

Geologia e paleontologia

Lucas Del Mouro

João Pedro Tauscheck Zielinski

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

João Pedro Tauscheck Zielinski

Lucas Del Mouro

Paulo Sergio Siberti da Silva

Editoração

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
D331g Geologia e paleontologia / Lucas Del Mouro, João Pedro
Tascheck Zielinski. – Londrina : Editora e Distribuidora
Educacional S.A., 2017.
200 p.

ISBN 978-85-8482-808-1

1. Geologia. 2. Paleontologia. I. Zielinski, João Pedro
Tascheck. II. Título.

CDD 550

2017

Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Avenida Paris, 675 – Parque Residencial João Piza

CEP: 86041-100 – Londrina – PR

e-mail: editora.educacional@kroton.com.br

Homepage: <http://www.kroton.com.br/>

Sumário

Unidade 1 Fundamentos de geologia	7
Seção 1.1 - Planeta Terra: origem, estrutura e propriedades	9
Seção 1.2 - Ciclo das rochas	22
Seção 1.3 - Rochas ígneas e metamórficas	37
 Unidade 2 Geologia aplicada	 55
Seção 2.1 - Rochas sedimentares e fundamentos de geologia estrutural	57
Seção 2.2 - Dinâmica externa da Terra	72
Seção 2.3 - Elementos do ciclo hidrológico e técnicas aplicadas	88
 Unidade 3 Fundamentos de paleontologia	 105
Seção 3.1 - Princípios de paleontologia	107
Seção 3.2 - Tempo geológico e evolução	121
Seção 3.3 - Paleoecologia	136
 Unidade 4 Paleontologia aplicada	 153
Seção 4.1 - Paleobiogeografia	155
Seção 4.2 - Prática paleontológica	169
Seção 4.3 - Principais fósseis do Brasil	184

Palavras do autor

Caro aluno!

Nesta disciplina, você aprenderá os aspectos básicos de geologia e paleontologia, duas ciências fundamentais e que irão ajudá-lo no dia a dia profissional, como você atuará com projetos que utilizam recursos naturais, ou que estão relacionados diretamente com o meio ambiente. É importante ter uma boa base teórica dessa disciplina para desenvolver suas atividades com qualidade.

Ao longo do livro didático, você viajará por conteúdos básicos, como a origem do Universo e Sistema Solar, fundamentais como o ciclo das rochas e técnicos como o método de coleta paleontológica. Esses conteúdos somados às webaulas e exercícios serão imprescindíveis para o desenvolvimento do seu pensamento crítico e sua capacidade investigativa, que culminarão ao fim da disciplina, com o domínio do conhecimento dos princípios básicos da geologia e paleontologia fundamentados dentro de uma visão evolutiva.

Para guiá-lo, nosso livro didático começa abordando os principais conceitos e teorias relacionados com a geologia básica, para então compreendemos de que forma ela é aplicada tanto no meio acadêmico quanto na prática profissional. Depois, aprenderemos sobre paleontologia básica e sua importância, com o objetivo de explicar como ela é aplicada para propósitos científicos e educacionais, mas também econômicos.

Assim, convidamos você, aluno, a mergulhar conosco nessa jornada que abordará assuntos tão interessantes quanto o mundo que nos rodeia. Desejamos bons estudos e uma ótima aprendizagem.

Fundamentos de geologia

Convite ao estudo

Aluno, bem-vindo à disciplina de *Geologia e paleontologia*! Nesta primeira unidade, você estudará os fundamentos de geologia. Ao final dela, será capaz de saber os fundamentos básicos relacionados ao tema e isto contribuirá para que ao final do curso você tenha o domínio dos princípios básicos da geologia e paleontologia fundamentados em uma visão evolutiva.

O objetivo desta unidade é que você conheça os materiais que compõem nosso planeta, e qual a força motriz que permite que o ciclo de geração de novos materiais se perpetue. Assim, começaremos a entender a importância da geologia em termos científicos e econômicos.

Para aumentar o aprendizado e facilitar a sua compreensão, imagine-se na seguinte situação: a empresa de consultoria ambiental, GeoConsulting Magma, acaba de contratar você como *trainee* para fazer parte de uma equipe multidisciplinar. No seu dia a dia, você perceberá que o meio físico exerce grande influência tanto na fase de planejamento quanto na fase de execução de projetos ambientais. Atualmente, a GeoConsulting Magma foi selecionada para produzir um relatório ambiental sobre uma cratera encontrada na cidade de Vargeão, meio-oeste do estado de Santa Catarina, e você ficou responsável pelo detalhamento geológico da área onde o projeto será desenvolvido. Uma de suas responsabilidades agora é redigir este relatório de diagnóstico geológico que será dividido em três partes: 1) Contextualização e fundamentação teórica da área; 2) Descrição das rochas e minerais encontrados e 3) Determinar o potencial econômico das rochas anteriormente descritas. No fim da unidade, ao unir as três partes, teremos produzido o diagnóstico geológico que será incluído no relatório solicitado à empresa. No entanto,

os seguintes questionamentos surgem: como essa cratera foi formada? Que tipos de minerais e rochas estão situadas na região? É possível determinar algum tipo de uso econômico para esses materiais?

Para responder a estes e outros questionamentos que serão apresentados aqui, nesta unidade, estudaremos desde a origem do universo e do sistema solar, passando pela estrutura e propriedades do planeta Terra, pelo ciclo das rochas e fundamentos da tectônica de placas, até os fundamentos básicos da geocronologia. Portanto, é fundamental que você leia o seu livro didático. Vamos aos estudos? Boa leitura!

Seção 1.1

Planeta Terra: origem, estrutura e propriedades

Diálogo aberto

Você pode até pensar que algumas perguntas expostas no Convite ao estudo não tenham sentido prático ou que simplesmente não importam para muitas pessoas já que não as utilizaremos no nosso dia a dia profissional. No entanto, para que todo o conhecimento geológico seja fundamentado, partiremos do início, contando como as rochas e os minerais – e a Terra como um todo – se formaram. Apesar de ser bastante teórico, conhecimento nunca é de menos e você verá que muitas perguntas de geologia se referem justamente sobre coisas simples, até triviais para quem conhece o assunto, mas que da mesma forma despertam enorme interesse.

Assim, retomando a situação supracitada, você, *trainee da Geo-Consulting Magma*, agora membro de uma equipe multidisciplinar, ficou responsável pelo detalhamento geológico do relatório ambiental solicitado pela prefeitura da cidade de Vargeão, meio-oeste do estado de Santa Catarina. Independente do objetivo de seu projeto naquela região, você precisa conhecer as características básicas do meio físico (geológico) local.

Imagine agora que, ao fazer sua pesquisa para contextualização e fundamentação da área, durante a etapa pré-campo, você identificou, através de mapas geológicos e bibliografia sobre a região, que nesta área há ocorrência de uma enorme cratera com cerca de 12 km de diâmetro, com feição circular em planta e formada por várias rochas. Sua origem, segundo sua pesquisa, está relacionada possivelmente a um impacto meteorítico, e nela é possível constatar a presença de rochas vulcânicas (diques, *sills* ou derrames basálticos) e granitos, mas também gnaisses e quartzito.

No entanto, já no escritório da empresa, fazendo sua pesquisa e se preparando para iniciar a elaboração da parte inicial do relatório, algumas dúvidas surgiram: mas o que é uma cratera? Como ela é formada? Como estudamos sua estrutura? Qual é sua importância?

Para começar a responder essas dúvidas, você aprenderá 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 o processo de formação da Terra e aprenderá como ela foi formada, estruturada e quais suas propriedades físicas e químicas. Esses conteúdos, com certeza, o ajudarão a deixar seu relatório com mais qualidade e bastante acurado.

Não pode faltar

Antes de começarmos a entender os materiais geológicos principais que possuímos em nosso planeta, é necessário que procuremos entender primeiramente como o Universo se formou e como, ao longo de bilhões de anos ele evoluiu e se diferenciou para dar origem aos planetas, entre eles, a Terra. Para completar, buscaremos entender como o processo evolutivo planetário foi responsável pela divisão em camadas, as quais refletem diferenças nas propriedades físicas e químicas da Terra.

Muitas pessoas até já ouviram falar sobre a Teoria do *Big Bang* ("Grande Explosão"), mas poucas se dão conta de sua importância para todo o conhecimento geológico que possuímos. Segundo seus proponentes, o universo teria surgido através de uma expansão cósmica que aconteceu, aproximadamente, entre 13 a 14 bilhões de anos atrás. Toda essa fundamentação surgiu através de observações astronômicas de que o universo atual está, em realidade, se expandindo tanto temporal quanto espacialmente. Ora, se hoje o vemos sob expansão, seria natural admitirmos que no começo tudo estivesse concentrado em um único ponto, isto é, a matéria estava comprimida pontualmente e sua densidade era considerada infinita.

Embora os astrônomos ainda debatam sobre a causa, o fato é que o universo se expandiu e se diluiu para formar centenas de bilhões de galáxias, cada qual com centenas de bilhões de estrelas. Todos estes corpos celestes sendo hierarquizados em diversos níveis.

Do ponto de vista geológico, é importante analisarmos, no entanto, a origem dos elementos químicos que posteriormente dariam origem aos materiais que hoje conhecemos (minerais e rochas). A matéria foi gerada num processo denominado nucleogênese, onde prótons, nêutrons, elétrons se uniram para formar os átomos dos

elementos mais leves. É dessa maneira, por exemplo, que H e He (os dois principais elementos da matéria) se formaram.

Esses gases (H e He) são os constituintes predominantes das nebulosas (Figura 1.1), que ao se rotacionarem lentamente acabaram se contraindo pela ação da gravidade que, por sua vez, contribuiu para o aumento da velocidade de rotação das partículas gerando uma nuvem em forma de disco. Com isso, a matéria começou a se concentrar no centro da nebulosa na forma de uma protoestrela, a precursora do Sol, que após algum tempo comprimiu-se pela força do próprio peso, tornando-se mais denso e quente.



Assimile

As nebulosas são consideradas nuvens interestelares compostas por gases e poeira que transcrevem uma trajetória rotacional, permitindo a colisão de partículas através da força de atração gravitacional.

Logo, com o aumento de temperatura para acima de milhões de graus, iniciou-se o processo de fusão nuclear – no qual ocorre a transformação de H para He –, em que parte da matéria é convertida em energia. No entanto, como surgiram os outros planetas se boa parte da matéria se concentrou na formação do Sol?

Figura 1.1 | Imagem da nebulosa Carina (situada a 7.500 anos-luz da Terra), capturada pelo telescópio Hubble (NASA)



Fonte: <http://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/science/hubble20th-img.html>. Acesso em: 22 jul. 2016.

Embora grande parte tenha se concentrado no proto-Sol, toda a matéria que envolvia a região mais densa acabou por resfriar-se e muitos gases se condensaram, isto é, eles mudaram para formas líquidas ou sólidas. Com o auxílio da atração gravitacional, essas partículas se agregaram para formar os planetesimais que, ao longo de bilhões de anos, se colidiram para formar corpos maiores até atingir um estágio final de evolução em que os corpos maiores foram atraindo os corpos menores para formar os planetas que conhecemos hoje.

A partir disso, fica claro que o posterior desenvolvimento dos planetas está fortemente relacionado com a distância em que eles se encontram em relação ao centro de maior massa, o Sol. Os quatro planetas interiores do nosso Sistema Solar, também chamados de terrestres ou rochosos, Mercúrio, Vênus, Terra e Marte são menores e constituídos de rochas e metais. Por estarem próximos ao Sol, durante os estágios iniciais de formação, boa parte dos compostos voláteis que anteriormente formavam parte desses planetas acabou sendo evaporada e não pôde ficar retida. Dessa maneira, a radiação proveniente do Sol expulsou a maior parte do H, He, H₂O e outros gases e líquidos que haviam nesses planetas.

Esses materiais voláteis expelidos pela radiação foram direcionados para a parte mais externa e fria da nebulosa, possibilitando a formação dos planetas exteriores, que são constituídos de gelo e gases. Os planetas exteriores ou gasosos, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno (e todos os seus satélites) fazem partes desses planetas gigantes, que possuem forte atração gravitacional. Foi essa força gravitacional a responsável pela absorção dos compostos mais leves provenientes da nebulosa. Com isso, apesar de serem constituídos por um núcleo rochoso, sua estrutura é formada fundamentalmente, além dos compostos leves, por H e He.

Contudo, a partir de uma imensa massa rochosa única, como o planeta Terra acabou por se tornar um planeta dividido em camadas? A resposta para essa pergunta reside no fato de que o planeta Terra sofreu um processo chamado de diferenciação. Para entender esse processo, retornemos aos primórdios da formação terrestre. Assim como a maioria dos planetas internos, a Terra sofreu intensos impactos de planetesimais e corpos celestes maiores. Esses impactos podem ser observados na Terra pelas crateras, depressões circula-

res, formadas após a queda, os famosos astroblemas, que possuem grande importância econômica (jazidas de minérios) e no entendimento da evolução da vida (precisamente da morte, pois normalmente estão associadas a extinções em massa).



Exemplificando

O Domo de Vargeão é um exemplo de astroblema, que possui aproximadamente 12 km de diâmetro. Sua origem está associada a um impacto meteorítico que atingiu a região há 60 milhões de anos.

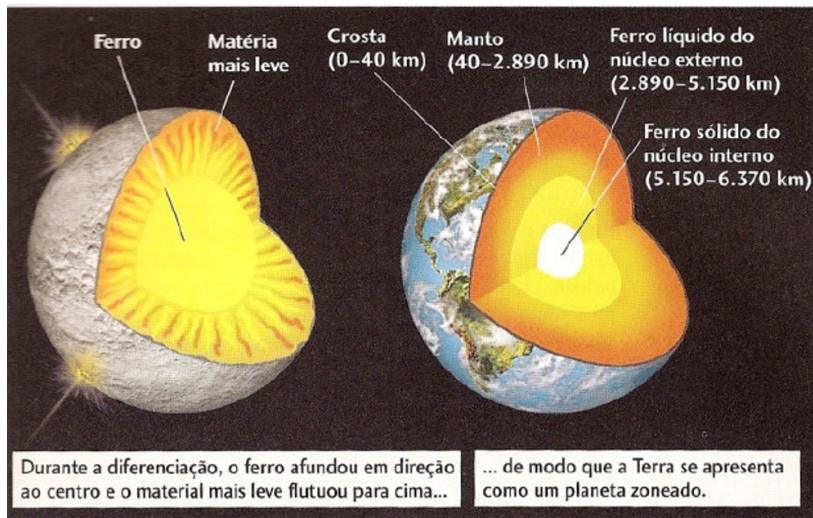
Os objetos que colidiam com a Terra transportavam energia cinética (relacionada ao movimento) e, ao se chocarem, convertiam essa energia em forma de calor, isso favorecia a fusão dos materiais rochosos. Além disso, outro processo de fusão teria sido fundamental para a diferenciação: a radioatividade. Como alguns elementos da Terra primordial eram radioativos (e.g. urânio), ou seja, se desintegram espontaneamente com a emissão de partículas subatômicas. Essas partículas, ao serem absorvidas pela matéria, transformam-se em calor, auxiliando a fusão dos materiais da Terra primitiva. Embora sua abundância relativa seja pequena, os cientistas ainda acreditam que boa parte do calor interno da Terra é mantido pela fusão proveniente da energia de radioatividade.

Portanto, a Terra primitiva passou a diferenciar-se ao longo do tempo através da fusão, e uma consequência natural foi que, à medida que os materiais mais densos foram se acumulando no centro do planeta e os mais leves se concentraram na porção mais superficial, as camadas começaram a surgir. Como o material trazido à superfície carregava o calor interno da Terra para uma região mais fria, esse material quente acabava por se solidificar, formando uma camada mais rígida, que hoje conhecemos como crosta. Com isso, três camadas surgiram: o núcleo, parte interna formada por Fe e Ni; o manto, camada formada por material rochoso viscoso; e a crosta, camada rígida externa formada pelo material rochoso solidificado (Figura 1.2).

Segundo os cientistas, o Fe correspondia a $\frac{1}{3}$ do material primitivo, e, com outros metais pesados, como o Ni, afundou até o centro para formar o núcleo interno. O núcleo divide-se em dois: 1) o núcleo interno, que é sólido e se estende de uma profundidade de

5.200 km até 6.400 km; 2) núcleo externo, formado por um material líquido fundido que se estende de 2.900 km até 5.200 km. A razão de o núcleo interno ser sólido é que nessa profundidade a pressão é tão grande que o Fe não consegue se fundir.

Figura 1.2 | Processo de diferenciação das camadas terrestres



Fonte: Press et al. (2006).

Acima do núcleo está a região volumetricamente mais importante: o manto. Essa região, que se estende de aproximadamente 40 km até 2.900 km é formada por rocha fundida e é constituída em sua maioria por oxigênio, magnésio, ferro e silício. Esses quatro elementos formam cerca de 90% da Terra.



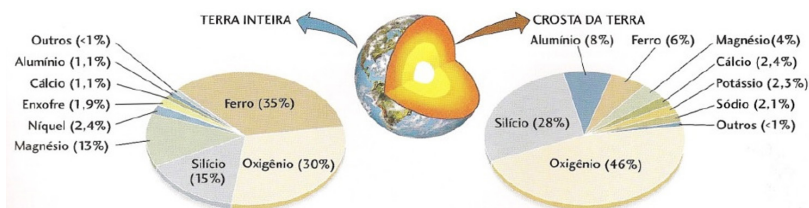
Refleta

Se 90% dos materiais da Terra são formados por oxigênio, magnésio, ferro e silício, como possuímos tantos minerais? Você acha que encontrar uma jazida de um bem mineral valiosíssimo (por exemplo, ouro) é fácil?

