e queima desses combustíveis fósseis libera dióxido de carbono na atmosfera, o que acelera os efeitos de mudanças climáticas, por isso, fontes alternativas renováveis de energia têm sido desenvolvidas, para que o tempo de vida dos combustíveis fósseis aumente e também para que os impactos ambientais que o seu uso acarreta sejam reduzidos.

O uso de fontes de energia renováveis, como hidrelétrica, solar, eólica e geotérmica aumentou consideravelmente a partir dos anos 2000 (Figura 4.1) e previsões estimam que o uso de energias renováveis represente 1/3 do total consumido até o ano de 2050, sendo a energia eólica a fonte renovável que mais cresce. O uso de **energia eólica** se popularizou na década de 1970, com a crise do petróleo na Europa. Considerada uma fonte totalmente limpa de energia, apesar do alto custo de instalação dos aerogeradores, a pouca necessidade de manutenção e facilidade na operação justificam o crescimento na utilização dessa fonte.

Você mesmo já deve ter passado por algum parque eólico, ou seja, um conjunto de aerogeradores. Outra grande vantagem dessa fonte energética é que qualquer região que possua ventos fortes e constantes está apta a receber aerogeradores. Isso barateia o custo de energia, pois redes de transmissão mais curtas são necessárias para levar a energia de sua fonte geradora até o consumidor final, evitando também a perda de energia nas linhas de transmissão.

A **energia solar** tem vantagens muito semelhantes à eólica, o custo inicial é alto, mas uma vez implantada é totalmente limpa. A radiação solar pode ser convertida diretamente em energia elétrica ao atingir células fotovoltaicas, normalmente feitas de silício, instaladas em locais com alta incidência de luz solar, sendo o Brasil um país que possui clima extremamente favorável à utilização de placas solares.



### Exemplificando

Lugares altos e planos com ventos fortes e constantes, como no topo da Serra do Rio do Rastro em Santa Catarina (Figura 4.5), são ideais para a implantação de aerogedores.

Figura 4.5 | Aerogerador

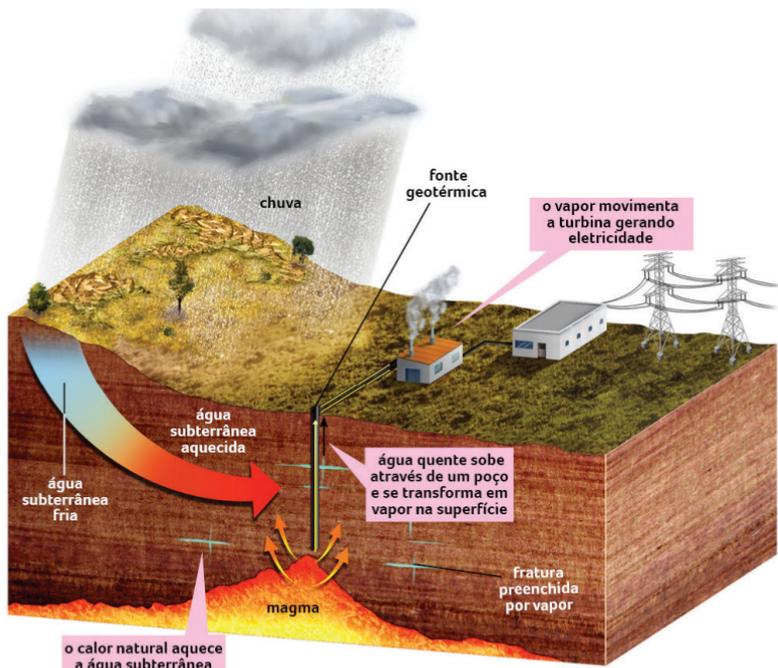


Fonte: <<https://goo.gl/XAtPcz>>. Acesso em: 21 fev. 2017.

Ao contrário da energia eólica e solar, e do que muitos pensam, a **energia hidrelétrica**, apesar de ser uma fonte renovável, não é isenta de impactos ambientais. A instalação de usinas altera o regime hidráulico natural de um rio, o represamento da água destrói enormes porções da floresta, causando impactos locais na fauna e na flora da região. Ainda assim, 18% do total da energia elétrica mundial vem de usinas hidrelétricas, no Brasil esse valor atinge 95%. Nas usinas hidrelétricas a energia é produzida pelo fluxo de água, a energia cinética é então transformada em elétrica ao passar por turbinas. Outra maneira de se produzir energia elétrica a partir da água é aproveitando as marés oceânicas. Para produzir a chamada energia **maremotriz**, algumas barreiras são construídas nas costas, quando a maré sobe a água fica acumulada, quando a maré baixa, a água passa por turbinas dentro dessas barreiras, gerando energia de modo parecido com o que acontece em usinas hidrelétricas instaladas nos rios.

A **energia geotermal**, ou geotérmica, como o próprio nome já diz, se refere ao calor e energia elétrica produzidos a partir do calor interno da Terra. Devido ao grau geotérmico, que já estudamos no início desta disciplina, a temperatura aumenta proporcional à profundidade, aquecendo a água subterrânea. A energia geotermal pode ser utilizada de duas maneiras: 1) simplesmente bombeando a água quente do solo através de canos e utilizando para aquecer moradias ou, 2) usando o vapor liberado para mover turbinas e gerar energia elétrica (Figura 4.6).

Figura 4.6 | Sistema de energia geotérmica



Fonte: adaptada de Press et al. (2006, p. 558).

Recentemente, outra forma alternativa de combustível tem se desenvolvido, os **biocombustíveis**. Biocombustíveis são produzidos a partir da fermentação de plantas de crescimento rápido, o etanol, por exemplo; um tipo de álcool muito utilizado no abastecimento de carros e máquinas é produzido pela fermentação do açúcar da cana-de-açúcar. Além do etanol, o biodiesel também vem sendo muito utilizado, este é produzido pela modificação nas gorduras de determinados óleos vegetais, e pode ser misturado ao diesel derivado de petróleo.



Refleta

Você acredita que no futuro, mesmo que as fontes de combustíveis fósseis não tenham sido exauridas, a maior fonte de energia provirá de recursos renováveis? Quais são as fontes de energia alternativa com mais vantagens de uso?

Antes de avançarmos diretamente para a resolução das perguntas, é importante relembrarmos brevemente o contexto prático de aprendizagem mostrado anteriormente. Já em sua sala, no colégio em que você trabalha, você começou sua busca, e se deparou com alguns conceitos que você não se recordava: o que é um sistema petrolífero e quais são os principais elementos que o integram? Quais são os principais tipos de carvão e suas diferenças? Qual a fonte de energia relacionada ao gradiente geotérmico terrestre?

Sobre seu primeiro questionamento, vimos que um sistema petrolífero corresponde a um modelo conceitual que integra elementos geológicos em uma ordem determinada, cuja relação fará com que haja a existência de uma acumulação de petróleo e gás. Dentre esses elementos que abordamos, destaca-se a rocha fonte (geradora), responsável pela geração dos hidrocarbonetos; rocha reservatório, que é uma rocha com porosidade e permeabilidades suficientes e que permitam o armazenamento e transmissão dos fluidos; rocha selante (selo), que é a uma rocha com característica impermeável e que não permite o escape dos hidrocarbonetos; e, por último, a armadilha (ou *trapa*), que é a estrutura geológica responsável pelo aprisionamento do óleo/gás abaixo da rocha selante.

Com relação à sua segunda dúvida, vimos que existem 4 tipos de carvão: turfa, linhito, carvão betuminoso e antracito. Essa ordem representa o estágio evolutivo que o carvão atingiu com relação ao seu estágio de maturação térmica, relacionado ao soterramento da matéria orgânica vegetal. Portanto, a turfa representa o estágio inicial, com baixa concentração de C e conteúdo energético. Esses parâmetros vão aumentando gradativamente conforme atinge-se profundidades maiores, até que finalmente adquiram a característica de antracito, com altíssima concentração de C e elevado conteúdo de energia.

Para finalizar, para responder sua última pergunta, vimos no *Não pode faltar* que o aumento proporcional da temperatura em função da profundidade terrestre gera um gradiente geotérmico,

que fica na ordem de 25 a 30 °C/km, de forma que podemos utilizá-la para gerar energia elétrica ou aquecer os lares das pessoas.

Acreditamos que esses conteúdos estão entre os mais relevantes para que você possa ministrar a sua aula para os estudantes. Portanto, é interessante que você a prepare levando em conta tudo isso que lhe foi apresentado.

## Avançando na prática

### Simulando e acelerando o tempo

#### Descrição da situação-problema

Imagine que, durante a Semana Nacional de Ciências, você foi convidado pela diretora do colégio onde trabalha para explicar sobre as fontes de energias. A palestra serviria para conscientizar os alunos sobre os principais recursos energéticos que compõem a matriz energética brasileira e mundial, apresentando para eles os principais conceitos e, além disso, discutir tendências mundiais de consumo considerando aspectos socioeconômicos, geográficos e culturais. Por exemplo, em sua preparação para a palestra você decidiu contrapor dois continentes diferentes, África e Europa, apontando suas principais fontes energéticas e avaliando a opção de cada país, considerando suas características. No entanto, para que os alunos buscassem compreender o contexto geopolítico em que o assunto estava inserido e quais as características dos recursos energéticos, você decidiu “dar uma pincelada” em alguns conceitos básicos relacionados, principalmente ao petróleo e gás. Para isso, você decidiu utilizar alguns experimentos simples para ilustrar sua apresentação.

Em casa, você colocou em um vasilhame um pouco de água, argila e restos de vegetais e pequenos animais em decomposição. Feito isso, você realizou um vídeo mostrando a decantação do material no fundo do vasilhame e, após alguns dias, você decidiu aquecer esse recipiente com o auxílio de um bico de Bunsen. Após mostrar esse experimento para os alunos, em um projetor, você se virou para a plateia e fez algumas perguntas: “qual foi o processo físico que eu simulei aqui nestes vídeos? Por que utilizei restos de animais e vegetais degradados, o que eles simbolizam? Qual o processo físico-

químico eu quis acelerar ao esquentar essa mistura com o auxílio de um bico de Bunsen?”