A parte mais superficial da Terra representa uma fina cama, de cerca de 40 km de espessura em média, sendo constituída por materiais leves com temperaturas de fusão baixas. A maioria dos materiais é composta por silício, alumínio, ferro, cálcio, magnésio, sódio e potássio combinados com oxigênio. Comumente, dividimos

a crosta em duas: 1) Crosta continental, formada por rochas ricas em silício e alumínio (SiAl), como o granito ou até mesmo rochas sedimentares, como arenitos e argilitos; e 2) Crosta oceânica, formada por rochas ricas em silício e magnésio (SiMa), como basaltos, diabásio e gabro. De fato, a crosta terrestre é uma camada singular. Se analisarmos toda a Terra, perceberemos que o Fe (o mais abundante) está presente em 35%, enquanto que na crosta ele representa apenas 6%. A mesma análise pode ser feita com o Mg, O e Si. Enquanto que na Terra todos eles representam 13%, 30% e 15%, respectivamente, na crosta esses elementos simbolizam 4%, 46% e 28%, respectivamente (Figura 1.3).

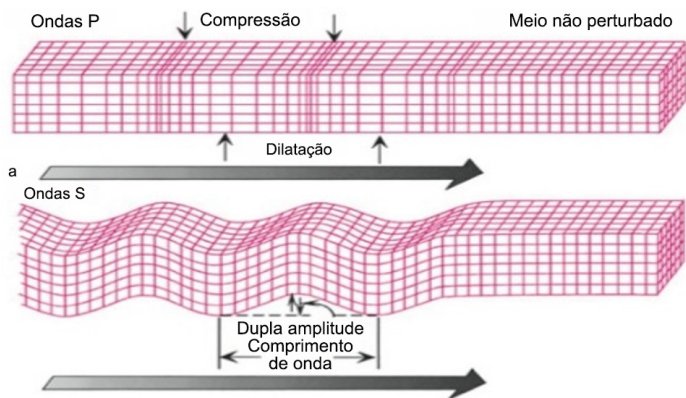
Figura 1.3 | Abundância relativa dos elementos químicos na Terra sólida e na crosta em porcentagem de peso



Fonte: Press et al. (2006).

No entanto, como sabemos as divisões da Terra e a que profundidade elas se encontram? A resposta está nas ondas sísmicas produzidas tanto pelos terremotos quanto por equipamentos feitos pelo homem (sismógrafos). Essas ondas viajam a velocidades distintas, dependendo do material que elas atravessam. Por isso, nos fornecem informações sobre a composição química e o comportamento físico dos materiais geológicos. Indo direto ao ponto, temos basicamente dois tipos de ondas sísmicas: A) ondas P, também chamadas de ondas compressivas, deslocam-se através de uma série de compressões e dilatações paralelas à direção de propagação das ondas; e B) ondas S, também conhecidas como ondas cisalhantes, descrevem um deslocamento de partículas perpendicularmente à direção de propagação da onda (Figura 1.4).

Figura 1.4 | Direção de propagação das ondas sísmicas P e S, mostrando as diferentes dinâmicas de deslocamento das partículas à medida que a onda atravessa o meio geológico



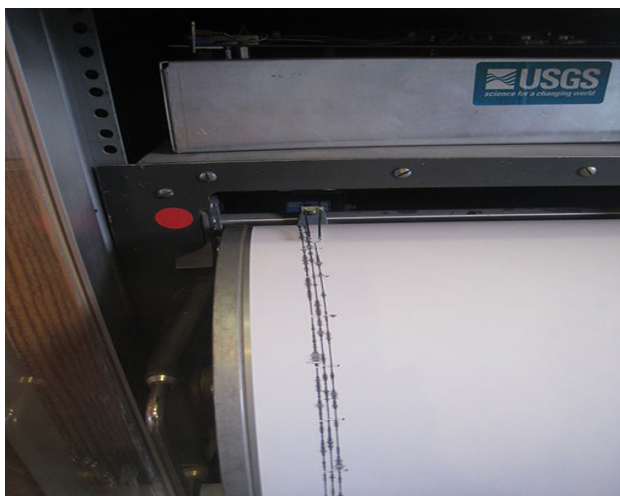
Fonte: Pomerol et al. (2013).



Exemplificando

Os sismógrafos foram os principais aliados dos geólogos e geofísicos no estudo da estrutura interna da Terra, fornecendo informações valiosas que até hoje são utilizadas tanto no meio acadêmico quanto industrial.

Figura 1.5| Sismógrafo: equipamento utilizado em estudos geológicos



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9f/USGS_Seismograph_Point_Reyes.JPG>. Acesso em: 20 jul. 2016.

Como comprimir sólidos é mais difícil que cisalhá-los (deformá-los), as ondas P viajam mais rapidamente que as ondas S. Outra propriedade importante é que as ondas S possuem velocidade nula quando atravessam gases e líquidos, pois esses materiais não oferecem resistência ao cisalhamento. De fato, as ondas S não se propagam através de qualquer fluido, e, portanto, fornecem informações valiosíssimas para os geólogos.

Partindo desses princípios sobre a física das ondas, os geólogos e geofísicos conseguiram separar as camadas da Terra (e também regiões na crosta terrestre, como os astroblemas) através das descontinuidades, propondo um modelo baseado na sismologia. Por exemplo, a primeira descontinuidade da Terra, que separa a crosta do manto, foi descoberta pelo sismólogo iugoslavo Andrija Mohorovicic, em 1909. Segundo ele, acerca de 50 km de profundidade há uma brusca variação nas propriedades elásticas do material terrestre, reflexo da densidade dos materiais geológicos. Desde então, passamos a nos referir à transição crosta-manto como a descontinuidade de Moho. Hoje em dia, no entanto, essa descontinuidade não é fixa, mas variável. Na crosta continental, ela varia entre 30-80 km de profundidade e na crosta oceânica entre 5-10 km.

Na interface manto-núcleo, encontra-se a chamada descontinuidade de Gutenberg, que se situa a 2.900 km de profundidade e foi descoberta porque as ondas S não se propagavam, sugerindo que o material fosse líquido. Em 1936, a sismóloga dinamarquesa Inga Lehman descobriu que, além das ondas S não viajarem na parte externa, as ondas P transitavam a uma velocidade superior na parte interna do núcleo, o que a levou a sugerir uma divisão também para o núcleo terrestre.



Pesquise mais

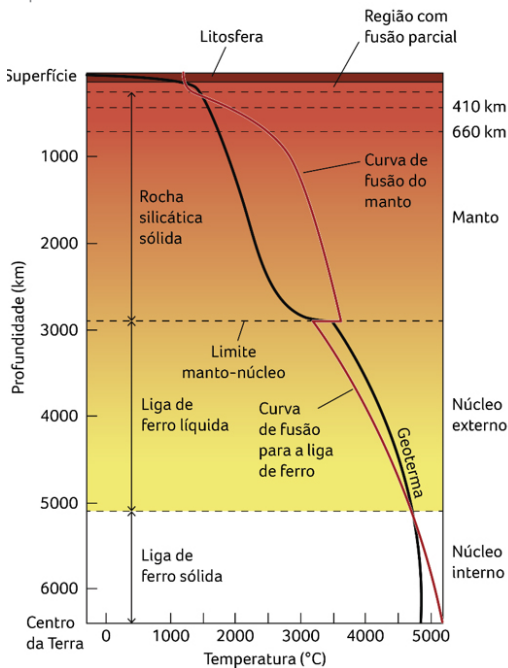
Para se aprofundar mais nos tópicos sobre estrutura e composição da Terra, e instrumentos utilizados para conhecê-la, sugere-se a leitura do Capítulo 12 de Pomerol et al. (2013).

POMEROL, C. et al. **Princípios de geologia**: técnicas, modelos e teorias. 14. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1052 p.

Além dessas descobertas, o fato das rochas possuírem diferentes temperaturas de acordo com seu posicionamento em profundidade

também chamou a atenção dos cientistas. De forma mais significativa, é justamente o calor interno da Terra a força motriz de toda a dinâmica interna do planeta, conforme será visto na teoria da Tectônica de Placas. A curva que descreve o aumento de temperatura com a profundidade é denominada de geoterma (Figura 1.6). A taxa com que ocorre o aumento de temperatura, ou seja, o gradiente geotérmico terrestre é de aproximadamente 30 °C por km. Isso significa que, a cada quilômetro que avançamos em direção ao centro da Terra, a temperatura aumenta 30 °C.

Figura 1.6 | Figura demonstrativa da geoterma, indicando a mudança de temperatura com a profundidade



Fonte: Press et al. (2006).

Além das mudanças de densidade nas rochas e também de temperatura, há uma outra propriedade fundamental: o magnetismo. Segundo as teorias atuais, a convecção que ocorre no núcleo externo da Terra é a responsável por manter o campo magnético, devido ao fato de que o Fe do núcleo é um bom condutor elétrico. É essa corrente elétrica que induz a criação de um campo magnético, de acordo com o modelo do geodínamo.

Retomando o pensamento lançado no início desta seção: você, *trainee*, identificou, através de mapas geológicos e bibliografia sobre a região de Vargeão, em que há ocorrência de uma enorme cratera com cerca de 12 km de diâmetro, com feição circular em planta e formada por várias rochas. Sua responsabilidade agora é redigir a primeira parte do relatório de diagnóstico geológico para a sua empresa. E para alcançar o objetivo desta primeira parte, que era a contextualização e fundamentação da região, as seguintes questões precisam ser respondidas: O que é uma cratera? Como é formada? Como estudamos sua estrutura? Qual é sua importância?

Esses dados são fundamentais para a resolução da primeira parte do diagnóstico. Inicie então esta etapa!

É importante que você informe na primeira parte do seu diagnóstico geológico local que uma cratera, também chamada de astroblema, é uma depressão de formato circular, cujo processo de formação está relacionado à colisão de um corpo celeste na superfície da Terra sob alta velocidade, causando um impacto local de forte pressão sobre as rochas.

Com relação ao estudo de sua estrutura, você deve destacar que é possível estudar as camadas geológicas das crateras através da utilização das ondas P e S, do mesmo modo que os geólogos fizeram para descobrir as camadas internas da Terra.

Finalmente, respondendo ao último questionamento, lembre que os astroblemas se destacam por sua importância científica, que atualmente auxiliam no entendimento de grandes extinções biológicas pelo tempo geológico, mas também apresentam elevada importância econômica, pois podem constituir áreas potencialmente ricas em minérios, matéria-prima básica fundamental para o desenvolvimento dos países.

Avançando na prática

Lançamos um novo desafio: aplique os conhecimentos adquiridos em novas situações, dessa maneira você estará transferindo o que efetivamente aprendeu para novas situações profissionais.

Embaixador do conhecimento geológico

Descrição da situação-problema

Imagine agora que você foi convidado pela professora de uma escola municipal, para fazer uma apresentação para alunos do Ensino Fundamental e Médio sobre o planeta Terra, sua origem, propriedades e estrutura interna. Essa foi uma forma encontrada pela direção do colégio de chamar a atenção de mais pessoas sobre aspectos relacionados à geologia básica. Durante a apresentação na sala de aula, um aluno levantou o braço e fez os seguintes questionamentos: “Professor, eu não entendi ao certo como ocorreu o processo de diferenciação das camadas terrestres. Como este processo ocorreu? Quantas camadas são? Quais são elas? Qual é a constituição de cada uma destas camadas?”

Então, aluno, como você sanaria as dúvidas deste estudante?

Resolução da situação-problema

Como vimos, o processo de diferenciação se iniciou quando planetesimais e corpos celestes maiores colidiram com a Terra. Ao colidir, a energia do movimento (cinética) é transformada em calor, causando a fusão dos materiais. Além disso, alguns minerais e rochas radioativas emitem partículas subatômicas que, ao serem absorvidas pela matéria, transformam-se em calor, auxiliando a fusão. Conforme ocorria essa fusão, os materiais foram se separando e os mais densos acabaram por se concentrar nas regiões mais profundas, enquanto que os mais leves se acumularam nas porções mais superficiais.

Esse processo resultou na formação de três camadas: o núcleo, onde se acumularam os materiais mais densos, formados principalmente por Fe e Ni; o manto, composto por rocha fundida em estado viscoso, sendo constituído em sua maioria por oxigênio, magnésio, ferro e silício; e a crosta, formada por rocha sólida, em que os compostos majoritários são o silício, o alumínio, o ferro, o

cálcio, o magnésio, o sódio e o potássio, que aparecem combinados com o oxigênio.

Faça valer a pena!

- 1.** Segundo a Teoria do Big Bang, o universo teria surgido a partir de uma expansão cósmica de um ponto quente e denso em algum momento de tempo finito, entre 13 a 14 bilhões de anos atrás. Durante esse evento ocorreu a nucleogênese, que é a formação da matéria através de prótons, nêutrons e elétrons.

Sobre a matéria, pode-se afirmar que os seus principais elementos químicos formados são:

- a) Hélio e lítio.
- b) Hidrogênio e lítio.
- c) Lítio e oxigênio.
- d) Hidrogênio e hélio.
- e) Hidrogênio e oxigênio.

- 2.** A Terra primitiva passou a diferenciar-se ao longo do tempo através da fusão e, uma consequência natural foi que, à medida que os materiais mais densos foram se acumulando no centro do planeta e os mais leves se concentraram na porção mais superficial, as camadas começaram a surgir.

Sobre essas camadas oriundas do processo de diferenciação, pode-se afirmar:

- a) A crosta é a camada interna rica em Fe e Ni.
- b) O manto é constituído de material rochoso solidificado.
- c) O núcleo é a camada interna rica em O e H.
- d) O manto é constituído de material rochoso viscoso.
- e) A crosta é a camada externa rígida formada por material viscoso.

- 3.** O Ferro, metal de transição, elemento químico de número atômico 26 e com massa atômica de 56 u, encontra-se no estado sólido em temperatura ambiente. Segundo os cientistas, o ferro corresponde a 1/3 de todo material constituinte da Terra.

Sobre o ferro, elemento químico do quarto período da tabela periódica, é possível afirmar que:

- a) Com o oxigênio constituem o núcleo interno do Planeta Terra.
- b) Com o oxigênio constituem o núcleo interno do Planeta terra, que possui profundidade de 5.200 km até 6.400 km.
- c) Associado ao Ni, constituem o núcleo interno do Planeta Terra.
- d) É encontrado apenas na crosta.
- e) Associado ao H, formam o núcleo interno da Terra.

Seção 1.2

Ciclo das rochas

Diálogo aberto

Prezado aluno! Seja bem-vindo à segunda seção dessa unidade, denominada “Ciclo das rochas”. Ao chegar aqui, você já passou pelos fundamentos teóricos básicos que permearam a formação do nosso universo, dos planetas, até os aspectos físicos, químicos e estruturais da Terra. Nesta seção, abordaremos os conceitos e as definições de minerais e rochas, bem como os fundamentos básicos da tectônica de placas. Ainda realizaremos a Parte dois do relatório ambiental com foco geológico, no entanto, antes de iniciarmos, vamos relembrar a nossa situação, apresentada no início desta unidade:

Você, *trainee da GeoConsulting Magma*, é responsável pelo detalhamento geológico do relatório ambiental solicitado pela prefeitura da cidade de Vargeão, meio-oeste do estado de Santa Catarina. Na primeira parte do relatório, você, ao pesquisar informações a respeito da área de trabalho, observou que lá existe a presença de uma cratera de impacto, um astroblema, que caiu há 60 milhões de anos. Com essas informações, você relatou que os astroblemas se destacam não só por sua importância nos estudos de extinções em massa, mas também pela possibilidade de jazidas de minérios, essas que impulsionam a economia e o desenvolvimento dos países.

Imagine agora que após a contextualização e a fundamentação da área pré-campo, você se deslocou até a cidade de Vargeão para observar as rochas aflorantes, e constatou realmente a presença de rochas vulcânicas (diques, *sills* ou derrames basálticos) e granitos, mas também gnaisses e quartzito, conforme visto na bibliografia da área. Não esqueça que, neste momento, você deverá, necessariamente, responder às seguintes perguntas: quais minerais temos nessas rochas? Quais rochas ígneas temos? Quais rochas metamórficas também foram encontradas e quais suas características? Como rochas tão distintas ocorrem lado a lado? Lembre-se de que esses dados são importantes para a resolução da Parte dois do relatório ambiental, além de ser potencialmente o dado mais impactante.

Para responder a estes e outros questionamentos, estudaremos o que são os minerais, e quais os tipos mais importantes, veremos também os tipos de rochas, dando ênfase nas ígneas e metamórficas e abordaremos alguns conceitos sobre a tectônica de placas que certamente o ajudarão. Logo, é fundamental que você leia o seu livro didático. Vamos aos estudos? Boa leitura!

Não pode faltar

Os principais materiais geológicos que possuímos são os minerais e as rochas. Ambos possuem uma importância científica e econômica, já que muitos possuem aplicações tecnológicas importantíssimas (por exemplo: o lítio, principal constituinte das baterias de *smartphones*, *tablets* e *notebooks*, é encontrado fundamentalmente em depósitos de sal). No entanto, antes de avançarmos, é necessário entender o que é um mineral. De forma sucinta, um mineral é qualquer substância que ocorre naturalmente de forma sólida, cristalina, geralmente inorgânica, e que possui uma composição química específica. Apesar de parecer simples, há algumas palavras-chave importantes nessa definição. Para que seja considerado mineral, é necessário que ocorra naturalmente, isso significa que precisamos encontrá-lo na natureza e, por isso, exemplos sintéticos (produzidos em laboratório) não podem ser considerados minerais.



Exemplificando

O lítio, encontrado em grandes quantidades na Argentina, Chile e Bolívia, já está sendo apelidado de “petróleo branco”, devido seu papel fundamental para o avanço da tecnologia de ponta.

BBC BRASIL. **Febre do lítio:** avanço global do ‘petróleo branco’ é estratégica para América Latina. 2016. Disponível em: <http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2016/04/160422_litio_bolivia_if>. Acesso em: 06 abr. 2017. Acesso em: 12 fev. 2017.

Tem que ser um sólido cristalino, isso significa que qualquer líquido ou gás já está automaticamente excluído. Para complicar, é preciso que tenha uma estrutura cristalina, isso quer dizer que os átomos dos elementos químicos precisam estar arranjados em uma configuração tridimensional ordenada e repetitiva. Logo,

qualquer sólido que não possua essa estruturação, não pode ser considerado um mineral (e.g. o vidro é amorfo, ou seja, não tem forma e, portanto, não é um mineral). Além disso, os minerais são normalmente formado por processos inorgânicos. Muito embora alguns organismos secretem alguns minerais, esses apesar da origem biológica, são composicionalmente inorgânicos, isto é, não possuem carbono orgânico. Finalmente, dizer que os minerais possuem uma composição química específica, significa que os elementos químicos estão organizados dentro de determinadas proporções que, apesar de serem variáveis, respeitam certos limites definidos (e.g. a proporção de átomos de silício e oxigênio, dentro do mineral quartzo, é sempre 1:2).

Embora existam minerais muito simples, formados por ligações atômicas de um único elemento químico, como é o caso do diamante (que envolve somente o carbono), a maioria dos minerais é resultado da combinação de vários elementos químicos. A origem desses minerais está ligada a diferentes condicionantes de ordem físico-química que acontecem, majoritariamente, em profundidade, dentro da crosta ou até mesmo em zonas mais profundas. O processo de cristalização pode originar a partir de uma solução de material em estado de fusão ou vapor que, ao atingir uma temperatura de solidificação, transforma-se em fase sólida (cristal).



Assimile

Cristalização é um processo químico no qual um gás ou líquido é transformado em sólido através do agrupamento de átomos para formar um arranjo cristalino.

De forma a sistematizar todo o reino mineral, usualmente classificamos os minerais de acordo com suas características similares. A divisão mais utilizada é aquela que agrupa os minerais de acordo com o radical aniônico, devido à maior afinidade entre si. O Quadro 1.1 traz as seis principais classes, as quais são representativas dos principais chamados minerais formadores de rochas.

Quadro 1.1 | Principais classes de minerais, segundo o radical aniônico

Classe	Ânions definidores	Exemplo
Elementos nativos	Nenhum: sem íons carregados	Cobre metálico (Cu)
Óxidos e hidróxidos	Íon oxigênio (O^{2-})	Hematita (Fe_2O_3)
	Íon hidroxila (OH^-)	Brucita ($Mg(OH)_2$)
Haletos	Cloreto (Cl^-), fluoreto (F^-), brometo (Br^-), iodeto (I^-)	Halita ($NaCl$)
Carbonatos	Íon carbonato (CO_3^{2-})	Calcita ($CaCO_3$)
Sulfatos	Íon sulfato (SO_4^{2-})	Anidrita ($CaSO_4$)
Silicatos	Íon silicato (SiO_4^{4-})	Olivina (Mg_2SiO_4)

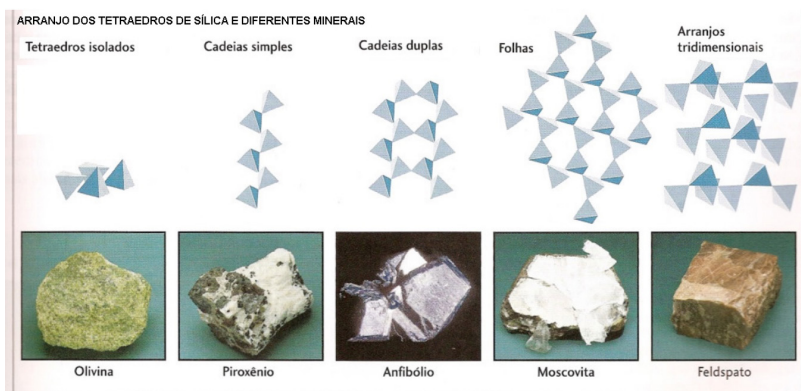
Fonte: adaptado de Press et al. (2006).

Dentre esses, os principais, sem sombra de dúvidas, são os silicatos. Os minerais desse grupo possuem como constituinte básico o tetraedro de sílica, composto por um íon de silício (Si^{4+}) que rodeado por quatro íons de oxigênio (O^{2-}), configurando o ânion SiO_4^{4-} . Como possui carga negativa, comumente se junta a cátions, dentre eles: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} etc. A forma com que cada tetraedro de sílica se junta a outro tetraedro de sílica e os elementos químicos que a eles se ligam, determinará a origem de diferentes minerais. As diversas variedades de sílica e os minerais silicatados representam 95% dos constituintes da crosta terrestre, ou seja, cerca de 600 espécies minerais (POMEROL et al., 2013). Entretanto, como identificamos os minerais no campo ou em laboratório de maneira que consigamos separá-los?

Para isso, lançamos mão de algumas propriedades físicas que são diagnósticas de determinados minerais. A **dureza** é a facilidade com que riscamos a superfície de um mineral e, para avaliá-la tomamos como base a escala de Mohs. Segundo essa escala, o talco é o mineral mais mole e o diamante o mineral mais duro. Entre eles, há oito minerais distintos e alguns objetos comuns (unha, moeda, lâmina de faca, vidro, estilete de aço) que utilizamos para executar o teste e comparar. A **clivagem** é a tendência que um mineral apresenta de partir-se segundo superfícies planares (PRESS et al. 2006). Essa propriedade está relacionada à força das ligações químicas entre os átomos de diferentes elementos: quanto mais fracas são as liga-

ções, mais perfeita é a clivagem. O número de planos de clivagem e o padrão são os principais parâmetros utilizados para diferenciar os minerais.

Figura 1.7 | Diferentes arranjos do tetraedro de sílica e exemplos de minerais de acordo com sua estrutura



Fonte: adaptada de Press et al. (2006).

Contrariamente à clivagem, a **fratura** é a característica que o mineral possui de quebrar-se irregularmente ao invés de planos definidos, e está relacionado ao modo como as forças de ligação distribuem-se em direções transversais aos planos cristalinos (PRESS et al., 2006). O **brilho** é o modo como o mineral reflete a luz incidente, e depende da composição e pelas ligações químicas. Normalmente, comparamos o brilho com algum material que possui característica similar (metal, vidro, resina, óleo, pérola, seda etc.).

A **cor** está relacionada à absorção seletiva da luz, e é influenciada pela interação dos diferentes comprimentos de ondas luminosas que atravessam o mineral. Tanto a estrutura quanto às impurezas presentes no mineral determinam sua cor. Além de sua cor natural, costuma-se utilizar a **cor do traço** do mineral para diagnosticá-lo. Para isso, risca-se o mineral sobre uma superfície abrasiva e analisa-se a cor deixada na superfície do material. A **densidade** também é um fator levado em consideração. Ela é influenciada pelo peso atômico dos íons e densidade do empacotamento da estrutura cris-

talina. Normalmente, avaliamos qualitativamente a densidade, já que haja determinação precisa é necessário balança especial.

Finalmente, o último fator que costumeiramente avaliamos é o **hábito cristalino**, que pode ser entendido como a forma geométrica externa do mineral. As faces mais retas, melhor formadas, normalmente indicam a estrutura cristalina interna do mineral. Classificamos o hábito conforme sua aparência geométrica, isto é, se o cristal se assemelha a um prisma, placa, lâmina, fibras, agulhas, entre outros.

Até agora, mostramos o que são e como definimos os minerais, mas e as rochas? As rochas são, na verdade, um aglomerado natural de minerais de diversos tipos. Analogamente, podemos considerar que os minerais são os tijolos e as rochas a casa. Embora algumas rochas sejam compostas de apenas um mineral, a maioria das rochas é constituída de vários minerais ou até mesmo de material orgânico (por exemplo, carvão).

No campo, geralmente observamos três aspectos principais das rochas: sua mineralogia, sua estrutura e sua textura. A mineralogia nos dá informações sobre a composição química, a estrutura sobre características gerais sobre processo de formação e a sua textura nos dá informações detalhadas sobre seu processo de formação e modificação (como o metamorfismo), e até mesmo informações ambientais pretéritas.

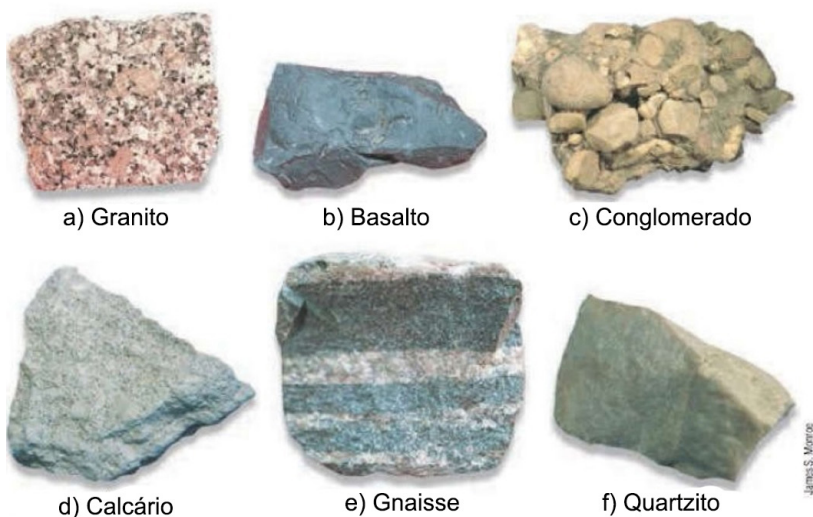
Considerando toda a diversidade de rochas que possuímos, podemos agrupá-las em três grandes grupos de acordo com sua gênese, isto é, seu modo de formação. O primeiro grande grupo são as **rochas ígneas**, também chamadas de magmáticas, pois se formam por meio do resfriamento do magma. Quando esse resfriamento 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 influenciará, neste caso, a textura das rochas. Aquelas que se formam em profundidade, resfriam-se lentamente e a consequên-

cia 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 (Figura 1.8a e 1.8b).

As diferenças não param por aí. A mineralogia também é distinta: as rochas ígneas mais escuras (por exemplo, basalto) são ricas em minerais **máficos** (contêm muito magnésio e ferro – como piroxênio e olivina), enquanto que as mais claras (por exemplo, granito) são ricas em minerais **félsicos**, isto é, que possuem feldspato e sílica (mais precisamente silício e alumínio, se considerarmos os elementos químicos), como o quartzo. Nada impede, entretanto, que haja minerais máficos e félsicos coexistindo em uma mesma rocha. De fato, o basalto possui piroxênio e anfibólio (máficos), mas também apresenta plagioclásio (félsico).

Essa variabilidade está ligada, principalmente, à composição química do magma que deu origem à rocha, sendo o teor em sílica o parâmetro mais importante. Por exemplo, o magma ácido, com mais de 65% de sílica, é rico em sílica e contém consideráveis porcentagens de sódio, potássio e alumínio, mas pouco cálcio, ferro e magnésio. O magma básico, ao contrário, com 45%-52% de sílica, é pobre em sílica, mas contém, proporcionalmente, mais cálcio, ferro e magnésio. Como seu nome indica, o magma intermediário possui uma composição entre os limites dos magmas ácido e básico (WICANDER; MONROE, 2009).

Figura 1.8 | 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) e f) rocha metamórfica



Fonte: adaptada de Wicander e Monroe (2009).

O segundo grande grupo são as **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 das rochas, mas são altas o suficiente para estimular reações químicas e recristalização mineral. O gnaiss (Figura 1.8e) e o quartzito (Figura 1.8f) podem originar-se, respectivamente, do granito e do arenito rico em quartzo.

Basicamente, o metamorfismo pode ser regional, que ocorre em extensas áreas, como em zonas de colisão de placas tectônicas e cinturões de montanhas, em que altas pressões e temperaturas causam a transformação da rocha. Contrariamente, o metamorfismo pode ser de contato, mais local, em que as temperaturas são altas mas restringem-se a uma pequena área e a pressão não exerce um papel tão significativo. O gnaiss e o quartzito, por exemplo, são re-

presentativos do metamorfismo de contato. Além disso, cabe destacar o metamorfismo de impacto, que é quando meteoritos colidem com a Terra, produzindo deformações localizadas ou até mesmo a fusão parcial das rochas. Um exemplo desse tipo de metamorfismo é o próprio Domo de Vargeão/SC.

As rochas sedimentares, 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 1.8c) é um exemplo da primeira, enquanto que o calcário (Figura 1.8d) da segunda. Para que os sedimentos sejam transformados em rochas, é necessário ao menos dois fenômenos que fazem parte da litificação. Primeiro, deve haver compactação para que os grãos formam um arcabouço mais coeso. Segundo, para que os sedimentos se unam, é preciso haver cimentação.

Como se pode perceber, há diferentes processos envolvidos nesses três grupos de rochas, de forma que encontrá-las na natureza não é mero acaso. A tectônica de placas (Teoria da Deriva Continental, desenvolvida por Alfred Wegener, no início do século XX) é a força motriz de todos os processos geológicos da Terra. Segundo essa teoria, há 12 placas rígidas (que fazem parte da litosfera) que se movimentam sobre a astenosfera, que possui um comportamento mais moldável (dúctil). O calor que provém do interior da Terra ascende através de convecção, deslocando material rochoso fundido, que provoca o deslocamento dessas placas.

Esse fenômeno governa o movimento em diferentes direções. Quando duas placas se movimentam uma em direção a outra, elas convergem e colidem uma contra a outra. Quando duas placas se movem em direções opostas, elas divergem, permitindo que o material rochoso fundido extravase para a superfície. Finalmente, quando as placas se deslocam paralelamente uma em relação à outra, elas deslizam e há uma fricção entre elas. Esses movimentos relativos dão origem, respectivamente, aos limites de placas convergentes, divergentes e transformantes.

Os limites divergentes são responsáveis pela formação de vales, riftes, bacias sedimentares e dorsais oceânicas, onde há intensa atividade vulcânica e terremotos. As rochas vulcânicas, como os basaltos, têm sua origem relacionada principalmente a esse processo. Os limites convergentes formam as montanhas, as cordilheiras, as ilhas oceânicas, as fossas, onde também há muita atividade magmática e terremotos. No entanto, as rochas mais características desses ambientes são as rochas plutônicas (como os granitos) e as rochas metamórficas (como os gnaisses, os xistos e os quartzitos). Os limites transformantes, por sua vez, não extravasam nem consomem material geológico, mas o deforma. Nesse processo, qualquer tipo de rocha pode sofrer fraturas e, em alguns casos, a depender da temperatura envolvida, metamorfizá-las.



Refleta

Se os basaltos se formam principalmente em regiões divergentes e os granitos normalmente em zonas convergentes, como é possível, em alguns casos, encontrá-los lado a lado, como se tivessem tido o mesmo processo de formação?

Apesar disso, todas as rochas guardam uma relação entre o clima e a tectônica, que governam o ciclo das rochas. Quando placas litosféricas subductam em direção à astenosfera, as rochas fundem-se e, por contraste de densidade, ascendem em direção à crosta rasa e a superfície, formando cadeias de montanhas (formadas por granitos, por exemplo) e ilhas vulcânicas (basaltos). À medida que o soerguimento aumenta, essas feições geológicas se comportam como uma barreira geográfica, impedindo o avanço das nuvens que ali se instalam. Com isso, com o ar carregado de umidade, gotículas de água se condensam e precipitam. A água precipitada, aliada a outros condicionantes climáticos (temperatura, vento etc.) intemperiza e causa a erosão das rochas, mobilizando os sedimentos que são transportados pelos rios até os oceanos.

À medida que mais sedimentos são carregados ao leito marinho, maior o peso da camada de sedimentos que, em conjunto com a água, são litificados para formar as rochas sedimentares (por exemplo, arenito ou argilito). O soterramento desses sedimentos, acompanhado pela subsidência, causa o afundamento da crosta. Toda essa gama de

rochas será, posteriormente, mobilizada em direção a margens convergentes ou até mesmo sofrer algum impacto de um corpo celeste (comum no passado remoto da Terra). Ao colidir com outras rochas, sob pressões e temperaturas extremas, as rochas transformam-se, isto é, são metamorfolizadas, como nos processos de orogénia.

No entanto, caso o peso das cadeias de montanhas e sucessões de rochas sejam muito elevadas, as rochas afundam-se em direção a profundidades elevadas e voltam a fundir-se, processo que também ocorre nas zonas de subducção, conforme mostrado acima. Dessa maneira, fecha-se o ciclo das rochas (Figura 1.9), processo perpétuo que ocorre há bilhões de anos.