### **Resolução da situação-problema**

Com relação ao primeiro questionamento, você espera que os alunos interajam com a palestra e respondam que o processo físico que você quis simular é o processo de formação do petróleo e gás natural, que ocorre à medida que a matéria orgânica morta vai se decantando ao fundo de um mar, rio ou lago, para que, posteriormente seja transformada nos hidrocarbonatos explorados atualmente.

Sobre a segunda pergunta, você deve obter como resposta ideal que os restos de animais representam, principalmente, o zooplâncton marinho, enquanto que os restos vegetais simbolizam o fitoplâncton. O primeiro é responsável pela formação do petróleo e o segundo, do gás. Finalizando, você deve indagar seus alunos para que eles cheguem à conclusão de que ao aquecer o recipiente onde se encontrava a mistura daqueles materiais, você está representando o aumento de calor que o pacote de rochas sofre ao ser soterrado a grandes profundidades. Dessa maneira, a temperatura ao atingir a janela de maturação, favorece a ocorrência de reações químicas responsáveis pela formação do petróleo e gás.

### **Faça valer a pena**

**1.** O sistema petrolífero é um modelo conceitual elaborado com o intuito de conhecer os elementos geológicos responsáveis pela acumulação de petróleo e gás natural. A integração de seus elementos, bem como o intervalo temporal de ocorrência deles é objeto de análise da geologia do petróleo, e faz parte da rotina de um profissional de geociências que trabalha em companhias petrolíferas.

Sobre o sistema petrolífero, seus elementos e suas características, assinale a alternativa correta:

- a) O selo é uma estrutura geológica capaz de aprisionar o óleo, formando um alvo para exploração.
- b) A rocha fonte, ou geradora, é composta por matéria orgânica terrestre.

- c) A rocha reservatório possui duas propriedades físicas fundamentais, boa porosidade e permeabilidade baixa.
- d) O sal é considerado um exemplo de rocha selante (selo), pois possui baixíssima permeabilidade.
- e) Existe somente um tipo de armadilha, formado através de processos tectônico-estruturais.

**2.** Grande parte do avanço tecnológico atual só ocorreu devido ao impulso gerado pelos novos conceitos dos processos de fabricação advindos da 1ª Revolução Industrial, ocorrida ao longo da segunda metade do século XVIII. E o grande combustível desse período foi o carvão, um bem mineral que o Reino Unido possuía abundantemente.

Com relação ao carvão mineral, seu processo de formação e tipos, assinale a alternativa verdadeira:

- a) A maior parte do carvão do mundo data do período Siluriano (~420 Ma).
- b) A matéria orgânica responsável pela sua formação é a animal e sua origem é favorecida pela ocorrência de oxigênio.
- c) A concentração de C (carbono) aumenta proporcionalmente com o incremento da profundidade em que o carvão é soterrado.
- d) A ordem de formação do carvão é: antracito, carvão betuminoso, linhito e turfa, respectivamente.
- e) O conteúdo energético da turfa é maior que do antracito.

**3.** A energia geotérmica já é realidade em muitos países ao redor do mundo que possuem essa fonte de energia de forma abundante e, de certa forma, de fácil acesso. É o caso de países como a Islândia e o Quênia. Aliado ao baixo custo, essa fonte de energia é considerada menos poluente e danosa, e muito mais segura que outras fontes, inclusive a própria energia hidroelétrica, que perfaz cerca de 2/3 da matriz energética brasileira.

Considerando a energia geotérmica, assinale a alternativa correta:

- a) O calor interno da Terra, aproveitado de maneira direta, é o único método de utilização.
- b) O grau geotérmico diminui proporcionalmente com a profundidade, por isso, fontes geotérmicas mais superficiais são melhores.
- c) A energia geotérmica é extraída de forma direta por meio dos vapores naturais ou pelo bombeamento de água quente e posterior retorno à superfície.
- d) Essa fonte de energia não depende de uma região de calor ativo, como uma zona vulcânica.
- e) A água subterrânea não interfere no desenvolvimento desse fenômeno natural.

## Seção 4.2

### Geologia ambiental

#### Diálogo aberto

Caro aluno, na seção anterior estudamos as principais fontes energéticas, sejam elas renováveis ou não. Nesta seção, iremos abordar alguns dos problemas ambientais mais comuns e prejudiciais à natureza e ao ambiente, decorrentes da exploração e uso das alternativas citadas anteriormente. Também tentaremos entender o papel do ser humano como agente geológico capaz de transformar ambientes.

Agora, vamos retomar a ideia apresentada no *Convite ao estudo* desta unidade, no qual você resolveu dividir os conteúdos a serem trabalhados nesta unidade em tópicos para apresentação de seminários em sala de aula. Nesta aula, você, como professor, é responsável por apresentar um seminário referente a assuntos como mudanças climáticas globais, o ciclo do carbono e o papel da atividade humana na modificação do ambiente.

Para preparar a aula, você começou elencando os principais tópicos e buscando pelas fontes a serem utilizadas. Ao montar a aula resolveu que iria, ao longo da apresentação, abordar tópicos como: o que é o ciclo do carbono? Como ele funciona? Qual o papel do ser humano na modificação desse ciclo? Quais fatores influenciam na transformação dos ambientes? Qual o papel do ser humano na modificação da superfície da Terra? Quais os impactos ambientais que têm sua causa relacionada à atividade humana?

Apesar de sua aparente simplicidade, esses conceitos são chaves e devem ser abordados por você ao longo do seminário. E por isso é importante que você estude ao longo desta seção os conteúdos apresentados no *Não pode faltar*, pois nele os conceitos de variabilidade climática e os agentes geológicos condicionantes

de ambientes estarão expostos de maneira clara para que você possa montar uma apresentação didática que responda a todos os seus questionamentos. Boa leitura!

## Não pode faltar

A superfície do nosso planeta apresenta uma variação inimaginável de formas, e cada paisagem reflete a ação dos agentes geológicos (os rios, as geleiras e a ação do vento, por exemplo) que atuaram ao longo de milhares de anos para dar forma a cada uma delas. Os geólogos são aqueles que tentam identificar os fatores por trás do desenvolvimento dessas paisagens, sendo o mais importante deles a modificação de terrenos devido à atividade tectônica, que através do soerguimento ou subsidência favorecem a ação de determinados agentes geológicos condicionantes de relevo.

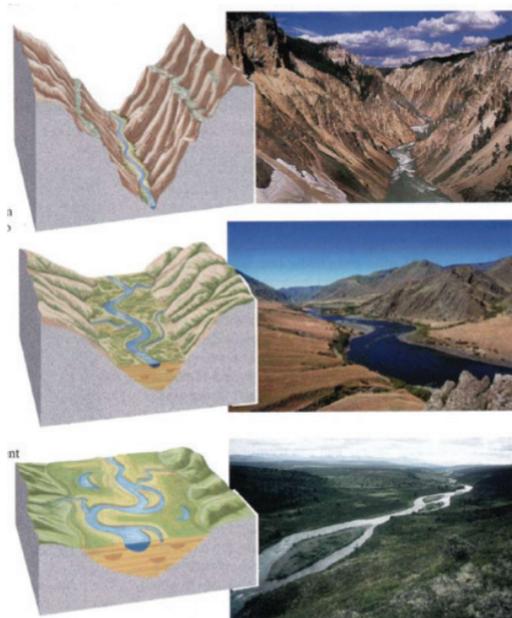
A energia que fomenta esses processos modificadores de relevo vem de três fontes: internas, externas e gravitacional. A energia interna é responsável por movimentar as placas tectônicas, a energia externa, vinda do Sol, faz com que atmosfera e os oceanos interajam, e a energia gravitacional é a responsável por favorecer a movimentação dos sedimentos e rochas até as bacias deposicionais. Na verdade, a evolução das paisagens pode ser considerada uma batalha entre processos colisionais, de convergência e soerguimento, ou seja, geração de relevo, e os processos erosivos, que atuam “destruindo” o relevo.



### Exemplificando

Quando alguma região sofre subsidência, ou soerguimento, essa diferença de nível não dura por muito tempo, pois a erosão começa a agir fazendo com que os sedimentos resultantes da alteração sejam carregados para as regiões mais baixas, onde se depositam, causando esse diferencial (Figura 4.7).

Figura 4.7 | A erosão como agente modificador de terrenos



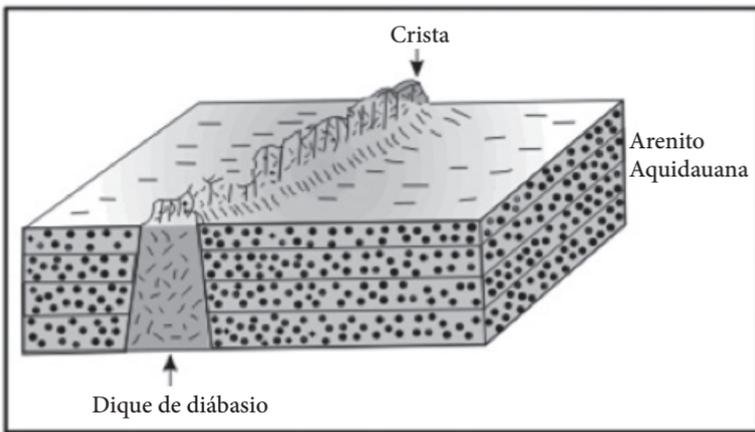
Fonte: Press et al. (2006, p. 539).