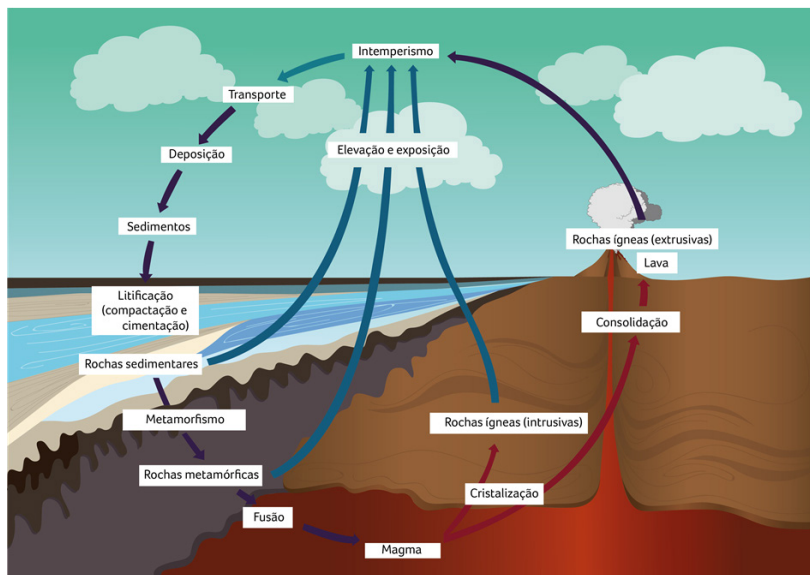


Faça você mesmo

Pegue um mineral que você encontrou em algum lugar e descreva-o. Consulte um livro específico (por exemplo: Wicander e Monroe, 2009) e baseie-se nele para descrever.

WICANDER, R.; MONROE, J. S. **Fundamentos de geologia**. São Paulo: Cengage Learning, 2009. 528 p.

Figura 1.9 | Ciclo das rochas



Fonte: adaptada de Wicander e Monroe (2009).

Retomando a situação apresentada no início desta seção, você como *trainee* da GeoConsulting Magma já realizou toda a fundamentação e contextualização do Domo de Vargeão, conforme os conceitos aprendidos na seção anterior. Detalhou que a cratera foi formada pelo impacto de um corpo celeste que atingiu a região há 60 milhões de anos. Sabe também como distinguir entre as crateras de impacto e as crateras vulcânicas, e qual a importância dessa feição.

Agora, você se deslocou até a cidade de Vargeão para observar as rochas aflorantes, e constatou realmente a presença de rochas vulcânicas (diques, *sills* ou derrames basálticos) e granitos, mas também gnaisses e quartzitos. Nessa segunda etapa do seu relatório ambiental, você deve responder: quais minerais temos nessas rochas? Quais rochas ígneas temos? Quais rochas metamórficas também foram encontradas e quais suas características? Como rochas tão distintas ocorrem lado a lado?

Para responder a esses questionamentos, você terá que descrever os minerais utilizando as seguintes propriedades diagnósticas: dureza, clivagem, fratura, brilho, cor, cor do traço, densidade e o hábito cristalino. Além disso, observe as rochas que você encontrou e veja quais minerais comumente ocorrem nessas rochas, isso facilitará seu trabalho. Como vimos, os basaltos são formados por piroxênio, olivinas e plagioclásio; já os granitos são constituídos, fundamentalmente, por feldspato, quartzo e biotita.

Sobre as rochas ígneas, lembre-se de que temos as rochas ígneas plutônicas, aquelas que possuem minerais maiores, e as vulcânicas, que possuem cristais menores, devido à diferente taxa de resfriamento do magma. É importante detalhar no relatório que elas podem ser claras ou escuras. Caso possuam cor escura, são ricas em minerais máficos (como piroxênio e olivina, presente nos basaltos) ou se são claros, em minerais félsicos, como o feldspato e quartzo, presente nos granitos.

Vimos que as rochas metamórficas (gnaisse e quartzito), por sua vez, são diferentes e são resultado da transformação de outras rochas preexistentes. O gnaisse, por exemplo, é normalmente fruto

da modificação dos mineralógicos do granito, por isso, os minerais serão semelhantes. Já o quartzito é o representante metamórfico do arenito quartzoso (rico em quartzo) e, por isso, sua mineralogia é bastante semelhante, como se pode imaginar.

Sobre a ocorrência próxima de rochas tão distintas, você poderá explicar no seu relatório, pelos conceitos da tectônica de placas, que no passado geológico os ambientes geológicos eram distintos, pois, como foi apresentado anteriormente, granitos e gnaisses são mais propícios a serem encontrados em limites convergentes, como em regiões onde há formação de cadeias de montanhas ou serras. Já os basaltos, que são típicos de zonas divergentes, foram formados quando houve uma mudança no regime de movimentação das placas, e por essa razão encontram-se, agora, lado a lado de rochas formadas em zonas convergentes. A mesma explicação também é válida para as rochas sedimentares, como os arenitos e os conglomerados, que são encontrados em bacias sedimentares, isto é, principalmente em limites divergentes. Correlacionando toda essa explicação, você consegue aplicar a tectônica de placas para analisar a variabilidade de rochas e minerais numa mesma região, mostrando que o ciclo das rochas é, realmente, um conceito dinâmico e aplicado.

Avançando na prática

Sondando minerais e rochas

Descrição da situação-problema

A GeoConsulting Magma está envolvida em um outro projeto no setor da construção civil, em que implementará uma ponte entre a localidade de Ribeirão A e Arroio B. Nessa etapa, os técnicos estão perfurando poços para investigar o subsolo, mas ninguém que tenha conhecimento de geologia está envolvido no projeto. No entanto, o gerente de projetos ficou sabendo que você possui conhecimento na área e pode auxiliá-los urgentemente.

A maior dificuldade do momento é diferenciar quais rochas eles estão perfurando e qual sua composição. Para tentar solucionar esse problema rapidamente, você foi chamado para explicar ao técnico de perfuração a quais características básicas sobre as proprie-

dades físicas dos minerais ele deve ficar atento. Quais mudanças texturais podem ocorrer caso haja dificuldade para diferenciar as rochas ígneas plutônicas das vulcânicas? Qual é a diferença entre uma rocha ígnea ou metamórfica e uma rocha sedimentar, e como fazer para distingui-las?

Resolução da situação-problema

Como você aprendeu, para diferenciar as rochas, primeiro temos que analisar os seus minerais; afinal, as rochas nada mais são do que um agregado natural de minerais. Portanto, explique para o técnico que a dureza, a clivagem, a fratura, o brilho, a cor, a cor do traço, a densidade e o hábito cristalino são propriedades diagnósticas básicas que devem ser analisadas para diferenciar os minerais e, com isso, até inferir qual rocha está sendo perfurada.

Com relação às mudanças texturais, para diferenciar as rochas plutônicas das vulcânicas, peça que ele olhe, fundamentalmente, para o tamanho dos cristais. Como você estudou, o tamanho dos cristais poderá ajudar a definir onde a rocha foi formada e, com isso, diferenciar entre os tipos de rochas.

Se o problema for diferenciar rochas ígneas e metamórficas de rochas sedimentares, lembre-se de que essas últimas são constituídas por fragmentos de outras rochas que foram intemperizadas, erodidas, transportadas e depositadas em bacias sedimentares. Logo, elas passaram por processos diferentes (compactação e cimentação), o que as tornam fáceis de distinguir de rochas que sofreram cristalização (ígneas) ou recristalização (metamórficas). Explique que as rochas sedimentares eram, antes de se unirem, como uma areia na praia ou uma lama no fundo do rio. Dessa maneira, o técnico visualmente, notará a diferença e não terá mais problemas em diferenciar as rochas perfuradas.

- 1.** 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 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:
 - 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.
- 2.** As rochas ígneas, também conhecidas como magmáticas, são um dos grandes grupos de rochas do planeta Terra. Elas são formadas a partir do resfriamento do magma e suas características finais podem se influenciar tanto pelo local de resfriamento quanto pela composição química do magma ascendente. Sobre as rochas ígneas extrusivas ou vulcânicas, é correto afirmar que:
 - a) São resfriadas no interior da crosta terrestre, e um exemplo é o granito.
 - b) São resfriadas no interior da crosta terrestre, e um exemplo é o basalto.
 - c) São resfriadas na superfície terrestre, e um exemplo é o granito.
 - d) São resfriadas na superfície terrestre, e um exemplo é o gnaiss.
 - e) São resfriadas na superfície terrestre, e um exemplo é o basalto.
- 3.** Durante séculos, os movimentos da litosfera terrestre intrigaram os cientistas e os curiosos. Contudo, somente em 1960, a partir do advento da Teoria da Tectônica de Placas por Alfred Wegener, esses grandes movimentos cinéticos foram explicados. Sabendo que a teoria da tectônica de placas revolucionou as ciências da Terra, é correto afirmar que:
 - a) Segundo a teoria de tectônica de placas, existem 12 placas litosféricas rígidas.
 - b) Segundo a teoria de tectônica de placas, existem 9 placas litosféricas rígidas.
 - c) Segundo a teoria de tectônica de placas, existem 12 placas litosféricas dúcteis.
 - d) Segundo a teoria de tectônica de placas, existem 9 placas litosféricas dúcteis.
 - e) Segundo a teoria de tectônica de placas, existem 2 placas litosféricas rígidas.

Seção 1.3

Rochas ígneas e metamórficas

Diálogo aberto

Prezado aluno! Seja bem-vindo à terceira e última seção dessa unidade, denominada “Rochas ígneas e metamórficas”. Para chegar até aqui, você já passou pelos fundamentos teóricos básicos que permearam a formação do nosso universo, dos planetas, até os aspectos físicos, químicos e estruturais da Terra, o que serviu de base para você aprender mais sobre a geologia. Além disso, você também estudou, na seção anterior, conceitos e definições de minerais e rochas bem como os fundamentos básicos da tectônica de placas, o que o auxiliou na resolução da segunda parte do relatório de diagnóstico ambiental. Nessa seção, realizaremos a terceira parte deste estudo, mas antes de iniciarmos, não custa nada voltar à nossa situação, não é mesmo?

Você, *trainee* da GeoConsulting Magma, é responsável pelo detalhamento geológico do relatório ambiental solicitado pela prefeitura da cidade de Vargeão, meio-oeste do estado de Santa Catarina. Seguindo com o relatório, na Parte 2, você descreveu os minerais e as rochas presentes na área, e destacou especificamente quais as rochas ígneas e metamórficas foram localizadas na região e ainda explicou como dois grupos de rochas tão distintas ocorrem lado a lado. Agora está na hora de finalizar o relatório indicando quais as possíveis utilizações que as rochas vulcânicas – diques, *sills* ou derrames basálticos – e granitos, bem como os gnaisses e quartzitos possuem, ou seja, você identificará o potencial econômico de cada uma dessas rochas. Para que você consiga, finalmente, definir isso, precisará responder às seguintes perguntas: quais rochas podem ser utilizadas para construção civil? Quais rochas encontradas podem ser utilizadas como rochas ornamentais? Quais rochas podem ser utilizadas na agricultura?

Para ajudar você a responder a essas dúvidas, estudaremos as rochas ígneas plutônicas e vulcânicas (seus tipos, formas de ocorrência, características e utilidades), as rochas metamórficas (formas de metamorfismo, tipos de rochas, características específicas e utilização

econômica) e, por fim, estudaremos os fundamentos de datação absoluta de eventos geológicos (geocronologia). Esses conteúdos lhe auxiliarão a definir a potencialidade econômica das rochas da região e, com isso, também concluiremos o estudo sobre os conceitos básicos que norteiam a geologia e sua aplicação no âmbito profissional.

Não pode faltar

Conforme abordamos anteriormente, as rochas ígneas dividem-se em plutônicas (ou intrusivas) e vulcânicas (ou extrusivas). Também vimos que diferenciamos uma da outra pela textura, levando em conta principalmente o tamanho dos cristais, e pela composição mineralógica. Resta-nos, agora, detalhar essa diferença para que o assunto fique ainda mais claro. Tudo começa, antes de mais nada, pela composição química do magma. Simplificadamente, temos dois tipos distintos de magmas: o magma granítico, com teor de sílica maior que 66% e o magma basáltico, com teor de sílica entre 45 a 52%. Ambos se formam a partir da fusão de rochas antigas que, após atingirem certo grau de pressão e temperatura, transformam-se em um líquido viscoso. A cristalização desse líquido viscoso acontece na superfície ou em profundidade, seguindo uma sequência ordenada segundo a série de reação de Bowen (Figura 1.10).

Figura 1.10 | Série de Bowen, que demonstra a ordem de cristalização dos minerais dos magmas segundo a variação de temperatura

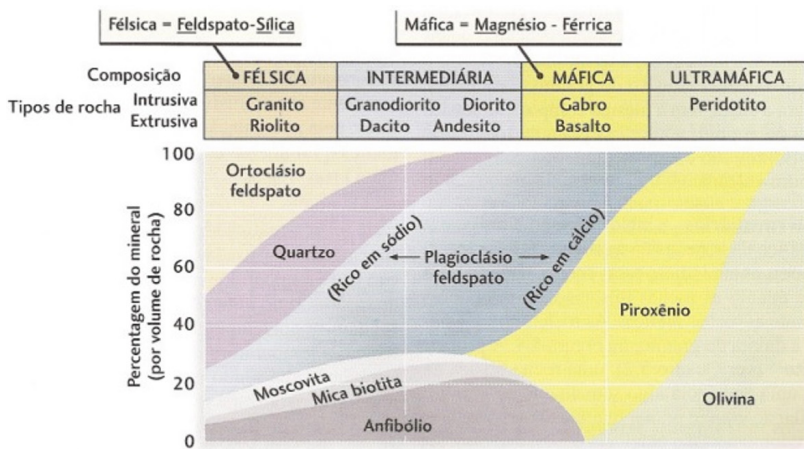


Fonte: adaptada de Teixeira et al. (2003).

Como pode ser observado, os magmas basálticos são ricos em olivina, ortopiroxênios, clinopiroxênios, anfibólios e plagioclásios que, inclusive, são os primeiros a serem cristalizados. Já os magmas graníticos são ricos em feldspato potássico, moscovita e quartzo, os últimos a se cristalizarem. Em termos mineralógicos, portanto, granitos e basaltos variam sua composição dentro de algumas faixas mais ou menos contínuas, como demonstra a Figura 1.11. Aliado a isso, temos a diferença textural, que relacionamos com a posição de colocação dos corpos magmáticos na crosta.

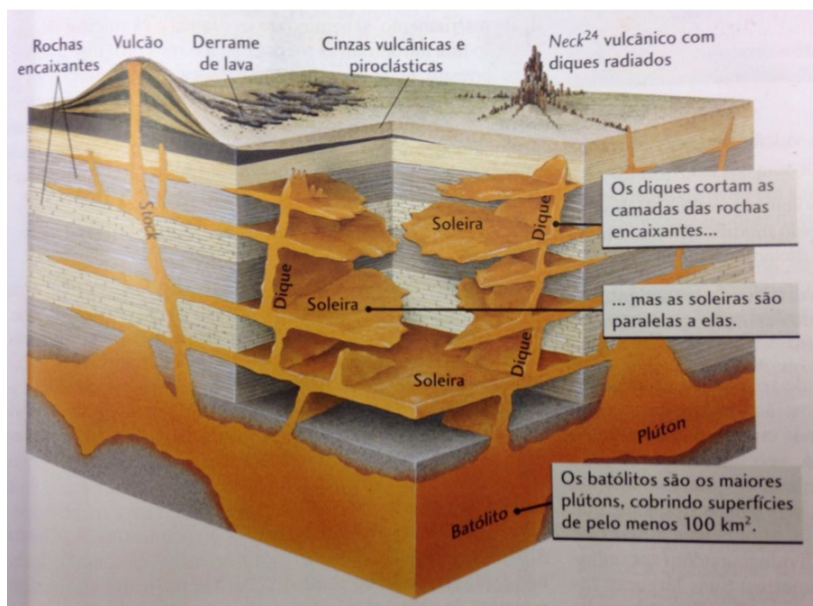
De maneira geral, diferenciamos algumas formas (feições): a) plutons, são grandes massas rochosas formadas em profundidade, mas que eventualmente podem ser expostos na superfície devido ao soerguimento e erosão; b) batólitos, são os maiores corpos plutônicos que cobrem áreas de, pelo menos, 100 km²; c) soleiras (*sill*, em inglês), são corpos tabulares formado pela injeção magmática de forma paralela às camadas preexistentes (e portanto, são concordantes); d) diques, também são corpos ígneos tabulares, mas que cortam perpendicularmente (ou obliquamente) as camadas de rochas preexistentes; e e) derrames, são corpos vulcânicos formados pela corrida de lavas sobre a superfície terrestre e possuem formato tabular (podendo ser irregular). Todas essas formas são ilustradas na Figura 1.12.

Figura 1.11 | Composição mineralógica das rochas de acordo com o magma parental e tipo de rocha ígnea (intrusiva ou extrusiva)



Fonte: adaptada de Press et al. (2006).

Figura 1.12 | Forma de ocorrência de corpos ígneos intrusivos e extrusivos



Fonte: adaptada de Press et al. (2006).

Cada corpo ígneo acima apresenta, também, características texturais particulares ou até mesmo algumas rochas e minerais específicos, determinando sua utilidade econômica e tamanho de jazida mineral. Os plutões e os batólitos, por exemplo, constituem-se corpos ígneos plutônicos volumétricos e, por se formarem em subsuperfície, apresentarão minerais bem formados (euédricos), formando uma trama de diferentes minerais que aparecem de forma bastante visível. Com isso, apresentam características estéticas que as permitem serem utilizadas como rochas ornamentais. Muitas vezes, algum evento geológico causa na rocha algum tipo de modificação textural ou mineralógica (por exemplo, alteração mineral causada pela injeção de um fluido hidrotermal), ou até mesmo na cor, deixando-a “atraente” aos olhos humanos. Além disso, caso essas rochas e minerais não apresentem fraturas ou até mesmo falhas geológicas, e, consequentemente, não exibam planos de fraqueza, também é possível empregá-las como rochas de revestimento e na construção civil. Granito, granodiorito, gabro são exemplos de rochas plutônicas que ocorrem em batólitos e são utilizadas economicamente.



Assimile

Minerais euédricos são aqueles que apresentam faces cristalinas nítidas que são facilmente reconhecíveis. Sua formação está associada ao tempo de formação (lento) e ao espaço disponível para cristalização (amplo).

As soleiras e os diques são formas intrusivas singulares. Quando a intrusão é profunda, o material resfriará mais lentamente e, portanto, formará um corpo ígneo com granularidade grossa, ao passo que quando a intrusão é rasa, a cristalinidade da rocha será fina, seguindo a mesma lógica do tempo de resfriamento. Diques de pegmatitos, por exemplo, de composição granítica ocorrem em profundidade e, muitas vezes, carregam minerais raros, ricos em elementos químicos de alto valor econômico (lítio, nióbio, tântalo, urânio e terras raras). Já diques e soleiras de diabásio e riolito ocorrem próximos à superfície e exibem textura fina, mas são muito coesas, sendo utilizadas, em alguns casos, como brita (após passar pelo beneficiamento) para a pavimentação de estradas e material base para construção de rodovias.



Pesquise mais

Para aprender um pouco mais sobre as rochas ígneas e extrair informações adicionais sobre o tema, sugere-se a leitura do Capítulo 10 de Popp (2010). Este livro encontra-se na biblioteca virtual.

POPP, José Henrique. **Geologia geral**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. p. 309.

O vulcanismo, por sua vez, se manifesta de diferentes formas, intensidade e extensão. As lavas são os produtos vulcânicos mais conhecidos, podendo ser de três tipos, conforme sua composição química: I) lavas basálticas – possuem baixo teor de sílica e sua temperatura fica em torno de 1.000 a 1.200 °C, por esses motivos é extremamente fluida. São distinguidos alguns subtipos, entre eles o estilo pahoehoe, aa e almofadada; II) lavas riolíticas – possuem alto teor em sílica e sua temperatura situa-se entre 800 e 1.000 °C e, por isso, movimenta-se mais lentamente; e III) lavas andesíticas – possuem teor de sílica e temperatura intermediárias aos dois subtipos citados anteriormente. Essas lavas, empilhadas

sucessivamente, darão origem às camadas de derrames basálticos. As rochas da formação Serra Geral, presentes em boa parte do oeste do RS, SC e PR, são um exemplo disso.

Os depósitos piroclásticos, como o próprio nome indica, são produtos formados após a erupção violenta dos vulcões, sendo constituídos por bombas, blocos, cinzas e gases. Além disso, existem as fumarolas, os gêiseres, as fontes térmicas e as plumas hidrotermais submarinas que também representam fenômenos vulcânicos.

Com relação ao posicionamento relativo às placas litosféricas e aos tipos de seus produtos, podemos distinguir dois estilos eruptivos. O primeiro deles é o vulcanismo fissural, que não possui um cone vulcânico, pois o material magmático ascende através de fissuras profundas que atravessam a crosta, servindo de conduto para o magma que é, geralmente, basáltico. Esse vulcanismo, quando se manifesta no continente, forma platôs, que ocasionalmente possuem vesículas (pequenas cavidades formadas pelo escape dos gases) no topo da sequência de derrames. Essas cavidades, eventualmente, são preenchidas por minerais, como zeólita, ametista ou ágata. O segundo tipo eruptivo é o vulcanismo central, que é constituído por um edifício vulcânico que pode possuir diversas morfologias (estrato-vulcão, escudo, domo etc.). O material é transportado por um conduto central sendo posteriormente expelido para a superfície terrestre.



Reflita

Se as rochas da formação Serra Geral, que no oeste de SC, RS e PR dão origem ao solo fértil denominado "Terra Roxa", são formadas por rochas vulcânicas, como nunca ninguém descobriu um vulcão nesses estados?

As rochas e os minerais, associados aos derrames, possuem, portanto, textura fina (por vezes até fina demais, sendo considerado vítrea) e ocorrem em grandes extensões. Quanto mais episódios repetitivos de derrames vulcânicos ocorrerem, maior é a espessura do pacote de rochas, o que pode ser benéfico se pensarmos em termos econômicos. Isso porque os basaltos, os riolitos, os dacitos e as rochas similares, são muito utilizadas na construção civil. A utilização como pedra britada é a mais comum, pois o emprego é feito de maneira quase imediata na construção de estradas, calça-

das, revestimento como pedra decorativa, entre outros. Além disso, o basalto vem sendo utilizado na agricultura como remineralizador, visando corrigir a carência de nutrientes em solos inférteis ou degradados. Essa técnica, denominada rochagem, está ganhando cada vez mais adeptos por ser um método de reposição natural (sem aditivos químicos, e, portanto, orgânica) dos elementos químicos que estão em abundância na rocha e deficitários no solo.



Exemplificando

O pó de basalto é utilizado para reposição de macro e micronutrientes, corrige a acidez do solo e diminui a necessidade do uso excessivo de fertilizantes químicos, minimizando o risco de contaminação dos aquíferos.

EKOSOLOs (Brasil). O pó de basalto: a rochagem. 2017. Disponível em: <<http://ekosolos.com.br/o-po-de-basalto/>>. Acesso em: 6 fev. 2017.

Se pensarmos dessa maneira, passamos a considerar o basalto como um bem mineral, com potencialidade econômica considerável. Logo, quanto maior a espessura do derrame, maior a possibilidade de termos uma jazida rentável.

Avançando na teoria, passaremos a analisar as rochas metamórficas. Em geologia, referimo-nos às rochas metamórficas como rochas que, através de reações que acontecem no estado sólido, transformam-se em outra rocha, a qual possui características distintas daquelas que apresentavam antes da atuação do metamorfismo (TEIXEIRA et al. 2003). Essas transformações referem-se, principalmente, a modificações na estrutura, textura e composição mineralógica do protólito (a rocha-mãe). Para que elas ocorram, há alguns fatores condicionantes: 1) Temperatura – acima de 200 °C os minerais das rochas começam a sofrer reações químicas, criando novos arranjos e assembleias; 2) Pressão – auxilia no processo de transformação da textura e mineralogia. Distinguem-se dois tipos de pressão, a dirigida quando há uma força exercida numa direção particular dominante (por exemplo, causada pela força de compressão resultante da ação da tectônica), e a confinante, que pode ser entendida como sendo semelhante à pressão hidrostática (chamamos em geologia de pressão litostática), a qual é aplicada em todas as direções; e 3) Fluidos – resultado do metamorfismo, os fluidos

transportam, além de CO_2 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.

Para que essas mudanças sejam processadas, há algumas situações geológicas específicas que determinam o tipo de metamorfismo. O metamorfismo regional acontece quando alta temperatura e pressão são impostas a grandes partes da crosta (áreas extensas), como na formação dos Andes e Himalaia. Nessas regiões, as rochas são conduzidas a profundidades significativas (na ordem de 10 km ou mais). Conseguimos, muitas vezes, vê-las na superfície por causa de subsequente soerguimento e erosão da superfície terrestre, o que causa a exumação de grandes pacotes rochosos. O metamorfismo de contato desenvolve-se ao redor de intrusões magmáticas, as quais formam auréolas na qual a temperatura é tão elevada que causa a transformação dos minerais. A extensão do metamorfismo é normalmente ditada pelo volume, temperatura e natureza do magma que intrude, e o tipo da rocha encaixante e sua posição crustal (profundidade dentro da crosta).

Outro tipo de metamorfismo, de especial interesse nesse momento, é o metamorfismo de impacto. Nesse caso, desenvolve-se em regiões que sofreram o impacto de meteoritos. Quando atinge a Terra, a energia é transformada em calor e ondas de choque. A rocha encaixante pode ser fragmentada e até mesmo parcialmente fundida para produzir *tektitos*, os quais se parecem com gotículas de vidro. Em alguns casos, o quartzo é transformado em coesita e *stishovita*, duas de suas formas de alta pressão (PRESS et al. 2006).

Para diagnosticar o metamorfismo, no entanto, é necessário analisar alguns aspectos. Primeiramente, é possível analisar as mudanças através da textura da rocha. A variação do tamanho, forma e arranjo de seus cristais ajuda a identificar o processo. A feição mais notável é a foliação, que pode ser definida como planos produzidos pela deformação. Essa característica da rocha forma-se principalmente devido à presença de minerais placoides (micas, por exemplo), que se alinham paralelamente à foliação exibindo uma orientação preferencial. Esse alinhamento ocorre na direção perpendicular à direção de maior pressão (esforço) que causou a deformação. Outros minerais não placoides, mas que possuem um eixo maior de

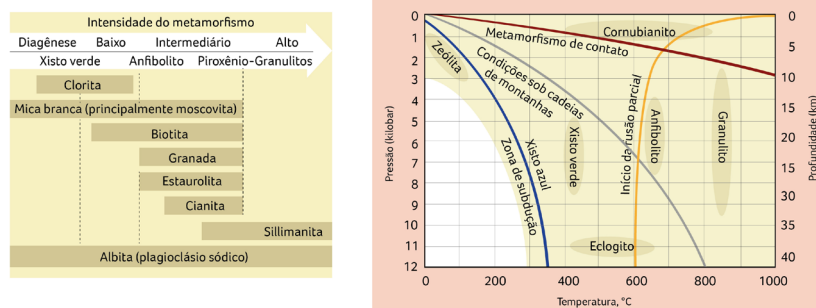
comprimento também se reorientam conforme o esforço aplicado. As ardósias, os xistos, os filitos e as gnaisses exibem esse tipo de feição característica e são consideradas rochas foliadas que representam uma ordem progressiva de metamorfismo. Um folhelho, rocha sedimentar, pode se transformar em ardósia e, posteriormente, devido à pressão e à temperatura, originar o xisto, depois o filito e finalmente um gnaisse (denominamos nesse caso paragneisse, pois é proveniente de uma rocha sedimentar).

O gnaisse é uma rocha de cor geralmente clara, com bandas de minerais claros (quartzo e feldspato) e escuros (anfibólio e outros minerais máficos) que se alternam. Devido à alta pressão e temperatura na qual se formaram, os minerais são mais grossos que na ardósia e possuem mais minerais granulares do que placoides, o que resulta no desenvolvimento de uma foliação fraca.

Contrariamente às rochas foliadas, temos as rochas não foliadas (granoblásticas). Essas possuem minerais que cresceram de forma equidimensional. Essa evidência sugere, muitas vezes, a ausência de deformação, como ocorre no metamorfismo de contato. Como exemplo dessas rochas, possuímos o quartzito, o mármore, o anfibolito e o granulito. Os quartzitos são rochas duras, não foliadas, normalmente brancas que se originam da recristalização de arenitos ricos em quartzo. São, normalmente, maciças, sem evidência de acamamento preservado, embora em alguns casos exibam delgadas lâminas de minerais placoides que desenvolvem pequeníssimas foliações.

Outra maneira de analisar o metamorfismo é investigar sua mineralogia. A intensidade do metamorfismo (grau metamórfico) pode ser identificada através do aparecimento de minerais-índice dentro de uma assembleia de minerais. Definimos mineral-índice como sendo um mineral que define uma zona metamórfica e que representa uma variação específica de pressão e temperatura. Por exemplo, a ordem sequencial do metamorfismo (do grau metamórfico mais baixo para o mais alto) de uma rocha sedimentar pelítica (fina) passa pela zona da clorita>biotita>granada>estaurolita>sillimanita. O aparecimento desses minerais, em conjunto com os outros minerais presentes na rocha (paragênese mineral), submetidos às condições de pressão e temperatura singulares, definem as fácies metamórficas (Figura 1.13).

Figura 1.13 | Minerais-índice definidores das zonas metamórficas e fácies metamórficas baseadas nas assembleias (paragênese mineral)



Fonte: Press et al. (2006).



Pesquise mais

É importante que você leia o Capítulo 26, de Pomerol et al. (2013) para entender melhor o processo de metamorfismo e sua importância na compreensão das rochas metamórficas.

POMEROL, C. et al. **Princípios de geologia**: técnicas, modelos e teorias. 14. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. p. 1052

Além do emprego como rocha ornamental, o quartzito pode ser utilizado para a produção de abrasivos e areia. Devido às suas propriedades geotécnicas (em função da dureza do quartzo e grau de coesão dos minerais na rocha), o quartzito pode também ser utilizado como brita na fabricação de concreto. Como o gnaiss é proveniente de rochas sedimentares ou de rochas ígneas (como o granito – e nesse caso referíamos a ele como um ortognaiss), sua composição mineralógica é bastante variável, logo sua aplicação como rocha ornamental é ampla, mas requer estudos específicos de caracterização tecnológica. Em geral, a ocorrência de minerais grandes e esteticamente bonitos (como a granada) favorecem a utilização do gnaiss na área de ornamentos, esculturas e revestimentos. Além disso, muitas vezes, as empresas estão interessadas no gnaiss intemperizado, isto é, na rocha alterada por processos climáticos. Um dos produtos mais comuns de alteração de um gnaiss é o saibro, uma espécie de “solo” formado por minerais argilosos (como a caulinita, a esmectita, a illita etc.) e areia grossa, que é muito utilizado na construção civil. Podemos citar ainda a ocorrência de jazidas de

caulim, que se referem ao produto formado pela decomposição de feldspatos, os quais geram o argilomineral caulinita.

Todas as rochas que vimos aqui possuem também uma importância científica muito grande: podemos, através de alguns minerais que elas hospedam, datar eventos geológicos de maneira consideravelmente precisa. Isso é possível através da utilização de isótopos instáveis (radioativos – U, Th e Pb, por exemplo) presentes em cristais com concentrações elevadas desses elementos químicos. Destacamos aqui a utilidade do mineral zircão para aplicação dessa técnica. De maneira simples, 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 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, o elemento ^{87}Rb decai para ^{87}Sr (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 no Quadro 1.2.

Quadro 1.2 | Lista dos isótopos mais utilizados para datação de eventos geológicos e suas respectivas meia-vidas

Elemento-Pai (Radioativo)	Elemento-Filho (Estável)	Meia-Vida (bilhões de anos)
Potássio 40 (^{40}K)	Argônio 40 (^{40}Ar)	1,3
Rubídio 87 (^{87}Rb)	Estrôncio 87 (^{87}Sr)	48,8
Samário 147 (^{147}Sm)	Neodímio 143 (^{143}Nd)	106
Tório 232 (^{232}Th)	Chumbo 208 (^{208}Pb)	14,01
Urânio 235 (^{235}U)	Chumbo 207 (^{207}Pb)	0,704
Urânio 238 (^{238}U)	Chumbo 206 (^{206}Pb)	4,47
Rênio 187 (^{187}Re)	Ósmio 187 (^{187}Os)	42,3

Fonte: adaptado de Teixeira et al. (2003).

Esses elementos não formam minerais, mas 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:

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

onde:

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

N_0 = número inicial 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).

λ = constante de desintegração do elemento-pai.

Sem medo de errar

Retomando a situação-problema, você como *trainee* da Geo-Consulting Magma já realizou toda a fundamentação e a contextualização do Domo de Vargeão, conforme os conceitos aprendidos na Seção 1.1, detalhando que a cratera foi formada pelo impacto de um corpo celeste há 60 milhões de anos. Em seguida, na Seção 1.2, você descreveu os minerais e as rochas presentes na área, ressaltando especificamente as rochas ígneas (rochas vulcânicas – diques, *sills* ou derrames basálticos – e granitos), e metamórficas (gnaisses e quartzitos) localizadas na região e ainda explicou como dois grupos de rochas tão distintas ocorrem lado a lado. Agora, chegou o mo-

mento que mais esperamos, a finalização do relatório. Nesta etapa, você deve indicar quais são as possíveis utilidades que as rochas descritas na seção anterior possuem, ou seja, você identificará o potencial econômico de cada uma dessas rochas. Para isto, você deverá responder às seguintes perguntas: quais rochas podem ser utilizadas para construção civil? Quais rochas encontradas podem ser utilizadas como rochas ornamentais? Quais rochas podem ser utilizadas na agricultura?

Como vimos ao longo do livro, tanto as rochas ígneas quanto as rochas metamórficas possuem aplicação em vários setores da nossa economia. Considerando o setor da construção civil, dentre as rochas ígneas, você aprendeu que o basalto, por exibir uma textura fina e ser bastante coesa, é utilizado na fabricação de brita. O fato de necessitar de pouco beneficiamento, pode ser empregado de maneira quase imediata na pavimentação de estradas, material base para construção de rodovias, calçadas etc.

Com relação às rochas metamórficas, você viu que o quartzito serve como matéria-prima na produção de abrasivos e, inclusive, areia, necessitando para esse caso, de extensivo beneficiamento. Entretanto, o quartzito, devido à coesão dos minerais, vem sendo empregado como pedra britada na fabricação de cimento. Além disso, o gnaiss intemperizado (alterado) pode servir como fonte de saibro, uma espécie de "solo" formado por argila e areia grossa. Sua aplicação na construção civil está relacionada à composição de argamassas.

Para utilização como rochas ornamentais, você viu que estas duas rochas metamórficas encontradas na região podem ser utilizadas para ornamentação. Complementarmente, você aprendeu que a ocorrência de grandes minerais e esteticamente bonitos (como a granada: que aparece nas rochas gnáissicas), favorece o emprego e, inclusive, agrega valor ao produto, devido à sua beleza.

Finalizando, vimos que a prática de utilização de pó de rochas na agricultura vem sendo implementada. Para esse fim, observamos que o basalto é a principal rocha empregada na rochagem devido à abundância de minerais que possuem micro e macronutrientes já deficitários em solos antigos e/ou degradados, remineralizando-os.

Prospectando novas aplicações

Descrição da situação-problema

A GeoConsulting Magma recebeu a solicitação para participar de um outro projeto, dessa vez na área de mineração. A XYZ Mineração Ltda. está interessada na extração de saibro para fornecer esse material para as empresas que atuam no ramo da construção civil. O gerente da GeoConsulting Magma, ciente da sua capacidade em resolver problemas práticos, novamente lhe incumbiu em receber os clientes e responder às questões mais urgentes.