De forma generalizada, pode-se dizer que os ambientes geológicos que conhecemos refletem a ação de seis fatores principais: (1) A erosão e os agentes transportadores, como água, gelo e vento, causando a erosão e transporte de sedimentos, porém cada um com suas características particulares, causando variações em cada um desses ambientes. (2) Elevação, em regiões onde cadeias de montanhas se formam, também ocorrem vales profundos, porém em regiões planas isso não ocorre, e os agentes geológicos que atuam na configuração da paisagem serão completamente diferentes. (3) O clima é responsável por controlar a temperatura e o volume de precipitação em cada região, determinando se o principal agente erosivo e deposicional regional será a água, o gelo ou o vento. (4) Atividade biológica, como a presença de bactérias, minhocas ou plantas pode enfraquecer ou favorecer o (5) substrato, esse que por sua vez será fator determinante na resposta à erosão. Por fim, o (6) tempo controla o nível de erosão de acordo com o tempo que cada ambiente é exposto a ela.



Um exemplo de como a litologia tem forte influência sobre a taxa de erosão é no caso de regiões com diques, cuja litologia é mais resistente que a rocha hospedeira. Nesses casos, a rocha hospedeira será erodida mais rapidamente e a rocha mais resistente, representada pelo dique, formará uma crista elevada no relevo. Na figura seguinte (Figura 4.8), o dique de diabásio é menos susceptível à erosão que o arenito hospedeiro, outro exemplo seria o caso de um dique de quartzito em uma rocha ígnea.

Figura 4.8 | Diferença no potencial de erosão de acordo com a litologia

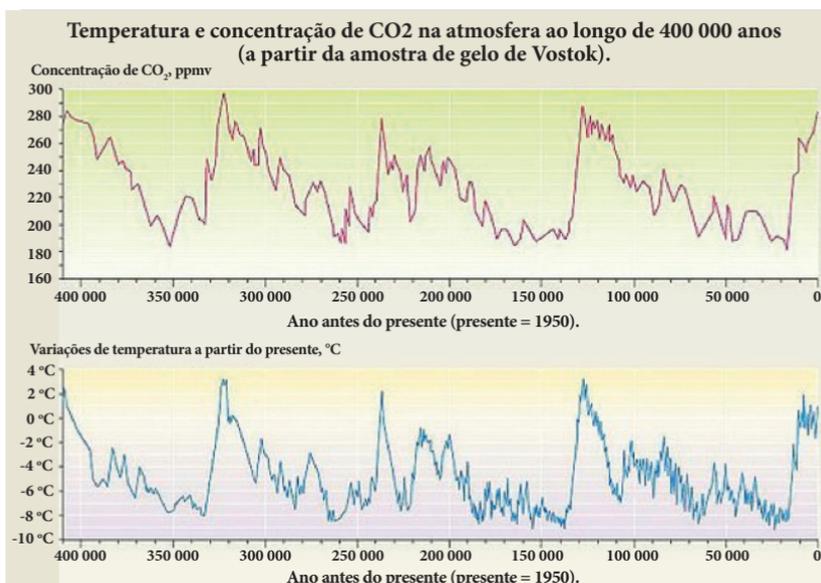


Fonte: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia/cap2/2.20.gif>>. Acesso em: 30 mar. 2017.

Ao longo de sua história, os períodos glaciais e interglaciais alteraram drasticamente a superfície e o clima do nosso planeta. Eles estão diretamente relacionados com os eventos de transgressão e regressão marinha, e com a transformação da água dos oceanos nas extensas geleiras que cobrem metade da superfície do planeta, diminuindo o seu nível, por exemplo. Apesar dos fatores naturais serem os principais agentes controladores de relevo e do clima, a atividade humana tem exercido forte papel na modificação da superfície terrestre – seja na forma de grandes minas a céu aberto, pilhas de rejeito, construção de barragens ou modificando cursos de rios e linhas de costa dos mares –, assim como na intensificação do seu aquecimento.

Sabe-se que algumas das mudanças climáticas ocorridas ao longo da história da Terra têm ligação com os níveis de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) na atmosfera, com maiores níveis de  $\text{CO}_2$  sendo relacionados com temperaturas mais altas; como pode ser verificado na Figura 4.9.

Figura 4.9 | Relação entre os níveis de  $\text{CO}_2$  na atmosfera e as variações de temperatura



Fonte: adaptada de <<http://www.global-greenhouse-warming.com/ice-ages-and-sea-levels.html>>. Acesso em: 30 mar. 2017.



### Assimile

Os principais fatores que controlam agentes de erosão e transporte, e consequentemente causam modificações nas paisagens são soerguimento e erosão, clima, composição do substrato, atividade biótica e tempo.

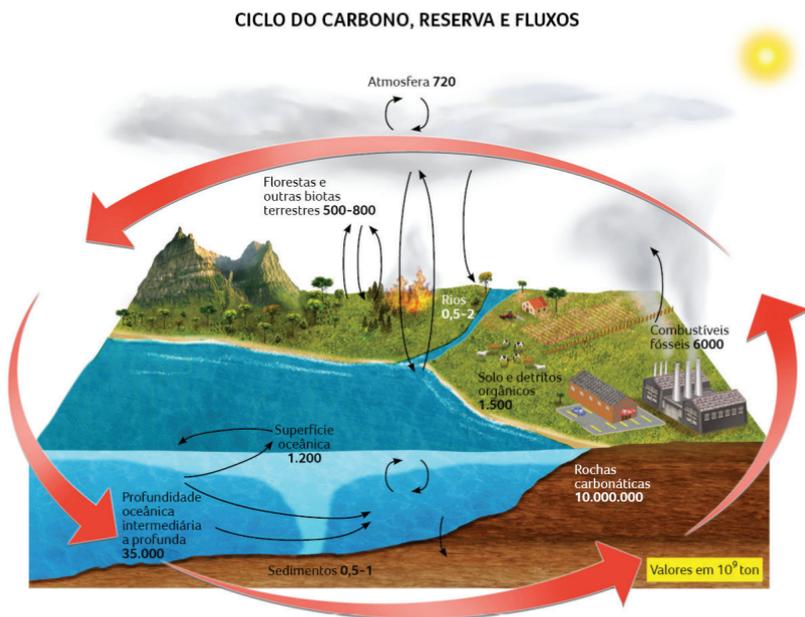
O carbono é o quarto elemento mais abundante no Universo, no planeta Terra, e absolutamente essencial à vida. Sua presença define se uma molécula é orgânica, caso contrário será inorgânica. O que muitos não sabem, por exemplo, é que o carbono presente nos oceanos, rios, ar, rochas, solos e seres vivos existe em uma quantidade

fixa, limitada, mas graças ao seu dinamismo, está sempre circulando entre os seres vivos ou rochas. A esse dinamismo é dado o nome de **ciclo do carbono**.

Nesse ciclo o carbono é liberado para a atmosfera a partir de “fontes de carbono” e armazenado em plantas, animais, rochas e água, os chamados “reservatórios”, através de uma série de processos (Figura 4.10).

A partir da fotossíntese, as plantas absorvem o dióxido de carbono da atmosfera e o convertem para compostos de carbono que constituem o corpo da planta (folhas e raízes). Essas plantas são então comidas pelos animais que, ao respirarem, liberam dióxido de carbono na atmosfera, disponível novamente para as plantas realizarem fotossíntese. Caso as plantas não sirvam de alimento para animais ou insetos, durante sua decomposição o carbono por elas armazenado será novamente liberado na atmosfera ou ficará acumulado no solo.

Figura 4.10 | O ciclo do carbono, quantidade (Gt/ano) de carbono nos reservatórios e fontes



Fonte: adaptada de <<http://palhariniconsultoria.com.br/institucional/imagens/noticias/1a05f12.jpg>>. Acesso em: 3 mar. 2017.

Além dos seres vivos, grandes quantidades de carbono são liberadas através de processos geológicos, como erupções vulcânicas, em um ciclo de carbono lento. Neste ciclo, o carbono demora em média de 100 a 200 milhões de anos para migrar entre as rochas, o solo, o oceano e a atmosfera. Para se ter uma ideia, no ciclo rápido do carbono, entre  $10^{15}$  e  $10^{17}$  gramas de carbono são movimentadas todo ano, enquanto no ciclo lento, apenas entre  $10^{13}$  e  $10^{14}$  migram por ano.

A acumulação de carbono nas rochas começa com a chuva, em que o carbono se liga com a água e forma o ácido carbônico ( $H_2CO_3$ ), um ácido fraco, que ao tocar a superfície acaba por promover o intemperismo químico, dissolvendo a rocha e liberando íons de cálcio, magnésio, potássio ou sódio. Esses íons são carregados pelos rios e acumulam-se nos oceanos, os quais combinados com íons de bicarbonato formam carbonato de cálcio, constituindo conchas de organismos que ao morrerem se depositam no fundo dos oceanos, armazenando carbono nas rochas (calcário, por exemplo).

Como o ciclo geológico do carbono é lento, ele só retornará à atmosfera milhões de anos depois, através de vulcões ou após a colisão entre placas fundirem a rocha, e o carbono ser liberado na forma de voláteis junto com o magma durante as erupções. Quando em equilíbrio, o ciclo do carbono mantém uma concentração estável de carbono na atmosfera, mas, mediante qualquer pequena alteração na quantidade de carbono nos reservatórios, os efeitos poderão ser sentidos a longo prazo.

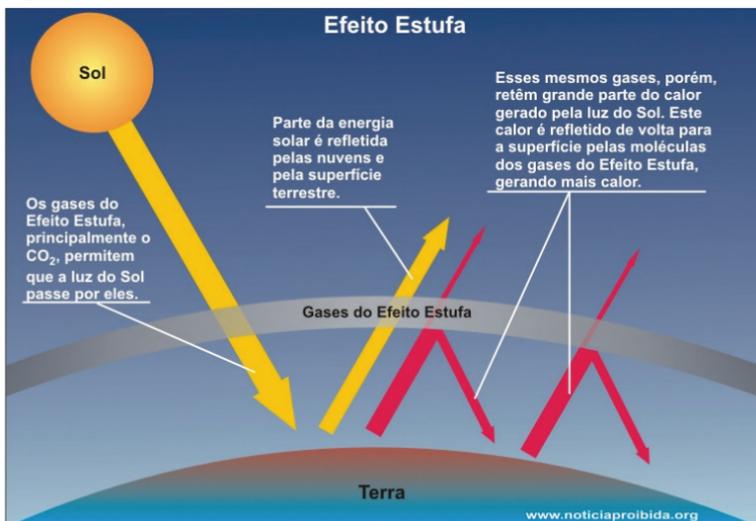
Ao longo da história do planeta, o carbono tem sido armazenado em subsuperfície na forma de carvão e hidrocarbonetos, porém, desde a Revolução Industrial os humanos passaram a queimar muito mais combustíveis fósseis e a liberar quantidades significativas de carbono na atmosfera em um ritmo muito mais acelerado que o natural (Figura 4.11). Como o dióxido de carbono é um gás que favorece o *efeito estufa*, prendendo o calor na atmosfera, segundo um estudo da Cetesb – SP (2006), acredita-se que a presença 30% maior desse gás na atmosfera tem causado o aquecimento do planeta.

### Exemplificando

A Terra recebe energia solar na forma de radiação ultravioleta, visível e infravermelha. Parte dessa energia (26%) é refletida de volta ao espaço pela atmosfera e pelas nuvens, outra parte (19%) é absorvida pelas nuvens, e o restante é absorvido pela superfície

(Figura 4.11). O efeito estufa é um processo natural que aquece a superfície da Terra e é essencial para nossa sobrevivência, pois sem ele a superfície do planeta seria muito fria.

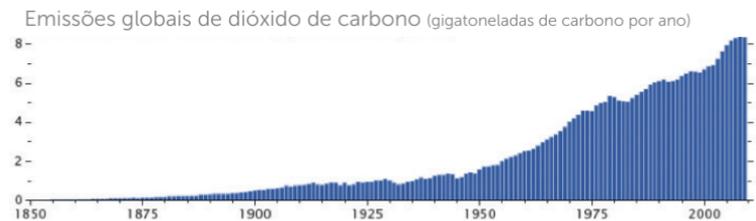
Figura 4.11 | Como funciona o efeito estufa



Fonte: <[http://www.ciencia.iao.usp.br/dados/lcn/\\_recursosdemidiafilmesobr.zoom.jpg](http://www.ciencia.iao.usp.br/dados/lcn/_recursosdemidiafilmesobr.zoom.jpg)>. Acesso em: 30 mar. 2017.

Como você agora já sabe, o efeito estufa é essencial para nossa sobrevivência, o que acontece é que nas últimas décadas a atividade industrial (Figura 4.12) em virtude da nossa civilização tem liberado gases do efeito estufa (GEE) em excesso, potencializando esse efeito, uma vez que a barreira de gases presentes na atmosfera é muito maior, potencializando esse efeito natural.

Figura 4.12 | Emissões de dióxido de carbono na atmosfera. Período 1850-2009



Fonte: <[http://earthobservatory.nasa.gov/Features/CarbonCycle/images/globa\\_carbon\\_dioxide\\_1850\\_2009.png](http://earthobservatory.nasa.gov/Features/CarbonCycle/images/globa_carbon_dioxide_1850_2009.png)>. Acesso em: 3 mar. 2017.

Além do já bem conhecido dióxido de carbono, os gases metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), os perfluorcarbonetos (PFCs) e o vapor d'água são também GEE.



### Pesquise mais

Para saber mais sobre o ciclo do carbono, gases do efeito estufa e emissão de gases na atmosfera, confira este vídeo:

INPEvideoseduc. Carbono e vida. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=ZSiU6N8tBzl>>. Acesso em: 7 abr. 2017

Mortes em massa devido à chuva ácida, exposição aos raios ultravioleta em excesso em função do buraco na camada de ozônio, além do aquecimento global, são outras mudanças climáticas globais que têm sido atribuídas ao excesso de queima de combustíveis e liberação de dióxido de carbono na atmosfera pela atividade antropogênica. Apesar de terem causas relacionadas, a magnitude de cada uma dessas alterações climáticas é variável.

A chuva ácida, por exemplo, possui efeitos regionais, mas pode se transformar em um problema mundial com a expansão da atividade industrial. Nas regiões onde há grande concentração de indústrias, o ar é altamente poluído por gases como o dióxido de enxofre, resultante da queima do carvão para geração de energia, combustível rico em pirita, um mineral que possui alta concentração de sulfeto de ferro. Esses gases reagem com o oxigênio e a água da chuva formando o ácido sulfúrico, muito mais nocivo que ácido carbônico formado naturalmente, fazendo com que a chuva se torne mais ácida e altamente prejudicial aos pequenos organismos e também às rochas, e mais intensamente em tecidos, tintas e metais.

Ao contrário do efeito das chuvas ácidas, o buraco na camada de ozônio estratosférico pode causar danos globais. Essa camada protetora se forma quando a radiação solar interage com o  $\text{O}_2$ , dando origem ao  $\text{O}_3$  (ozônio), que tem a capacidade de absorver os raios ultravioleta, causadores de câncer de pele e catarata, por exemplo. Sabe-se que a emissão de gases de clorofluorcarboneto (CFC) é um dos fatores responsáveis pelo aparecimento do buraco

da camada de ozônio. Os gases de CFC são compostos orgânicos que contêm átomos de carbono, flúor e cloro altamente usados como refrigeradores em equipamentos de ar-condicionado, espumas (extintores de incêndio) e embalagens aerossol. Quando na atmosfera, esses gases têm um tempo de vida estimado em décadas, a partir de então as moléculas de flúor e cloro reagem com as moléculas de ozônio, enfraquecendo parte dessa camada, formando um buraco. Isso fez com que em 1987 vinte e quatro países assinassem um acordo internacional comprometendo-se a implantar medidas com o intuito de diminuir a emissão de CFCs e gases do efeito estufa. Esse acordo ficou conhecido como protocolo de Montreal. A exemplo desse protocolo, outros acordos internacionais com medidas de proteção ambiental foram assinados, sendo os mais conhecidos o Protocolo de Viena (1985) e o Protocolo de Kyoto (1997) para limitar a emissão de dióxido de carbono, e mais recente, o Acordo de Paris, assinado em 2015 com medidas para evitar as mudanças climáticas globais.



### Refleta

Dados históricos mostram que a Terra passa por um processo de aquecimento antes de entrar em uma era glacial. Você acredita que o aquecimento que o planeta vem sofrendo nas últimas décadas pode estar relacionado a esse fato? Ou é apenas consequência do aquecimento global devido ao aumento na emissão de gases de efeito estufa?



### Pesquise mais

Se você ficou curioso em saber e entender mais sobre o ciclo do carbono, o efeito estufa e a relação deles com o aquecimento global, confira essa série de vídeos educacionais feitas pelo Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE).

INPEvideoseduc. **Vídeos.** Disponível em: <<https://www.youtube.com/user/INPEvideoseduc/videos>>. Acesso em: 7 abr. 2017.

## Sem medo de errar

Antes de avançarmos diretamente para a resolução das perguntas, é importante relembrarmos brevemente o contexto prático mostrado anteriormente no *Diálogo aberto*. Nele, destacamos que você resolveu dividir os conteúdos a serem trabalhados nesta unidade em tópicos para a apresentação de seminários, e nessa semana ficou responsável por preparar e apresentar uma aula relacionada às mudanças climáticas globais, o ciclo do carbono e o papel da atividade humana na modificação do ambiente.

Ao montar a aula resolveu que iria, ao longo da apresentação, abordar tópicos como: o que é o ciclo do carbono? Como ele funciona? Qual o papel do ser humano na modificação desse ciclo? Quais fatores influenciam na transformação dos ambientes? Qual o papel do ser humano na modificação da superfície da Terra? Quais os impactos ambientais que têm sua causa relacionada à atividade humana?

Sobre seu primeiro tópico, “o que é o ciclo do carbono?”, vimos no “Não pode faltar” que esse ciclo se refere às transformações pelas quais o carbono, que existe no planeta, passa, já que ele existe na mesma quantidade desde o início da história do planeta. Neste ciclo, o carbono é liberado para a atmosfera a partir de “fontes de carbono”, que são os humanos, plantas, animais e rochas.

Vimos também, que quando em equilíbrio, o ciclo do carbono mantém uma concentração estável na atmosfera, mas a queima em excesso de combustíveis fósseis pelo ser humano para sustentar a atividade industrial tem aumentado as concentrações de carbono na atmosfera, acumulando os chamados gases do efeito estufa que causam o aumento gradual da temperatura do planeta, podendo desencadear uma série de problemas ambientais.

Uma coisa interessante de se fazer seria explicar para os estudantes qual é o principal vilão do aquecimento global e quais características conferem a ele o papel de protagonista nesse processo. Você se lembra? Visite novamente o “Não pode faltar” e prepare os seus argumentos para a aula quanto a isso!

Respondendo às próximas questões: “Quais fatores influenciam na transformação dos ambientes? Qual o papel do ser humano na modificação da superfície da Terra? Quais os impactos ambientais que tem sua causa relacionada à atividade humana?” Lembre-se que um dos principais agentes que controlam os ambientes é a atividade tectônica, promovendo variações no relevo. Lembre-se também que as cadeias de montanhas são mais susceptíveis a agentes erosivos, e o transporte leva os sedimentos até as regiões mais baixas, onde ocorre a deposição. Não esqueça que o clima desempenha papel fundamental na hora de determinar se água, vento ou gelo irão transportar os sedimentos, e o tipo de rocha determinará a sua resistência à erosão. Tente resolver a essas questões utilizando imagens altamente ilustrativas, para que esses conceitos sejam bem fixados pelos alunos!