Os donos da XYZ Mineração gostariam de saber em qual tipo de rocha o saibro se desenvolve. É possível encontrá-la em qualquer lugar? Além disso, eles relataram que, em conversa com outros donos de saibreiras, é possível encontrar, nas regiões onde o saibro é explorado, diques de rochas graníticas e ou pegmatitos. Como eles não sabem o que isso significa, solicitaram uma breve explicação. Por isso, explique para eles o que são essas rochas e de que forma elas ocorrem. Mesmo assim, interessados pelo assunto, um deles o questionou: É possível encontrar outras substâncias de valor econômico em situações como essa? Caso seja interessante, é possível datar esse evento geológico para descobrir outros jazimentos?

Resolução da situação-problema

Como você estudou nessa seção, o saibro é um tipo de “solo” alterado que se desenvolve devido à degradação da rocha sob o efeito de condições climáticas ao longo de milhares de anos. Ele é formado por argilominerais (como a caulinita ou ilita) e minerais de fração areia grossa, que é proveniente de rochas quartzo-feldspáticas, como é o caso do gnaiss. Como você já sabe, essas rochas não são encontradas em qualquer lugar, pois são ambientes geológicos específicos que levam à formação dessas rochas, como cinturões de montanhas, conforme já abordado na seção anterior.

Com relação às outras perguntas, nessa seção, vimos que os diques são corpos ígneos discordantes que cortam as rochas encaixantes de forma perpendicular ou oblíqua. Sua origem está ligada ao

processo de intrusão magmática de um material rochoso viscoso que é injetado em outras rochas através de fraturas. Dependendo de sua composição e/ou fluidos hidrotermais associados, pode sim hospedar elementos químicos valiosos, como lítio, nióbio, tântalo, urânio e terras raras, caso sejam pegmatitos.

Para datar o evento geológico, utilizamos a técnica de datação absoluta proporcionada pela utilização de isótopos radioativos, portanto, caso haja rochas com minerais com elementos químicos que sofram decaimento radioativo, é possível datá-las.

Faça valer a pena!

1. No início dos anos 1900, Norman L. Bowen, um petrólogo americano, e seus colegas, começaram a realizar uma série de experimentos para estudar a sequência de cristalização de minerais silicáticos a partir do magma. Após seus estudos, eles elaboraram a Série de Reação de Bowen que demonstra a ordem em dois braços: a série contínua e a descontínua. Com relação à Série de Bowen, que se refere à sequência de cristalização dos minerais silicáticos, é possível afirmar que:
 - a) A olivina é o último mineral a se cristalizar.
 - b) Os minerais máficos formam-se depois dos minerais félsicos.
 - c) A maioria dos minerais que formam o granito se cristalizam abaixo da temperatura da maioria dos minerais que formam o basalto.
 - d) O quartzo é o primeiro mineral a se cristalizar.
 - e) A biotita e a muscovita, as duas principais micas, formam-se praticamente na mesma faixa de temperatura.
2. A Formação Serra Geral é uma das maiores províncias ígneas (*Large Igneous Provinces*, em inglês) do planeta, estendendo-se por 1.200.000 km². Ao cobrir boa parte da região centro-sul do Brasil, suas rochas são fonte de água e sustento para muitas pessoas. Sobre a Formação Serra Geral e suas características, podemos afirmar:
 - a) A Formação Serra Geral é constituída por rochas magmáticas intrusivas, como o basalto.
 - b) A Formação Serra Geral é formada por rochas provenientes de sucessivos derrames vulcânicos, na qual o basalto é a rocha mais abundante.
 - c) O solo proveniente dessa região é extremamente infértil, motivo pelo qual os agricultores que praticam a agricultura sobre essa unidade geológica investem muitos recursos para tornar o solo fértil.

- d) Uma das principais formas dos corpos ígneos da Fm. Serra Geral são extensos plutons e batólitos que constituem enormes reservatórios de água subterrânea.
- e) As rochas da Formação Serra Geral não poderiam ser aplicadas na técnica de rochagem de forma rentável, pois suas características não são boas.

3. 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 protolito (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 utilizada como brita na construção civil.

Referências

GROTZINGER, J.; JORDAN, T. H. **Para entender a Terra**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

POMEROL, C. et al. **Princípios de geologia**: técnicas, modelos e teorias. 14. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. p. 1052.

POPP, J. H. Geologia geral. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. p. 309.

TEIXEIRA, W. et al. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. p. 167-180.

WICANDER, R., MONROE, J. S. **Fundamentos de geologia**. São Paulo: Cengage Learning, 2009. 528 p.

Geologia aplicada

Convite ao estudo

Caro aluno! Bem-vindo à Unidade 2, da disciplina de Geologia e Paleontologia. Continuando o nosso processo em busca do conhecimento sobre os princípios básicos da geologia e paleontologia fundamentados em uma visão evolutiva, nessa unidade, nós estudaremos objetivamente a geologia aplicada, ou seja, após a apresentação dos conceitos iniciais na Unidade 1, veremos a aplicação desses e outros conceitos na prática. Lembramos que na Unidade 1 você estudou a origem do Universo e da Terra, aprendeu as suas propriedades e materiais principais (rochas e minerais) e estudou dois dos três grupos de rochas.

Nesta unidade, o objetivo é apresentar conceitos básicos que lhe ajudem a compreender o que acontece na superfície terrestre, buscando compreender a relação da Terra com a atmosfera e até mesmo com as atividades que nós, seres humanos, desenvolvemos sobre ela. Seguindo a mesma linha de pensamento utilizada na primeira unidade, vamos lhe propor uma nova situação. A Geoconsulting Magma foi contratada para a elaboração e a execução de um projeto de um Aterro Sanitário em um vale, que possui rochas ígneas e sedimentares. Você, como membro da equipe, recebeu um documento do geólogo contratado pela empresa que descreve os aspectos básicos sobre o meio físico, mas que também contém informações detalhadas sobre a geologia do local. O geólogo, ciente do seu conhecimento de geologia e habilidade para desenhar, lhe solicitou um auxílio na elaboração do projeto. A sua responsabilidade agora divide-se em três etapas: 1º) Você deverá elaborar o modelo geológico 2D da área de implantação do projeto e responder a algumas perguntas sobre a geologia do local; 2º) Terá que caracterizar a gênese do solo e descrever as características do solo do local; e 3º) Deverá

propor soluções para analisar as águas (superficial e subterrânea). Todos os procedimentos a serem desenvolvidos nessas etapas auxiliarão você e a equipe envolvida a determinarem a viabilidade ambiental do projeto. No entanto, algumas dúvidas começaram a surgir: como elaborar o modelo geológico do local? Qual é o tipo de solo presente? Como devo analisar as águas e o solo?

Para responder a essas e outras perguntas, estudaremos, nesta unidade, as rochas sedimentares, a estratigrafia, os fundamentos de geologia estrutural e a geotecnia. Além disso, abordaremos os principais processos e agentes intempéricos responsáveis pela formação dos sedimentos e dos solos e terminaremos esta unidade estudando o ciclo hidrológico e seus principais componentes, finalizando com os métodos disponíveis para a análise da água e do solo. Portanto, é fundamental que você leia o seu livro didático. Vamos aos estudos? Boa leitura!

Seção 2.1

Rochas sedimentares e fundamentos de geologia estrutural

Diálogo aberto

Caro aluno! Nessa primeira seção da Unidade 2, você elaborará a primeira etapa do projeto do Aterro Sanitário, o qual você apresentará na forma de um relatório ao geólogo que lhe pediu o auxílio. Lembre-se de que a Geoconsulting Magma foi contratada para a elaboração e execução do projeto em um vale, que possuía rochas ígneas e sedimentares. O geólogo havia lhe entregue um documento que continha informações básicas sobre o meio físico, mas que também continha informações detalhadas sobre a geologia do local. Agora, com mais calma, você pode abrir o documento para analisar atentamente o que ele diz.

Segundo o documento, o vale possuía um rio que o fluía de Norte a Sul em linha reta. No topo do lado esquerdo (Ponto A), na cota de 700 m de altitude, os técnicos haviam feito uma sondagem vertical de 100 m de profundidade, chegando até cota final de 600 m. A cada 20 m havia uma camada horizontal de rocha diferente: 1) de 600 m a 620 m, havia folhelhos negros ricos em matéria orgânica; 2) de 620 a 640 m, perfurou-se um arenito quartzoso homogêneo com alta porosidade; 3) de 640 a 660 m, constatou-se a presença de um paraconglomerado de grãos bem arredondados, também homogêneo e com alta porosidade; 4) de 660 a 680 m, havia uma camada de basalto, na forma de um derrame; e 5) de 680 a 700 m, um calcário marinho. No fundo do vale, região onde o rio flui, havia uma camada de 4 m de solo residual de arenito e conglomerado que, em direção às vertentes do vale, diminui em espessura até atingir, no máximo, 2 m. Além disso, constatou-se que, na margem direita do rio, existe uma série de fraturas de direção Norte-Sul que mergulham 90°. O topo do lado direito do vale (Ponto B) está situado, em linha reta, a 100 m do Ponto A, onde foi feita a sondagem. Se imaginarmos um mapa, veremos que a linha reta entre o Ponto A e o Ponto B é perpendicular à linha que o rio forma.

Portanto, para cumprir a primeira etapa do relatório, você deverá desenhar uma seção geológica (perfil esquemático) em 2D do Ponto A ao Ponto B seguindo a topografia do terreno (acima descrita), no qual deverão constar as rochas encontradas, a(s) estrutura(s) geológica(s) presente(s) e a camada de solo, de acordo com as informações acima. Utilize 1:500 como escala horizontal e 1:1.000 como escala vertical. Além da seção, foi lhe perguntado e você deve responder sobre a geologia do local: Quais são as rochas sedimentares siliciclásticas dessa região? Como essas rochas são formadas? Qual conceito utilizamos para correlacionar as camadas nos dois lados do vale? Qual(ais) é(são) a(s) estrutura(s) tectônica(s) encontrada(s) no local?

Para responder a essas dúvidas, você estudará os tipos de rochas sedimentares (siliciclásticas e bioquímicas) e como elas são formadas, além disso, veremos os conceitos estratigráficos para correlacionar as camadas de rochas e quais são os tipos de estruturas geológicas que possuímos na Terra.

Não pode faltar

Você viu na Seção 1.2 que todas as rochas podem ser agrupadas em três grandes grupos e na Seção 1.3 você estudou os dois primeiros grupos, as rochas ígneas e metamórficas. Agora daremos continuidade e estudaremos o último grupo, as rochas sedimentares. De um modo geral, todas as rochas sedimentares se originam a partir de um componente comum: os sedimentos. A sedimentologia é o ramo da geologia que se ocupa, basicamente, em entender os processos sedimentares e sua dinâmica desde o intemperismo até a deposição final do sedimento. Como na Seção 2.2, estudaremos mais profundamente a dinâmica exógena da Terra, aqui nos preocuparemos em estudar a etapa final do processo sedimentar, isto é, quando os sedimentos já se encontram depositados.

Antes de seguirmos no assunto, no entanto, precisamos distinguir primeiramente os dois tipos básicos de sedimentos que possuímos. Os sedimentos clásticos (ou siliciclásticos) são fragmentos de rochas que são transportados fisicamente e seu tamanho varia

desde matação (partícula com diâmetro maior que 256 mm) até argila (partícula com diâmetro menor que 0,002 mm). A composição química do sedimento siliciclástico também varia, a depender do grau de estabilidade físico-químico dos minerais. Analogamente à Série de Bowen, que vimos na unidade anterior, usamos a Série de Goldich para analisar a estabilidade mineralógica frente ao intemperismo, sendo exatamente o inverso da sequência proposta por Bowen. A olivina é o primeiro mineral a se cristalizar, mas é também o mais suscetível à alteração. O quartzo, por sua vez, é o último a se cristalizar, mas é também o mais resistente. Por isso, a intensidade do intemperismo, com outros fatores, determinará a composição do sedimento.



Assimile

Os sedimentos siliciclásticos (e as rochas que deles derivam) são assim chamados devido à sua composição majoritária, pois, como vimos anteriormente, a maioria dos minerais formadores de rochas são silicatos.

Diferentemente dos sedimentos clásticos, os sedimentos bioquímicos possuem um comportamento particular. Eles são, na verdade, íons ou moléculas dissolvidas nas águas do solo, rios, lagos e mares que se precipitam (depositam) através de mudanças impostas nas condições ambientais (por exemplo, a evaporação da água de uma lagoa hipersalina condiciona à 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. Um exemplo disso são os organismos que secretam carbonato de cálcio para formar o seu exoesqueleto, como no caso das conchas de moluscos marinhos.

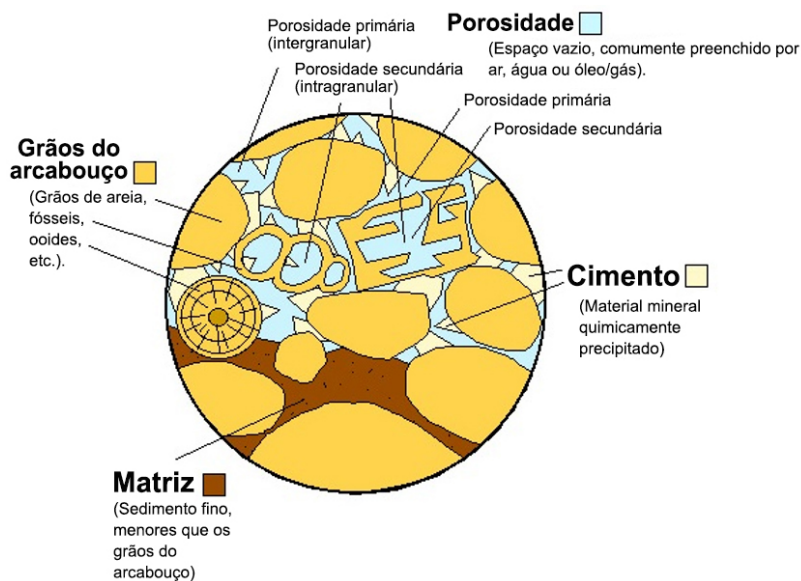
Quando tratamos das rochas sedimentares, muitas vezes o processo de transporte dos sedimentos é materializado na forma de certas estruturas, as quais denominamos estruturas sedimentares. Cada tipo de estrutura é única e fornece “pistas” sobre o processo de formação que levou à deposição dos sedimentos. A estratificação é a feição mais comum nos sedimentos e rochas sedimentares, ela pode variar de paralela (horizontal à superfície) à cruzada (as quais formam um ângulo em relação ao plano horizontal).

Essas estruturas e a própria rocha sedimentar se formam pelo soterramento contínuo dos sedimentos que, à medida que o peso aumenta, sofrem alterações mecânicas (físicas) e químicas, num processo chamado diagênese. Distinguimos, basicamente, quatro tipos de diagênese: i) compactação; ii) dissolução; iii) cimentação; e iv) recristalização diagenética. A compactação causará uma redução no volume ocupado pelos sedimentos, alterando o seu empacotamento, podendo até quebrar ou deformar alguns grãos. Caso o mineral envolvido seja quimicamente instável (por exemplo, calcita → CaCO_3), a compactação acarretará a dissolução dos minerais.

A dissolução, porém, pode ocorrer pela presença de soluções ácidas que percolam no espaço poroso das rochas, levando os minerais à dissolução ou “corrosão”. O resíduo da dissolução/corrosão, aliado à infiltração de outras soluções químicas, pode ocasionar a cimentação da rocha, que é responsável pela ligação dos elementos que compõem o arcabouço rochoso. O efeito mais notável da cimentação é a diminuição da porosidade. Por último, temos a recristalização diagenética que modifica a mineralogia (substituição de um mineral por outro, por exemplo: calcita pelo quartzo) e a textura cristalina (como exemplo, temos a transformação da calcita para aragonita que altera a morfologia dos cristais).

Todos esses processos ocorrem nos elementos que compõem as rochas, que podem ser divididos em dois: 1) 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 a 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 2) 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 2.1 ilustra, de maneira didática, os componentes das rochas sedimentares.

Figura 2. 1 | Componentes petrográficos das rochas sedimentares



Fonte: adaptada de: <<http://www.gly.uga.edu/railsback/1121SedRockComps.jpeg>>. Acesso em: 5 set. 2016.

Visto isso, podemos agora classificar as rochas, dando-lhes nomes que facilitam a comunicação e o entendimento sobre aspectos práticos. Normalmente, utilizam-se critérios texturais e mineralógicos para designar tanto as rochas siliciclásticas quanto as bioquímicas (por exemplo, as carbonáticas). Entre os critérios texturais, e tratando das rochas siliciclásticas, a mais usada é a granulometria (tamanho) dos grãos do arcabouço. Nesse caso, rochas com grãos grossos ($> 2 \text{ mm}$) são chamadas de conglomerados, rochas com grãos médios (entre 2 e $0,062 \text{ mm}$) são denominados arenitos, rochas com grãos finos de tamanho silte ($0,062 - 0,0039 \text{ mm}$) são designadas de siltitos e rochas com partículas menores que $0,0039$ (argilas) recebem distintos nomes, sendo os mais importantes os argilitos e os folhelhos (que apresentam a característica de partir-se paralelamente ao plano de acamamento/estratificação).

Para detalhar ainda mais, podemos considerar outros critérios texturais, como: a) proporção de matriz; e b) arredondamento dos grãos. Nesses casos, por exemplo, um conglomerado com grãos de arcabouços "imersos" em uma matriz fina seria denominado de para-

conglomerado, ao passo que um conglomerado em que os grãos do arcaibouço se tocam e, portanto, apresentam pouca matriz, são chamados de ortoconglomerados. O arredondamento dos grãos pode ser útil para diferenciar uma brecha, em que os grãos são angulosos, de um conglomerado (grãos arredondados) propriamente dito.