Não esqueça de mencionar ao longo da apresentação, que além da emissão dos gases do efeito estufa, a atividade humana tem causado chuvas ácidas, o surgimento no buraco da camada de ozônio, e além disso, obras como grandes minas a céu aberto, pilhas de rejeitos e construção de barragens também têm agido como agentes modificadores de ambientes.

Seria importante retomar o conteúdo do “Não pode faltar” para relembrar como esses fenômenos ocorrem.

## Avançando na prática

### Meio ambiente e o ciclo do carbono

#### Descrição da situação-problema

Imagine que, durante o dia mundial do meio ambiente, 5 de junho, você foi convidado pela diretora do colégio em que trabalha para montar uma palestra e uma maquete com alguns alunos sobre o aquecimento global e seus efeitos. A palestra serviria para conscientizar os alunos não somente sobre a importância da redução de emissão de gases, que influenciam no aquecimento (GEEs), mas também sobre a importância do ciclo do carbono e como ele influencia a vida na Terra desde o início do planeta, há 4,6 bilhões de anos.

Para facilitar a didática, você deixou que os alunos produzissem uma maquete a respeito do aquecimento global, assunto em alta em vestibulares e concursos, enquanto deixou o ciclo do carbono para a palestra. Na preparação para a palestra você decidiu criar um mapa interativo que destacava a quantidade de carbono encontrada em vários locais: atmosfera, rochas e oceanos, e para aumentar o aprendizado cognitivo você levou consigo na palestra uma pequena árvore de jardim, algumas amostras de rochas carbonáticas, uma pequena quantidade de óleo de motor automotivo, e também um pouco de gelo seco. Ao colocar o gelo seco na água o mesmo começou a produzir uma fumaça esbranquiçada. Após apresentar todo o ciclo do carbono em um projetor, os exemplos de objetos na bancada e liberar a fumaça branca, você se virou para a plateia e fez algumas perguntas: dentre os nossos exemplos aqui da bancada, quais deles possuem mais quantidade de carbono armazenado? Por que o ciclo do carbono é fundamental para nossa existência?

### **Resolução da situação-problema**

É esperado que os alunos interajam com a palestra – pois esse tipo de atividade atrai muito a atenção – e respondam ao primeiro questionamento informando que dentre os exemplos de objetos da bancada, aquele que possui maior quantidade de carbono armazenada são as rochas carbonáticas, visto que nos depósitos submarinos elas chegam a acumular 10.000.000 tn de carbono, e que o aumento da temperatura pode favorecer a liberação desse carbono na forma de gás para atmosfera, o que poderia impactar diretamente no aquecimento global.

Sobre a segunda pergunta, é esperado que você obtenha como resposta que o carbono é fundamental para nossa existência, pois ele participa da grande maioria das ligações químicas orgânicas, sendo elemento básico nessas ligações. Finalizando, você deve indagar seus alunos para que eles cheguem à conclusão de que o ciclo do carbono é fundamental para as condições do nosso planeta.

## Faça valer a pena

**1.** No final de 2015, na cidade de Paris, França, aconteceu a 21ª Conferência das Partes (COP-21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), na qual ficou firmado o Acordo de Paris. Nesse acordo 147 países se comprometeram a reduzir a emissão de gases, dentre eles o dióxido de carbono, que geram o efeito estufa.

Sabe-se que o carbono é essencial para a vida na Terra, e sobre seu ciclo em nosso planeta, é correto afirmar:

- a) Os maiores valores de carbono são encontrados nos sedimentos.
- b) Os maiores valores de carbono são encontrados nos combustíveis fósseis.
- c) Os maiores valores de carbono são encontrados nos solos.
- d) Os maiores valores de carbono são encontrados nas rochas carbonáticas.
- e) Os maiores valores de carbono são encontrados na superfície oceânica.

**2.** Ao se estudar a história geológica da Terra, mais precisamente a evolução da atmosfera e da temperatura, nota-se que o nosso planeta sofreu um processo de aquecimento e resfriamento sucessivo ao longo de milhares de anos, causando eventos de transgressão e regressão marinha e eras glaciais.

Considerando as informações acima, é correto afirmar que o ciclo biogeoquímico ligado diretamente ao aquecimento global é o:

- a) Ciclo do hidrogênio.
- b) Ciclo do quartzo.
- c) Ciclo do carbono.
- d) Ciclo do chumbo.
- e) Ciclo do sódio.

**3.** O ser humano tem desempenhado um importante papel como agente modificador da natureza, tanto que alguns especialistas têm se referido aos tempos atuais como o Antropoceno, ou seja, uma era geológica que leva em consideração o homem como agente geológico com capacidade de alterar os ambientes.

Sobre os agentes geológicos modificadores da superfície, marque a alternativa correta:

- a) A atividade biológica age como fortalecedor das rochas à erosão.
- b) A atuação de diferentes agentes geológicos, como água, vento e gelo, determina o tipo de um ambiente geológico.
- c) O clima não tem influência significativa como controlador dos agentes de transporte predominantes de uma região.
- d) Todos os tipos de rocha apresentam mesmo grau de susceptibilidade à alteração.
- e) Os agentes geológicos atuantes nas cadeias de montanhas e nos vales são os mesmos.

## Seção 4.3

### Temas atuais em Geociências

#### Diálogo aberto

Caro aluno, nesta última seção do livro didático de *Fundamentos de Geologia* completaremos a nossa análise sistêmica dessa ciência que é muito importante nos dias de hoje. Estudaremos assuntos atuais em geociências, como a Teoria de Gaia, os conceitos de geodiversidade e sua importância prática como ferramenta conscientizadora e educadora. Você estudará como a geodiversidade pode ser utilizada para estimular o geoturismo e, finalmente, verá que a geologia ajuda a explicar muitas enfermidades que nos afligem.

Para que você consiga compreender a importância e aplicabilidade desses temas em sua futura atividade profissional como docente, vamos continuar trabalhando com a situação hipotética da unidade apresentada no *Convite ao estudo*. Nela você está ministrando aulas temáticas sobre tópicos especiais em geologia que darão suporte para uma rodada de seminários a serem apresentados pelos seus alunos em sala. Como a aula da vez envolverá temas como geodiversidade, geoturismo, geoparques e qualidade de vida, imaginemos que você resolveu fazer uma aula ao ar livre e expositiva, levando os seus alunos para um parque natural.

Nesse parque há diversas exposições de feições geológicas chamativas e curiosas, uma exuberante concentração de fósseis e marcas rupestres, além de uma vasta biodiversidade que certamente serão fontes de muitas ideias para a rodada de seminários que virá.

Apesar da sua ideia para realização da aula ao ar livre ser ótima, você não sabia como começar a planejar essa atividade e, por isso, decidiu correr para os livros e pedir opiniões de seus colegas da

geologia, que lhe sugeriram os seguintes pontos de debate com os alunos no parque: 1) Qual a relação de interdependência entre a biodiversidade e a geodiversidade? 2) O que é geodiversidade e como ela pode ser utilizada para planejar o espaço que habitamos? 3) Como um parque com exuberante exposição geológica pode trazer frutos socioeconômicos para a sociedade? 4) Como a geologia pode auxiliar na nossa qualidade de vida?

Para que você consiga apresentar esses quatro pontos da aula, incentivamos que estude esta seção, na qual abordamos o que é a Teoria de Gaia, e como ela ajuda a explicar a relação entre os diferentes elementos abióticos e bióticos que compõem o meio ambiente. Veremos o que representa a geodiversidade e como ela pode se transformar numa ferramenta de auxílio ao planejamento de atividades que desenvolvemos. Na sequência, aprenderemos o que é geoturismo e como os geoparques podem se tornar bons aliados ao ensino, cultura e fortalecimento de renda local. Por último, estudaremos sobre a geologia médica e como a geologia auxilia no entendimento da origem e distribuição de doenças. Que tal começarmos?

## Não pode faltar

Muitas pessoas pensam que ao falarmos de geologia estamos tratando de materiais naturais que são advindos de um planeta imutável e sem conexão com as outras “esferas” que compõem o chão que habitamos. Essa visão começou a mudar no final da década de 1970, quando James Lovelock, um ambientalista britânico, publicou o livro *Gaia: um novo olhar sobre a vida na Terra*. Neste livro, Lovelock expõe sua teoria de que o planeta Terra funciona como um sistema vivo, que possui a capacidade de se autorregular, ou seja, de controlar as próprias condições naturais de forma a garantir a continuação da vida terrestre. De acordo com sua ideia, toda a biosfera, em conjunto com a atmosfera e a geosfera (constituída pelos materiais e fenômenos geológicos), funcionam como um sistema integrado e dinâmico, sempre com um único objetivo: manter o sistema Terra em equilíbrio para sustentar a vida.

Lovelock começou a pensar sobre o assunto quando trabalhava como consultor da NASA, contrastando muitas ideias defendidas pelos cientistas da própria agência espacial. No entanto, foi a partir da parceria com Lynn Margulis que a conexão entre as origens biológicas dos gases atmosféricos e questões da termodinâmica química dos elementos, nas quais a complexa relação entre sistemas bióticos e abióticos deu origem à compreensão do fenômeno de autorregulação do sistema Terra.

A partir desse ponto de vista, ambos contradiziam a ideia predominante na época de que a geologia criou as condições para a vida na Terra e que as plantas (e os animais) se serviram desse ambiente propício que, por acaso, eram justamente as condições corretas para favorecer a evolução. Na Teoria de Gaia, a vida é a responsável por criar condições para sua própria existência. Assim, segundo palavras da própria Margulis, Gaia sustenta a teoria de que a superfície da Terra, que sempre fora considerada como meio ambiente da vida, é na verdade parte da vida.

Essa ideia recebeu, e ainda recebe, críticas fervorosas de muitos pensadores e cientistas, os quais afirmam que essa visão é fantasiosa e teleológica, isto é, que há um propósito, um objetivo. Isso, para muitos, destoa do que se acredita representar o método científico e, portanto, não deve ser levada a sério. O que a grande maioria não percebe é que a Teoria de Gaia está implícita nos famosos ciclos biogeoquímicos, como o ciclo do carbono, do nitrogênio, da água etc. Em todos esses ciclos há uma interação autorreguladora entre elementos bióticos e abióticos que são responsáveis por manter a vida de forma equilibrada.



**Refleta**

O que aconteceria, por exemplo, se os vulcões parassem de emitir  $\text{CO}_2$ ? Se as plantas não pudessem mais transpirar e, dessa maneira, a evapotranspiração diminuísse drasticamente?

A Teoria de Gaia continua sendo testada, afinal, não há dúvidas de que o planeta é dinâmico e complexo. Novos fatos surgem todos os dias e novos dados são adquiridos a cada pesquisa que são levadas

a cabo nas ciências ambientais. Mais importante do que discutir se a teoria de Lovelock é realmente oportuna, é fundamental continuar fazendo ciência.



### Pesquise mais

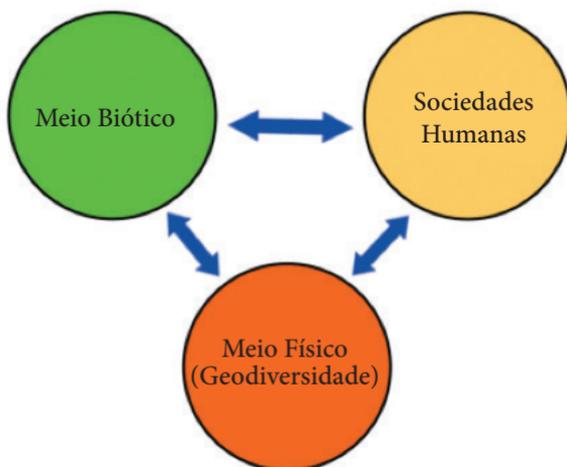
Aqui demos uma breve introdução à Teoria de Gaia, que é muito complexa e vasta. Por isso, estimulamos que leia mais sobre o tema, a partir da página 6, em:

CRUZ, F. N. da; BORBA, G. L.; ABREU, L. R. D. de. **A hipótese Gaia**. 2. ed. Natal: UFRN, 2005. Disponível em: <<https://goo.gl/pcu6ra>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

Continuando a abordar os temas atuais em geociências, passaremos a analisar agora a geodiversidade. Diferentemente de seu irmão mais famoso, a biodiversidade, a geodiversidade é um tema atualíssimo e corresponde à variedade de elementos e processos geológicos que dão origem às paisagens, rochas, minerais, águas, solos, fósseis e outros depósitos superficiais que propiciam o desenvolvimento da vida na Terra. Todos esses assuntos possuem valores intrínsecos variados, sejam eles cultural, estético, econômico, científico, educativo ou turístico (CPRM, 2006). De forma simplificada, podemos compreender a geodiversidade como a porção abiótica de todo o sistema Terra.

Assim, toda a biodiversidade se assenta sobre a geodiversidade, estabelecendo uma relação de interdependência que permite a manutenção das atividades naturais que ocorrem no nosso planeta, e da qual nós, como sociedade, nos sustentamos (Figura 4.13). De maneira mais prática, a concepção de que a geodiversidade relaciona-se com os sistemas integradores do ambiente em que vivemos, permite que ela seja encarada como um elemento importante da gestão ambiental e planejamento territorial.

Figura 4.13 | Esquema mostrando a conexão entre a biodiversidade, a geodiversidade e as sociedades humanas, que as aproveitam



Fonte: Viero et al. (2009, p. 12).

Por exemplo, uma das maneiras de simbolizar a geodiversidade é por meio de mapas. São nesses mapas que as informações geológicas, hidrogeológicas, paleontológicas, entre outras, são dispostas de forma especializada para indicar, como se fosse um inventário, as regiões geográficas onde se localizam determinadas características naturais de relevante interesse.



### Exemplificando

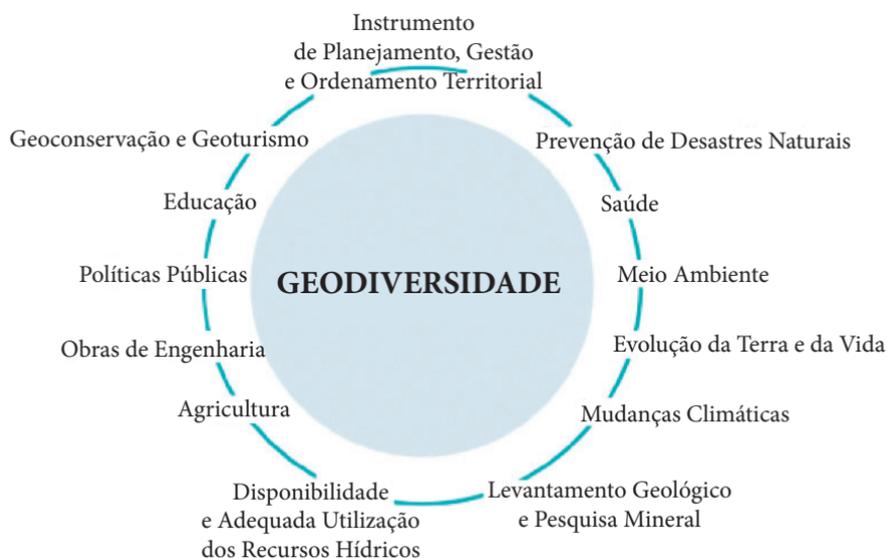
A título de exemplificação, para deixar o conteúdo mais lúdico, acesse o Mapa de Geodiversidade da Folha Curitiba.

RIGEO – Repositório Institucional de Geociências. Disponível em: <[http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/14720/geodiversidade\\_curitiba.pdf?sequence=1](http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/14720/geodiversidade_curitiba.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 17 mar. 2017.

Esses mapas podem servir de base para qualquer decisão futura que interfira no meio ambiente e, portanto, devem servir como ponto de partida para qualquer decisão que afete o mundo abiótico em que vivemos e, conseqüentemente, o biótico. Além disso, esses mapas de geodiversidade demonstram a relação socioeconômica e cultural que

possuímos com o meio, expondo áreas de onde retiramos recursos minerais, captamos águas superficiais e subterrâneas, solos que aproveitamos na agricultura, áreas protegidas, jazidas que possuem petróleo e gás etc. (Figura 4.14).

Figura 4.14 | Importância e utilidade da geodiversidade nas mais variadas atividades que desenvolvemos



Fonte: Viero et al. (2009, p. 12).

A geodiversidade de uma região, além de importante do ponto de vista dos fatores elencados na Figura 4.14, também pode servir de estímulo ao geoturismo.

Cunhado pela primeira vez na Inglaterra por Hose (1995), o termo geoturismo foi concebido para designar atividades que proponham facilitar o entendimento e forneçam facilidades de serviços para que turistas adquiram conhecimentos de geologia e geomorfologia de um lugar, indo além de meros espectadores. Dessa forma, a ideia central dessa linha de pensamento é que o turista agregue conhecimento científico ao patrimônio natural que está diante de seus olhos. Essas atividades auxiliam na valorização do espaço natural e possibilitam que a visita turística seja apresentada como um elemento da sustentabilidade, utilizando como enfoque, principalmente, as feições geológicas da Terra, sem deixar de trazer as características culturais,

socioeconômicas e conservacionistas, sempre pensando no benefício para as populações locais.

No Brasil, monumentos geológicos de rara beleza, cânions, cachoeiras, belos afloramentos, relevos de exceção, sítios paleontológicos e arqueológicos têm promovido o encontro dos turistas com a geodiversidade local das regiões. Para dar exemplos, basta olharmos o Parque Estadual de Vila Velha (Figura 4.15A), o Cânion do Itaimbezinho (Figura 4.15B), Salto do Yumucã (Figura 4.15C) e a Chapada Diamantina (Figura 4.15D), só para citar alguns.

Figura 4.15 | Alguns paisagens e monumentos geológicos exploradas atualmente pelo geoturismo: (A) Parque Estadual de Vila Velha; (B) Cânion do Itaimbezinho; (C) Salto do Yumucã; e (D) Chapada Diamantina.



Fonte: <<https://goo.gl/f6VCpw>>. Acesso em: 17 mar. 2017.



Fonte: <<https://goo.gl/6cwFfU>>. Acesso em: 17 mar. 2017.



Fonte: <<https://goo.gl/l9zM6P>>. Acesso em: 17 mar. 2017.



Fonte: <<https://goo.gl/8rnlao>>. Acesso em: 17 mar. 2017.

O movimento do geoturismo nasceu da negligência dada aos aspectos geológicos e geomorfológicos em muitos pontos turísticos ao redor do mundo e, por isso, essa nova corrente busca aprofundar-se sobre as origens do ambiente que está sendo visitado, afinal a informação geológica faz parte do conhecimento ambiental. Dessa forma, contribui-se para estimular nas pessoas a vontade de discutir

sobre o seu papel no planeta em que vive. Por isso, para ajudar a difundir essas atividades voltadas à conservação do patrimônio geológico, há inúmeros projetos voltados à criação de geoparques em locais de relevante interesse natural. Um geoparque é uma área geográfica definida que deve ser protegida por políticas específicas, cujo atrativo principal é seu patrimônio geológico.

Segundo a UNESCO (2010, [s.p]), um geoparque é "um território de limites bem definidos com uma área suficientemente grande para servir de apoio ao desenvolvimento socioeconômico local, particularmente através do turismo". É a UNESCO, aliás, que outorga o título oficial a um determinado parque e o inclui numa Rede Global de Geoparques (RGG), cuja gestão é enquadrada em conceitos holísticos de proteção, educação e desenvolvimento sustentável. Por isso, um geoparque não é uma unidade de conservação e também não se enquadra em uma nova categoria de área protegida. Conforme a conceituação e critérios da UNESCO (2010), um geoparque deve:

- Preservar o patrimônio geológico para futuras gerações (geoconservação);
- Educar e ensinar o grande público sobre temas geológicos e ambientais e prover meios de pesquisa para as geociências;
- Assegurar o desenvolvimento sustentável através do geoturismo, reforçando a identificação da população com sua região, promovendo o respeito ao meio ambiente e estimulando a atividade socioeconômica com a criação de empreendimentos locais, pequenos negócios, indústrias de hospedagem e novos empregos;
- Gerar novas fontes de renda para a população local e atrair capital privado.