Quanto à mineralogia, podemos analisar a rocha de acordo com a proporção de quartzo, feldspato e fragmentos líticos (fragmentos de outras rochas). Também podem ser aplicados outros critérios, como a ritmicidade das estruturas, a fissilidade da rocha (tendência de se partir em folhas, como o folhelho), quantidade de matéria orgânica, entre outros.



Exemplificando

Exemplificando, se um arenito possui uma alta proporção de quartzo em detrimento dos demais minerais, dizemos que ele é um arenito quartzoso (ou um quartzo arenito).

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 areia e os calcilitos são rochas dos 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 dolomito (a rocha é majoritariamente composta por dolomita – $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$). É comum aparecerem também termos que designam o ambiente onde as rochas foram formadas, por exemplo: calcário marinho, ou seja, formado em ambiente marinho.

Como você pôde perceber, há inúmeras rochas sedimentares e cada uma é bem diferente da outra. Como essas rochas são formadas em ambientes sedimentares distintos, que mudam ao longo do tempo geológico, é importante entendermos o empilhamento vertical dessas rochas, estabelecendo um contexto estratigráfico detalhado.



Pesquise mais

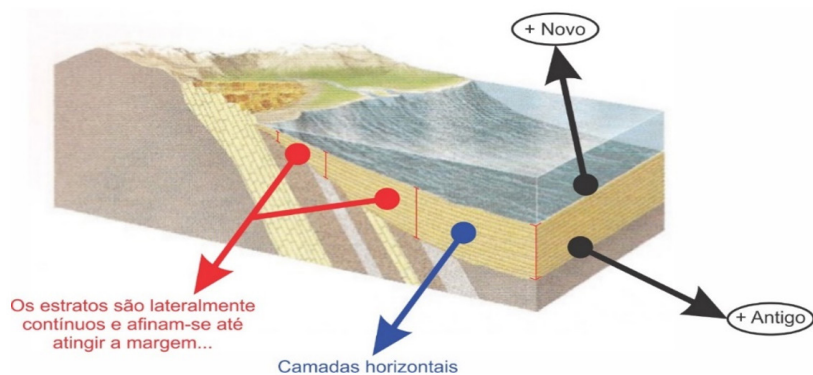
Para entender mais sobre os sedimentos e as rochas sedimentares, sugerimos assistir à aula no link a seguir, que está disponível gratuitamente na internet.

SEDIMENTOS e rochas sedimentares. Produção de Rodrigo Gomes No-
reira et. al. Universidade de São Paulo. São Paulo: Estúdio Multimeios/
Centro de Computação Eletrônica. 2011. Videoaula. Disponível em:
<<http://eaulas.usp.br/portal/video.action?idItem=384>>. Acesso em: 5
set. 2016.

Dentre os vários conceitos estratigráficos, destacamos três, difundidos inicialmente por Nicolas Steno (1638-1686): 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 transportados 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.

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 2.2 ilustra os princípios explicados anteriormente na forma de um bloco diagrama representando uma sucessão de rochas sedimentares depositadas no ambiente marinho.

Figura 2.2 | Principais princípios da estratigrafia, elaborados por Nicolas Steno (1638-1686)



Fonte: adaptado de Press et al. (2006).

Todos esses princípios estratigráficos parecem, realmente, funcionar em todas as ocasiões. No entanto, a natureza sempre prefere complicar as coisas. Todas as rochas, incluindo as sedimentares, sofrem deformações tectônicas após a sua formação, a depender do contexto geológico em que esteja inserida.

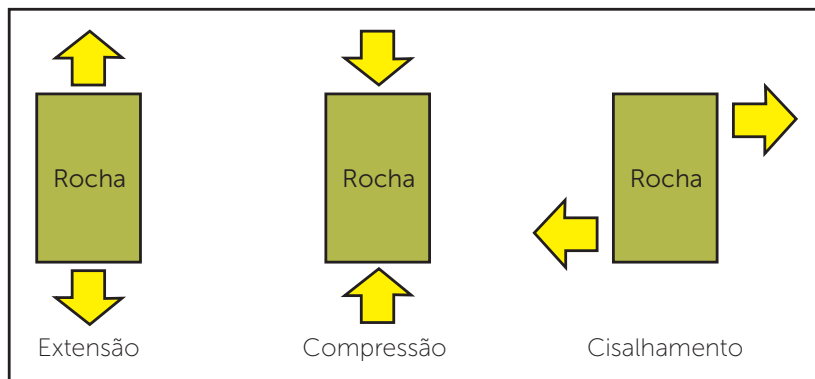


Refleta

Será que todos os princípios estratigráficos são válidos até hoje? Somente teremos camadas de rochas inclinadas se houver deformação tectônica?

Para entender como essas deformações se manifestam, estudaremos aqui as três principais estruturas geológicas, isto é, as falhas, dobras e fraturas. Antes, porém, é necessário compreender como elas são deformadas. São as forças tectônicas que imprimem as mudanças nas rochas e, entre elas, distinguimos as forças de compressão, as quais apertam e encurtam um corpo, as forças extensionais, que alongam e podem segmentá-lo, e as forças de cisalhamento, as quais deslocam cada lado do corpo em direções opostas (Figura 2.3).

Figura 2.3 | Principais forças que atuam nas rochas, deformando-as



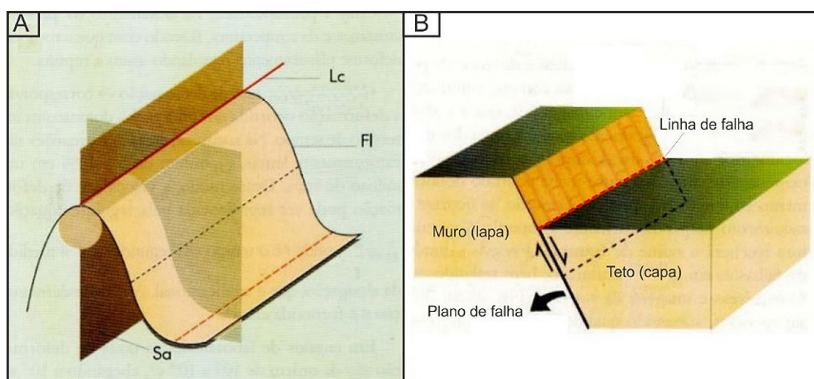
Fonte: elaborada pelo autor.

As forças de compressão, extensão e cisalhamento podem formar tanto dobras quanto falhas, mas há um importante parâmetro que influenciará a formação de um ou de outro: o posicionamento crustal. As rochas situadas em regiões mais profundas da crosta deformam-se lentamente, comportando-se de forma plástica (dúctil)

e, portanto, forma dobras. Já as rochas que se encontram mais próximas à superfície sofrem deformação mais rápida, rompendo-se, logo possuem um comportamento frágil (rúptil), e, com isso, formam-se falhas. As fraturas (juntas) são diferentes das falhas, pois não há deslocamento relativo dos dois lados do plano de falhamento, a rocha simplesmente “trinca”.

Quando interpretadas essas estruturas tectônicas, normalmente nos atentamos a alguns elementos geométricos fundamentais. No caso das dobras (Figura 2.4A), temos basicamente o plano (superfície) axial (Sa), a linha de charneira (Lc) e o flanco (Fl). Já nas falhas (Figura 2.4B), temos o plano de falha, muro (lapa), teto (capa) e a linha de falha. Esses elementos servem como base para a interpretação das falhas e dobras, sendo que a atitude (as medidas que tomamos por meio de bússolas) de ambas nos fornecem informações valiosas.

Figura 2.4 | Estruturas geológicas e seus elementos geométricos: (A) dobra; e (B) falha

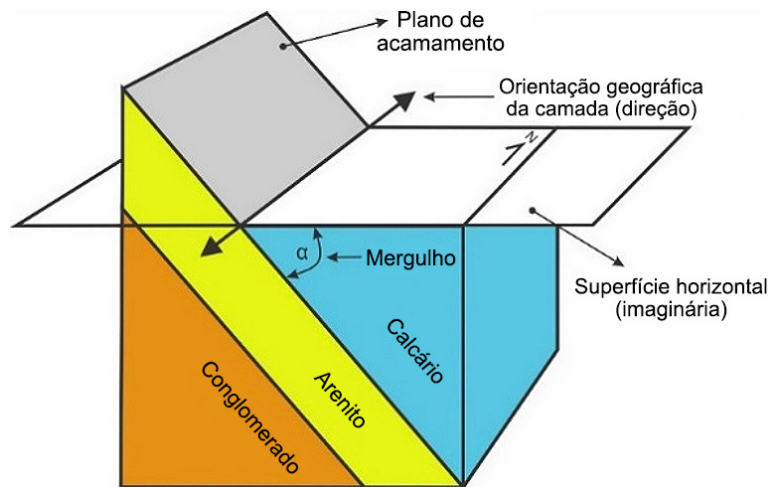


Fonte: adaptada de Teixeira et al. (2001)

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. A Figura 2.5 ilustra o exemplo de uma camada geológica, mas poderíamos aplicar esses mesmos conceitos para as fraturas, as dobras e as falhas.

No caso das fraturas, por exemplo, ao vê-las no afloramento, tentamos ver qual é a direção espacial (geográfica) que ela possui, imaginamos uma superfície horizontal que “corta” essa fratura e medimos o ângulo formado entre essa superfície e a fratura. Teremos assim, as atitudes da fratura.

Figura 2.5 | Desenho esquemático mostrando como as atitudes das estruturas geológicas são tomadas



Fonte: elaborada pelo autor.

Estudar e entender essas estruturas não é apenas um desafio científico, é imprescindível compreendê-las caso estejamos interessados em projetar grandes obras civis (pontes, túneis, rodovias, barragens etc.). As falhas, as fraturas e as dobras são regiões que apresentam pouca resistência mecânica se houver qualquer sobrecarga sobre elas. Além disso, as fraturas e as falhas são estruturas que permitem um escoamento muito significativo e rápido de fluidos (água da chuva, gases armazenados no subsolo, petróleo e gás natural, entre outros), e por isso, caracterizá-las corretamente é primordial. Como se não bastasse isso, essas estruturas tectônicas podem condicionar a ocorrência de movimento (escorregamento) de todo o solo que se situa acima das rochas.

Não são somente as estruturas tectônicas que geram riscos. Em termos geotécnicos, a natureza dos materiais (sedimento, rocha, solo etc.), a declividade do terreno onde se planeja executar a obra, a estabilidade das encostas e a quantidade de água presente nos materiais também influenciam fortemente qualquer tipo de proble-

ma que possa, porventura, ocorrer. Normalmente, materiais inconsolidados, como areia, silte, argila, solo e fragmentos de rochas são mais instáveis devido à inexistência de uma coesão entre os grãos, ao passo que os materiais consolidados, como as rochas, possuem uma excelente coesão, o que oferece uma certa resistência. A presença de estruturas tectônicas (com fraturas, por exemplo), no entanto, pode condicionar a ocorrência de escorregamentos.

A água é a grande responsável pela redução do atrito entre as partículas, pois ela lubrifica a superfície de contato entre os grãos, no caso dos sedimentos soltos e solos, ou planos de contato entre rochas distintas, no caso de materiais consolidados. Comumente, a presença de água nos poros das rochas ou dos solos e sedimentos é tão alta que ela exerce uma pressão que separa os grãos e provoca uma certa fluidez no material, fazendo com que ele se comporte como um fluido. Esse fenômeno é denominado liquefação, e ocasiona as chamadas corridas de lama ou de detritos, muito comuns em algumas regiões montanhosas em épocas de chuvas intensas.

A declividade das encostas e até mesmo o seu formato (geomorfologia) interferem na estabilidade. Encostas topograficamente suaves, com baixo ângulo de inclinação, representam situações mais adequadas ao equilíbrio do que encostas topograficamente mais íngremes, com cortes abruptos e faces rochosas inclinadas.

Sem medo de errar

Caro aluno, vamos retomar agora ao desafio que lhe foi lançado no início desta seção: o geólogo contratado pela GeoConsulting Magma entregou a você um documento contendo informações sobre o meio físico e geológico sobre o local, onde se está planejando a implantação de um aterro sanitário em um vale. O documento era detalhista e informava como era a configuração do vale, destacando as rochas que foram encontradas no local, pois já havia sido feita uma sondagem (perfuração). Com as informações que estão no documento, foi pedido que você elaborasse um modelo geológico 2D entre os dois pontos que o documento menciona, seguindo a topografia do terreno. Além disso, o geólogo solicitou que você respondesse a algumas perguntas: Quais são as rochas sedimentares siliciclásticas dessa região? Como essas rochas são formadas? Qual conceito utilizamos

para correlacionar as camadas nos dois lados do vale? Qual(ais) é(são) a(s) estrutura(s) tectônica encontrada(s) no local?

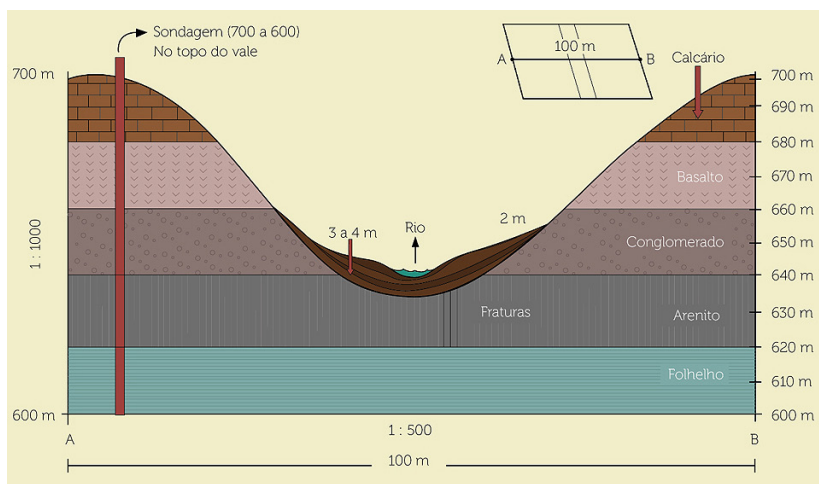
Para elaborar o modelo geológico 2D, primeiramente, releia o que está descrito no documento que o geólogo lhe deu, que se encontra na seção “Diálogo aberto”. Sugere-se que você faça dois desenhos: 1º) Um mapa com visão em planta do rio que atravessa o vale, colocando os dois pontos (Ponto A e Ponto B), e 2º) Desenhe o vale com as cotas descritas (700 e 600 m), utilizando as escalas solicitadas (1:500 como escala horizontal e 1:1.000 como escala vertical).

! Atenção

Lembre-se de que um vale é um terreno em forma de V e que nos dois lados do vale temos as encostas (vertentes) e, no fundo, normalmente, flui um rio.

Feito isso, coloque no seu segundo desenho as camadas (estratos) de rochas encontradas, respeitando a espessura e a sequência correta em que elas aparecem. Ilustre os solos (com suas respectivas espessuras) e as fraturas, obedecendo a atitude delas. Lembre-se de que a direção das fraturas representa a orientação geográfica e o mergulho é a inclinação delas com respeito a um plano horizontal que as “corta”. Seu desenho deverá se parecer com o da Figura 2.6.

Figura 2.6 | Seção geológica 2D (perfil esquemático) da etapa de elaboração do modelo geológico



Fonte: elaborada pelo autor/DEDMD.

Com relação às perguntas, para responder quais são as rochas siliciclásticas dessa região, você precisa primeiro entender que as rochas sedimentares são divididas entre siliciclásticas e bioquímicas e que, cada uma, possui uma característica diferente. Dentre as siliciclásticas, temos uma série de rochas distintas, como os conglomerados, os arenitos e os folhelhos. O calcário, que também ocorre na região, é um exemplo de rocha bioquímica, não esqueça.

Sobre o processo de formação dessas rochas, você deve lembrar que, diferentemente das rochas bioquímicas, as rochas siliciclásticas são formadas por fragmentos erodidos de outras rochas que, ao se depositarem e sofrerem diversos processos diagenéticos, formaram as rochas sedimentares siliciclásticas. Para correlacionar os tipos de rochas encontradas em cada lado do vale, lembre-se dos conceitos estratigráficos que lhe foram apresentados. São três: princípio da superposição das camadas, princípio da horizontalidade original e o princípio da continuidade lateral.

Por último, com relação às estruturas tectônicas encontradas no local, foi possível observar que no fundo do vale, próximo ao rio, ocorrem fraturas (juntas), as quais possuem as seguintes atitudes: direção N e mergulho de 90°.

Avançando na prática

Geologia ao auxílio da sociedade

Descrição da situação-problema

Na cidade de Passos da Serra, estava chovendo sem parar havia mais de uma semana. A Defesa Civil do município já estava preocupada com a possibilidade da ocorrência de deslizamentos que pudessem vitimar alguns moradores. Como a região se encontra numa área serrana, composta por rochas sedimentares siliciclásticas (principalmente arenitos e argilitos), com solos relativamente espessos (cerca de 5 m), os membros da Defesa Civil começaram a contatar algumas empresas de consultoria para ajudar a fazer um levantamento das regiões mais críticas.

A GeoConsulting Magma, com certa experiência no assunto, foi contatada e você foi junto fazer a visita técnica de campo. Chegaram-

do ao local, você também percebeu que havia falhas e fraturas geológicas que apresentavam muita água fluindo por elas. Como se não bastasse, você observou que o solo já estava bastante encharcado e havia alguns deslizamentos pequenos de solo, nos quais foi possível averiguar que o solo já se comportava como uma massa fluida. Enquanto você constatava isso, o geólogo que lhe acompanhou estava discutindo com os membros da comunidade sobre alguns assuntos particulares da região.