O Brasil, apesar de sua vasta riqueza geológica, possui apenas um geoparque outorgado, o Geoparque do Araripe, que foi incluído na RGG em 2006. No entanto, o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) tem atuado fortemente nessa área, inclusive gerenciando o Projeto Geoparques, cujo produto principal encontra-se publicado na forma de um livro, publicado em 2012, que traz algumas propostas para a criação de novos geoparques.



O livro *Geoparques do Brasil: propostas* traz exemplos de proposta de consolidação de diferentes geoparques no país.

SCHOBENHAUS, C.; SILVA, C. R. da (Org.). **Geoparques do Brasil**: propostas. Rio de Janeiro: CPRM, 2012. Disponível em: <[http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/1209/Geoparques%20%20do%20Brasil\\_propostas.pdf?sequence=1](http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/1209/Geoparques%20%20do%20Brasil_propostas.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 17 mar. 2017.

A estratégia de gestão de qualquer geoparque é o envolvimento da população local, que deve atuar fortemente em conjunto com líderes locais, agentes governamentais, órgão de gestão patrimonial e mineral e instituições de pesquisa.

Outra área de especial interesse nos últimos anos é a geologia médica. Definida como a ciência que estuda a influência de fatores geológicos ambientais relacionados à distribuição geográfica das doenças humanas e dos animais (SELINUS, 2006), esta área é uma contribuição interdisciplinar de profissionais geólogos, médicos, odontólogos, biólogos, agrônomos, entre outros. A importância desse ramo relativamente recente da ciência geológica se deve ao fato de que determinados teores de elementos geoquímicos podem estar relacionados a níveis de deficiência e toxicidade nos organismos de seres vivos. A maioria dos elementos que ocorrem naturalmente na crosta terrestre são fundamentais para a manutenção da nossa boa saúde, no entanto, há outros que podem ser tóxicos.

Quando estamos interessados em analisar a concentração de determinado elemento, e descobrir se há contaminação, é fundamental que conheçamos seu teor de *background*. Para isso, é importante sabermos quais rochas e minerais ocorrem em determinada região, pois, naturalmente, são esses materiais geológicos a fonte de todos os elementos químicos naturais presentes na superfície terrestre. Como exemplo de um *background* anômalo, temos um depósito mineral, como uma jazida de ferro, cobre ou níquel. Nessa área geográfica, os teores são maiores que nas áreas adjacentes, permitindo, por isso, seu aproveitamento econômico.



Teor de *background*, ou nível de *background*, refere-se à concentração de determinado elemento (geo)químico naturalmente presente em uma determinada área, que pode ser diferente de outra, cujas características geológicas são distintas. Por isso, cada região possui um *background* específico.

Quando consideramos sua disponibilidade no ambiente, vemos que sua entrada nos organismos se dá através da água que bebemos ou do ar que respiramos. Como tanto a água quanto o ar circulam de forma contínua, é possível notar que há um vínculo direto entre a geoquímica e a saúde, devido ao convívio diário por meio das funções de ingestão e inalação de elementos químicos via alimentação e respiração. Para que possamos entender melhor a contribuição de cada elemento, devemos analisar a geologia do local. Por exemplo, as concentrações de níquel (Ni) e cromo (Cr) são muito mais elevadas em basaltos do que em granitos, enquanto que para o chumbo (Pb) ocorre o inverso (SELINUS, 2006). Além disso, nos sedimentos, os metais pesados, os mais prejudiciais à saúde, possuem uma tendência a se concentrarem nas frações mais finas (argila/silte) e/ou naquelas em que o conteúdo de matéria orgânica é maior.

Além da litologia, é fundamental analisar o processo geológico responsável por trazer os elementos à superfície. Em termos gerais, processos como vulcanismo, hidrotermalismo e o fluxo de água subterrânea são os principais responsáveis na remobilização dos elementos, trazendo-os para regiões mais superficiais da crosta. Como esses processos não ocorrem de maneira homogênea ao redor da Terra, é comum que haja área em que os problemas de saúde ocorram devido à baixa concentração de um determinado elemento (deficiência) ou, caso contrário, por motivos de alta concentração, elevando o nível a níveis tóxicos para os seres vivos. Dos 91 elementos químicos naturais, 25 deles, ou seja, quase 27,5% do total, são essenciais para correto desenvolvimento das plantas, entre eles o Ca, Mg, Fe, Co, Cu, Zn, P, N, S, Se, I e Mo. Já outros, como o arsênio (As), cádmio (Cd), chumbo (Pb), mercúrio (Hg) e alumínio (Al) não possuem função biológica ou a possuem de forma limitada e são geralmente tóxicos para o homem (SELINUS, 2006).

Para citar problemas específicos ligados a determinados ambientes, é possível destacar o papel do: 1º) arsênio (As), que em níveis elevados causa problemas na pele, membranas mucosas, sistema nervoso, medula óssea, fígado e coração. Naturalmente presente em minerais formadores de rochas, incluindo os óxidos de ferro e as argilas, mas principalmente em sulfetos, como a pirita e arsenopirita, esse elemento químico tem como teor aceitável o limite de 10 mg/L (ppm); 2º) radônio (Rn), que é um elemento produzido pelo decaimento radioativo do rádio, o qual provém do decaimento do urânio, encontrado em baixas concentrações em rochas e solos. O radônio pode causar câncer no trato respiratório, especialmente nos pulmões. A geologia controla a distribuição de radônio, que pode ser encontrado em granitos, rochas fosfáticas e folhelhos enriquecidos com matéria orgânica. Além disso, por ser um gás, o Rn pode se locomover de forma dissolvida por meio das águas subterrâneas, viajando por longas distâncias; e 3º) flúor (F), que em concentrações elevadas causa a fluorose (Figura 4.16). Por isso, a recomendação é a ingestão diária de 1,5 a 4 mg/dia desse elemento. No entanto, em algumas comunidades que se abastecem de água subterrânea captada através de poços tubulares profundos, cuja rocha que hospeda o aquífero é rica em minerais que contenham o flúor, como por exemplo, a criolita ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) e também a flúor-apatita ( $\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$ ), sua concentração é muito maior.

Figura 4.16 | Imagem ilustrativa de uma arcada dentária saudável (à esquerda) e uma com fluorose (à direita)



Fonte: Silva, Figueiredo e Capitani (2006, p. 10).

Ainda há outros casos de doenças e enfermidades causadas pela ingestão de solo (geofagia), inalação de poeiras com partículas de sílica ou poeira vulcânica (pneumoconiose), inalação de fibras de crisolita e tremolita, minerais asbestiformes, que causam doenças como mesotelioma.

## Sem medo de errar

Voltando à nossa situação prática do *Diálogo aberto*, você, como professor de geografia de uma escola, está planejando uma atividade de campo para levar os alunos a um parque natural. Como a aula envolveria temas como geodiversidade, geoturismo, geoparques e qualidade de vida, você decidiu explorar alguns pontos importantes de debate com os alunos no parque: qual a relação de interdependência entre a biodiversidade e a geodiversidade? O que é geodiversidade e como ela pode ser utilizada para planejar o espaço que habitamos? Como um parque com exuberante exposição geológica pode trazer frutos socioeconômicos para a sociedade? Como a geologia pode auxiliar na nossa qualidade de vida?

Para responder à sua primeira indagação, você deve se lembrar que neste livro nós estudamos sobre a Teoria de Gaia, que postula que o planeta Terra funciona como um sistema vivo, que possui a capacidade de se autorregular, ou seja, de controlar as próprias condições naturais de forma a garantir a continuação da vida terrestre. Nessa teoria, a vida é a responsável por criar condições para sua própria existência. Assim, segundo um de seus autores, a superfície da Terra, que sempre fora considerada como meio ambiente da vida, é na verdade parte da vida. Esse pensamento ajudaria seus alunos a olharem com outros olhos a relação de interdependência dos seres vivos com a parte abiótica do meio ambiente, estabelecendo um novo contexto de análise da conexão entre as diferentes partes que compõem a esfera que vivemos.

Sobre seu segundo questionamento, vimos que a geodiversidade corresponde à variedade de elementos e processos geológicos que dão origem às paisagens, rochas, minerais, águas, solos, fósseis e outros depósitos superficiais que propiciam o desenvolvimento da vida na Terra, ou seja, a geodiversidade pode ser entendida como a porção abiótica de todo o sistema Terra. Além disso, como a geodiversidade representa todos os aspectos do meio físico (abiótico) do espaço que vivemos, é possível representar esses elementos integrantes na forma de mapas, expondo a relação socioeconômica e cultural que possuímos com o meio, exibindo áreas de onde retiramos recursos minerais, captamos águas superficiais e subterrâneas, solos que aproveitamos na agricultura, áreas protegidas, jazidas que possuem

petróleo e gás, entre outros, o que a torna uma ferramenta de auxílio no planejamento.

Respondendo à sua terceira questão, destacamos que os parques naturais, com exuberante exposição geológica podem solicitar à UNESCO o cancelamento do título de Geoparque, que é "um território de limites bem definidos com uma área suficientemente grande para servir de apoio ao desenvolvimento socioeconômico local, particularmente através do turismo". Com isso, o parque passa a integrar a Rede Global de Geoparques (RGG) da entidade, cuja gestão é enquadrada em conceitos holísticos de proteção, educação e desenvolvimento sustentável. Vale ressaltar, no entanto, que os aspectos geológicos e geomorfológicos do parque não são suficientes para receber o título de geoparque, como vimos no texto.

Por último, mais para efeitos de curiosidade, você pode explicar que a geologia pode auxiliar a medicina na busca por respostas ligadas à origem e causa das doenças por meio de estudos relacionados à concentração de determinados elementos químicos naturais que ocorrem nas rochas, minerais, águas e solo. Ao se estudar os elementos geoquímicos presentes em determinadas regiões que apresentam enfermidade, podemos analisar se a causa está relacionada à falta ou excesso de algum elemento químico que está causando problemas de saúde pública.

Após esclarecer todos esses pontos, certamente você estará apto para ministrar uma excelente visita a campo, abordando os assuntos relacionados à geodiversidade, geoturismo, geoparques e sobre como o conhecimento geológico pode influenciar na qualidade de vida das pessoas.

## Avançando na prática

### Geomedicina

#### Descrição da situação-problema

Para avançarmos um pouco mais no tema da saúde e bem-estar social, imagine que você, como professor de geografia de uma universidade regional respeitada, e que trabalha na área de

geografia da saúde, foi realizar uma palestra em um encontro regional de professores de geografia. O tema do encontro era “Geografia e sua relação com o bem-estar das pessoas”, e você foi convidado para dar uma das palestras das sessões técnicas do evento. Para isso, você decidiu escolher os problemas de saúde gerados devido à exposição do ser humano a contaminantes ambientais, sejam eles antropogênicos ou naturais.

Na sua palestra você explicou sobre os vários aspectos ligados ao tema, inclusive detalhando as doenças geradas e suas causas. Ao final, havia uma plateia bastante interessada no tema, já que o conteúdo não é comumente abordado nas aulas do ensino médio, apesar de extremamente importante. Naturalmente, surgiram algumas perguntas, dentre elas: como sabemos se determinado elemento químico está em concentração superior ou inferior em determinada área? Cite uma das causas de haver um elemento químico em concentração maior numa área e em outra não estar presente. Dê três exemplos de minerais ou rochas que podem conter elementos químicos prejudiciais ao ser humano.

Agora é com você! Levando em conta todo o conteúdo estudado até o presente momento, como você se portaria aos espectadores?

### **Resolução da situação-problema**

Com relação à primeira pergunta, você deve se lembrar e explicar para quem fez a pergunta, que para determinarmos se algum elemento químico está em concentração inferior ou superior em uma área, o que pode levantar suspeitas de contaminação, é preciso, primeiro, analisar o seu valor de *background*, ou seja, a concentração natural dele naquela área.

Uma das maneiras de fazer isso é analisar as rochas e minerais que ocorrem na região, pois, naturalmente, são esses materiais geológicos a fonte de todos os elementos químicos naturais presentes na superfície terrestre.

Sobre a segunda indagação, você deve novamente se lembrar que a causa da concentração natural de um elemento está ligada às rochas e minerais presentes numa região. Por isso, a litologia de determinada área é importante. Se você voltar algumas páginas, verá

que citamos o caso dos elementos níquel (Ni) e cromo (Cr), que são muito mais elevados em basaltos do que em granitos. No entanto, o inverso é aplicado ao chumbo (Pb), que ocorre em concentrações maiores no granito.

Finalizando, vimos que alguns minerais contêm alguns elementos químicos nocivos à saúde humana, podendo causar distúrbios bucais ou até mesmo doenças fatais. Citamos o caso do arsênio (As) que ocorre naturalmente nos minerais pirita e arsenopirita. Esses minerais são fonte de minério em muitos depósitos economicamente viáveis. Além disso, falamos sobre o radônio (Rn), que é produto do decaimento radioativo de algumas rochas, dentre elas, os granitos, rochas fosfáticas e folhelhos enriquecidos com matéria orgânica. O caso do flúor também foi abordado, sendo este um elemento abundante em rocha com presença de minerais crisolita ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) e a flúor-apatita ( $\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$ ).

### Faça valer a pena

**1.** Em 2005 o Geopark Araripe enviou sua solicitação à UNESCO para inclusão do parque à Rede Global de Geoparques (GGN, na sigla em inglês). Em setembro de 2016, durante a 2<sup>nd</sup> UNESCO *Conference on Geoparks*, o Geopark Araripe se tornou, oficialmente, o primeiro geoparque das Américas.

Sobre os geoparques, suas características e critérios exigidos pela UNESCO para sua inclusão são, assinale a alternativa verdadeira:

- a) De acordo com a legislação brasileira, o geoparque é uma unidade de conservação.
- b) Promover a conservação é o único propósito de um geoparque.
- c) A gestão de um geoparque está centrada em conceitos holísticos de proteção, educação e desenvolvimento sustentável.
- d) O principal e único atrativo de um geoparque é seu patrimônio geológico.

e) Gerar fonte de renda não é um dos enfoques do geoparque, já que os recursos financeiros provêm unicamente da UNESCO.

**2.** A Assembleia Geral das Nações Unidas declarou, em 2006, que o ano de 2008 seria comemorado como o Ano Internacional do Planeta Terra, celebração que durou, na verdade, três anos (de 2007 a 2009). Dentre os objetivos desse evento estava promover o aumento no interesse nas geociências como um todo, abrangendo todo o mundo. De fato, o que ocorreu foi uma intensificação na divulgação do patrimônio geológico dos países, em especial destacando suas respectivas geodiversidade.

Sobre o conceito de geodiversidade, suas características e ferramentas de divulgação, assinale a opção correta:

a) A geodiversidade corresponde aos elementos e processos geológicos que dão origem às paisagens, rochas, minerais, águas, solos, fósseis e outros depósitos superficiais que propiciam o desenvolvimento da vida na Terra.

b) A geodiversidade não está, de nenhuma forma, relacionada às atividades que os seres humanos desenvolvem sobre a Terra.

c) O único propósito da geodiversidade é estimular o turismo ecológico.

d) A geodiversidade não serve como instrumento de planejamento territorial e urbano, pois não está relacionada à temática urbana, somente natural.

e) Os mapas de geodiversidade somente expõe áreas onde o patrimônio geológico está bem preservado.

**3.** A geologia médica é uma disciplina emergente e extremamente importante. Do ponto de vista da qualidade de vida, é fundamental que entendamos a relação que existe entre o meio em que vivemos e nossa saúde. Por isso, esse tema tem ganhado cada vez mais adeptos e novas linhas de pesquisa.

Com relação à geologia médica, distribuição e concentração de elementos químicos naturais no meio ambiente, julgue as alternativas e assinale a correta:

- a) A geologia médica estuda como os fatores geológicos podem auxiliar na cura de doenças.
- b) O valor de *background* de um determinado elemento químico não importa quando analisamos possíveis fontes de contaminação.
- c) O tipo litológico pouco influencia na concentração natural de determinados elementos.
- d) O arsênio (As), cádmio (Cd), chumbo (Pb), mercúrio (Hg) e alumínio (Al) não possuem (ou quase não possuem) função biológica no nosso organismo e são pouco tolerados pelo nosso corpo.
- e) O CO<sub>2</sub> é o único gás natural que pode causar dano à nossa saúde.

# Referências

CPRM. **Mapa geodiversidade do Brasil**. Escala 1:2.500.000. Brasília: SGM-MME/CPRM, 2006. CD-ROM.

CRUZ, F. N. da; BORBA, G. L.; ABREU, L. R. D. de. **A hipótese Gaia**. 2. ed. Natal: UFRN, 2005. Disponível em: <<https://goo.gl/pcu6ra>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

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

HOSE, T. A. Selling the Story of Britain's Stone. **Environmental Interpretation**, v. 10, n. 2, p. 16-17, 1995.

LOVELOCK, J. E. **Gaia**: a new look at life on Earth. Oxford, Oxford University Press, 1979.

\_\_\_\_\_. **Gaia**: alerta final. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2010.

MARSHAK, S. **Earth portrait of a planet**. 3. ed. Nova Iorque: W. W. Norton & Cia, 2008.

EARTH OBSERVATORY. **The carbon cycle**. Disponível em: <<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/CarbonCycle/>>. Acesso em: 3 mar. 2017.

OS NÍVEIS DE CARBONO NA ATMOSFERA. Disponível em: <<https://goo.gl/MBhMG9>>. Acesso em: 30 mar. 2017.

PRESS, F. et al. **Para entender a Terra**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

SELINUS, O. Geologia médica. In: SILVA, C. R. da. **Geologia médica no Brasil**: efeitos dos materiais e fatores geológicos na saúde humana, animal e meio ambiente. Rio de Janeiro: CPRM, 2006. p. 1-5.

SCHOBENHAUS, C.; SILVA, C. R. da (Org.). **Geoparques do Brasil**: propostas. Rio de Janeiro: CPRM, 2012.

SILVA, C. R.; FIGUEIREDO, B. R.; CAPITANI, E. M. **Geologia Médica no Brasil**. SCHOBENHAUS, C.; SILVA, C. R. da (Org.). Geoparques do Brasil: propostas. Rio de Janeiro: CPRM, 2012. Brasil, 2006. p. 6-14.

UNESCO. 2010. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. **Guidelines and criteria for national geoparks seeking UNESCO's assistance to join the Global Geoparks Network (GGN)**. 12 p. Disponível em: <[http://www.unesco.org/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/pdf/sc\\_geoparcs\\_2010guidelines.pdf](http://www.unesco.org/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/pdf/sc_geoparcs_2010guidelines.pdf)>. Acesso em: 24 abr. 2017.

VIERO, A. C. et al. **Mapa geodiversidade do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CPRM, 2009. 1 mapa, escala 1:750.000. Programa levantamentos da geodiversidade. Disponível em: <[http://www.cprm.gov.br/publique/media/geodiversidade\\_rio\\_grande\\_sul.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/geodiversidade_rio_grande_sul.pdf)>. Acesso em: 13 mar. 2017.



ISBN 978-85-8482-888-3



9 788584 828883 >