Após algum tempo, ele voltou e lhe questionou sobre o que você conseguiu constatar na visita a campo. Portanto, ele lhe faz algumas perguntas, essenciais para o levantamento: você conseguiu ver algo que comprometa a segurança dos moradores? Há alguma estrutura geológica que condiciona a ocorrência de algum evento grave? Algum fenômeno em específico está ocorrendo com o solo? Qual?

Resolução da situação-problema

Como você pôde aprender nessa seção, há algumas evidências que, sim, comprometem a segurança dos moradores, como é o caso das falhas. Você pode explicar ao geólogo que, como vimos no livro didático, a ocorrência de falhas permite que a água da chuva escoe muito rapidamente e que, além disso, elas oferecem pouca resistência mecânica quando há qualquer sobrecarga (residências, por exemplo) sobre elas. Portanto, como você constatou, isso pode condicionar a ocorrência de algum evento grave.

Como se não fosse suficiente, ao perceber que o solo estava encharcado, você se lembrou que ao estudar sobre o assunto nessa seção, é possível inferir que a água reduz o atrito entre as partículas do solo e que, quando a presença de água nos poros dos solos e sedimentos é alta, ela exerce uma pressão que separa os grãos e provoca uma certa fluidez no material. Logo, você pode explicar ao geólogo que um fenômeno ocorre no solo da região e que isso se chama liquefação, e que ocasiona as famosas corridas de lama ou de detritos que podem, porventura, se tornarem fatais.

Faça valer a pena!

1. 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 estabelecem 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 transportadas por um fluido, acomodam-se pela ação da gravidade.
- d) A deposição das partículas sedimentares, que são transportadas por um fluido, acomodam-se pela ação dos ventos.
- e) A deposição das partículas sedimentares, que são transportadas por um fluido, acomodam-se pela ação do resfriamento.

- 2.** A construção da primeira usina nuclear brasileira, Angra 1, na praia de Itaorna, Angra dos Reis, Rio de Janeiro, foi um marco no desenvolvimento tecnológico e econômico do Brasil. Apesar de até os dias atuais nenhum incidente ter ocorrido, a usina de Angra foi construída sobre uma falha geológica.

Sabe-se que as falhas geológicas são produzidas por forças de deformações. Assim, sobre as falhas, é correto afirmar:

- a) Com as fraturas apresentam alta resistência mecânica.
- b) Com as dobras apresentam baixa resistência mecânica.
- c) Com as dobras apresentam alta resistência mecânica.
- d) Com as fraturas não permitem escoamento.
- e) Com as fraturas são formadas pelo arrefecimento do magma.

- 3.** 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 rochas sedimentares representam 75% de todas as exposições 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.

Seção 2.2

Dinâmica externa da Terra

Diálogo aberto

Caro aluno! Seja bem-vindo à segunda seção dessa unidade, denominada Dinâmica externa da Terra. Para chegar até aqui, lembre-se de que você estudou os tipos de rochas sedimentares e como elas são formadas, além disso, você viu os principais conceitos estratigráficos e quais os tipos de estruturas geológicas que possuímos. Nesta seção, abordaremos os processos sedimentares responsáveis pela fragmentação das rochas, erosão e transporte de suas partículas e também os ambientes nos quais essas partículas (sedimentos) são depositadas. Para finalizar, estudaremos os conceitos básicos relacionados à formação dos solos.

Para concluir seu trabalho, você precisará fazer a segunda tarefa que lhe foi solicitada, isto é, você terá que caracterizar a gênese e descrever as características do solo da região onde será instalado um aterro. Lembra?

A Geoconsulting Magma foi contratada para a elaboração do projeto e execução de um aterro sanitário em um vale, o qual possuía rochas ígneas e sedimentares. Visando determinar a viabilidade ambiental do projeto, na primeira etapa, o geólogo lhe pediu um auxílio para elaborar o modelo geológico 2D da área de implantação do projeto e responder a algumas perguntas sobre a geologia do local. Esta foi a primeira parte de um relatório que você está confeccionando.

Imagine agora que, após a concepção do modelo geológico 2D, você foi visualizar in loco as características do solo do local. Chegando lá, você foi direto para região próxima ao rio, onde havia uma camada de solo de 4 m, e posteriormente se deslocou para as regiões mais íngremes. Ao constatar aquilo, algumas perguntas lhe vieram à cabeça e, para dar continuidade ao projeto, é imprescindível que você as responda: Quais são os tipos de intemperismo responsáveis pela formação do solo? De onde vieram os sedimentos

que formam o solo? O solo é pouco ou muito permeável? Que tipo de ambiente de sedimentação foi responsável pela deposição dos sedimentos do solo próximo ao rio?

Para responder a estes e outros questionamentos, estudaremos os tipos de intemperismo, erosão, os agentes de transporte sedimentar, sedimentação, além dos ambientes de sedimentação e o processo de formação dos solos. Para compreender todo o conteúdo, é fundamental que você leia o seu livro didático. Vamos aos estudos? Boa leitura!

Não pode faltar

Na seção anterior, você estudou um dos produtos sedimentares: as rochas sedimentares. Nessa seção, veremos com mais detalhes os principais processos sedimentares que levam uma rocha a fragmentar-se, dando origem aos sedimentos, e também os outros processos relacionados à dinâmica externa da terra, como a erosão, o transporte e a deposição dos sedimentos nos distintos ambientes de sedimentação (continental, transicional e marinho). Finalizando, estudaremos o processo de formação dos solos e suas principais características.

A trajetória dos sedimentos começa quando ele ainda se encontra na forma de minerais dentro da rocha. A partir do momento que a rocha, seja ela sedimentar, ígnea ou metamórfica, se encontra exposta às condições da dinâmica externa da Terra, ou seja, num ambiente geológico totalmente diferente ao de sua formação, as rochas sofrem um desequilíbrio e ficam suscetíveis 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 um 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 sazo-

nal da temperatura, a qual causa expansão e contração térmica das rochas que, atuando por vários milhares de anos, causa o enfraquecimento da material rochoso; ii) congelamento de água nas fissuras, gerado pela expansão volumétrica que a água sofre ao solidificar-se (de fato, há um aumento de aproximadamente 9% de seu volume), exercendo pressão nas paredes das fraturas; iii) alívio de pressão, causado quando há exumação de massas rochosas mais profundas (onde as pressões atuantes eram altas) para porções superficiais na crosta (onde as pressões são mais baixas), o que gera uma série de fraturas; e iv) penetração de raízes, que é quando raízes de plantas forçam a passagem pela 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. Como boa parte dos minerais está em desequilíbrio químico nas condições superficiais, essas reações acontecem com frequência. Aqui destacaremos três: i) hidratação, que ocorre quando há uma atração elétrica entre as cargas não neutralizadas dos minerais e da água, causando a incorporação de H_2O na estrutura do mineral, que se transforma em outro mineral; ii) dissolução, é quando há a solubilização dos minerais, os quais são separados em íons que são dissolvidos pela água, fenômeno muito comum nas rochas carbonáticas, visto que são instáveis às águas ácidas; iii) hidrólise, é uma reação que acontece quando a água se enriquece com CO_2 dissolvido para formar o ácido carbônico, tornando água ácida, quebrando a estrutura do mineral e liberando elementos que se recombina para formar os argilominerais (como a caulinita).



Pesquise mais

Para conhecer mais outros tipos de intemperismo, sugerimos a leitura do Capítulo 6 de Popp (2010), que se encontra em sua biblioteca virtual. Lá você encontrará, também, figuras ilustradas que lhe ajudarão a entender melhor o conteúdo.

POPP, José Henrique, **Geologia geral**. 6. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2010.

Os processos intempéricos acima são responsáveis pela fragmentação e enfraquecimento da rocha. No entanto, para colocar

os produtos intempéricos em movimento, é necessário que eles sofram 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. O diagnóstico da erosão é bem direto e, hoje em dia, até as pessoas leigas no assunto costumam identificar feições erosivas. Caso ocorra nas rochas, normalmente observamos superfícies irregulares e escavadas, enquanto no solo observamos sulcos (quando em estágio inicial) ou verdadeiros canais de grande dimensão (as famosas voçorocas), quando o estágio é avançado.



Exemplificando

As ravinas, como está mostrado a seguir, também são exemplos de feições erosivas que afetam o solo e, em muitos casos, prejudicam a produtividade das lavouras.

Figura 2.6 | Ravinas: acidente geográfico oriundo da erosão

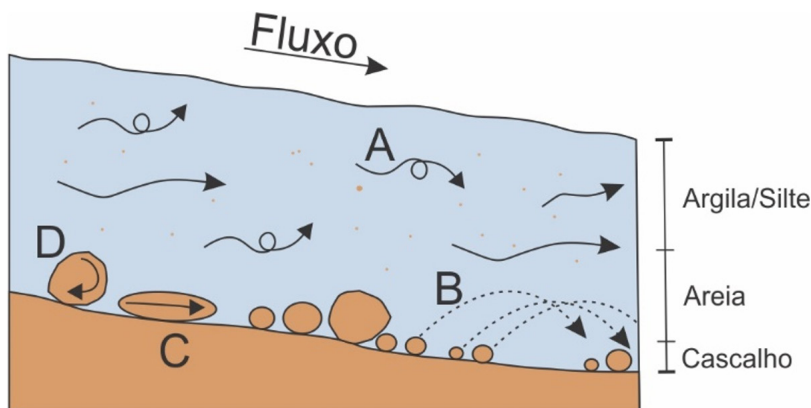


Fonte: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Erosion_on_Madagascar.JPG>. Acesso em: 15 set. 2016.

No entanto, o processo erosivo restringe-se à mobilização inicial dos sedimentos gerados. O processo responsável pelo carregamento das partículas por maiores distâncias é o transporte, que é governado principalmente pela água, vento e o gelo. Se analisarmos o sedimento grão a grão, percebemos alguns tipos particulares de

deslocamento da partícula. Comumente, os sedimentos finos (como argilas e silte) são sustentados pelo fluido que o carrega, fluindo em suspensão (Figura 2.7A). No entanto, os sedimentos mais grosseiros (como areia e cascalho) deslocam-se por outros processos, como: i) saltação, que é quando se mantém brevemente em contato com a superfície, descrevendo uma trajetória parabólica repetitiva (Figura 2.7B); ii) arrasto, é quando o sedimento é arrastado na interface fluido/superfície, mantendo um contato duradouro com essa interface (Figura 2.7C); e iii) rolamento, ocorre de tal forma que os sedimentos rotacionam-se em torno de seu próprio eixo, sobre a interface fluido/superfície (Figura 2.7D). Como os sedimentos sofrerem arrasto e rolamento quase que simultaneamente, referimos a esse tipo de transporte como tração.

Figura 2.7 | Tipos de transporte de sedimentos



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em muitos casos, entretanto, os sedimentos não são movimentados como partículas soltas (livres), como a areia transportada pelos rios e ventos. Muito pelo contrário, quando o fluido que transporta os sedimentos é viscoso (devido à própria concentração de sedimentos), toda a massa sedimentar é carregada como uma só, sendo esta uma mistura complexa de fluido e material sólido. Isso ocorre, por exemplo, nos casos de deslizamentos que vimos na seção anterior.

Como vimos anteriormente, os sedimentos são transportados até se depositarem, isto é, até quando o fluido perde a capaci-

dade de mobilizá-los. A partir desse momento, as partículas começam o processo de sedimentação, que ocorre a diferentes taxas, dependendo do diâmetro e peso do sedimento. Partículas grandes e pesadas são as primeiras a sedimentarem (cascalhos), 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 o transporte tenha perdido quase que totalmente seu vigor.



Assimile

Sedimentação é o processo de acúmulo dos sedimentos em camadas que ocorrem devido à perda de capacidade de transporte do fluido, causando a decantação das partículas pelo efeito da gravidade.

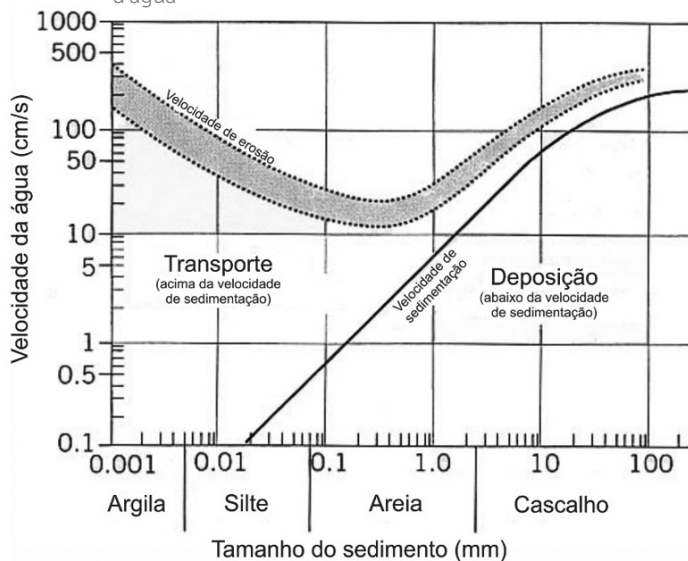
À medida que o sedimento vai se acumulando, a espessura do depósito formado aumenta e a sobrecarga que é exercida pelos sedimentos sobrejacentes também aumenta. Com isso, o depósito de sedimentos vai se acomodando e ficando cada vez mais consolidado. A partir desse produto sedimentar, futuramente, se formará um solo (caso haja a incorporação de matéria orgânica) ou uma rocha sedimentar (material coeso e litificado), como foi visto na Seção 2.1.

Como é possível perceber, há algumas variáveis que interferem na deposição dos sedimentos: 1º) a ocorrência de uma rocha fonte, de onde todo o sedimento se originará; 2º) as condições climáticas que atuam sobre a rocha; 3º) a configuração topográfica da área fonte, do trajeto que o sedimento é transportado e da bacia sedimentar; e outros fatores como tempo e interferência biológica.

No entanto, como você viu, o agente que transporta o sedimento também exerce uma influência significativa. Temos três agentes que se encarregam de transportar os sedimentos de forma bastante seletiva. O primeiro, e talvez mais importante deles, é a água, que possui uma eficiência bastante relevante. Além disso, como possuímos água em abundância tanto no mar quanto no continente, ela corresponde ao principal agente de transporte. A água que corre nos rios e córregos consegue, dependendo do sedimento e da velocidade do fluxo d'água, transportar

desde partículas finas em suspensão até partículas grosseiras por tração. A Figura 2.8 traz uma imagem que mostra a capacidade de mobilização da água, demonstrando que uma velocidade de pouco mais de 10 cm/s já é suficiente para transportar partículas grosseiras (>2 mm).

Figura 2.8 | Curva de Hjulstrom - que mostra o tamanho das partículas e a velocidade d'água



Fonte: adaptada de: <https://dglb.files.wordpress.com/2008/09/hjulstrom_curve_task.jpg>. Acesso em: 16 set. 2016.

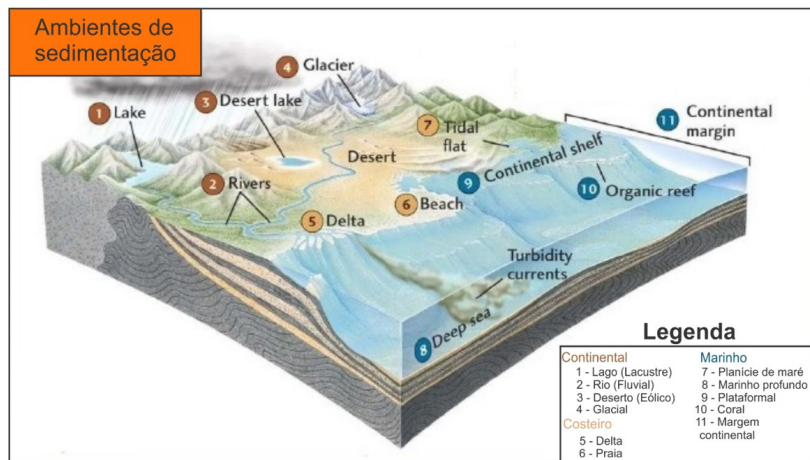
Já o vento, que também temos em abundância, apesar de ser eficaz em transportar os sedimentos a grandes distâncias (por exemplo, a areia do deserto do Saara é vista, por meio de imagens de satélite, alcançando a Floresta Amazônica), sua seletividade é muito mais restrita e, consequentemente, transportar sedimentos grosseiros é algo raro. Para exemplificar, Teixeira et al. (2003) demonstram que uma partícula de areia de 1 mm de diâmetro necessitaria de um vento cuja velocidade seria equivalente a 47 km/h.

Menos comum na maioria das regiões da Terra, mas não menos importante, o gelo também é um agente de transporte competente.

Como se movimenta, como uma massa que incorpora as partículas à medida que se desloca, o gelo possui a habilidade de transportar desde blocos de rochas (>256 mm) até sedimentos finos. No entanto, a particularidade do gelo é que ele não transporta as partículas de forma livre, mas na própria geleira. Por isso, os sedimentos se depositam somente quando há o degelo, logo, a partir dessa fase, as partículas se dispersam por pequenos canais resultantes da água do degelo ou até mesmo em lagos, rios e mares, caso a geleira avence para esses corpos d'água.

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. Definimos um ambiente de sedimentação como qualquer área que permita o acúmulo de sedimentos e que possui características físicas, químicas e biológicas bem definidas que os distinguem de outros ambientes. De forma geral, dividimos os ambientes em: a) continentais; b) costeiros (transicionais); e c) marinhos (Figura 2.9). Em cada um desses, há outros subambientes específicos.

Figura 2.9 | Diagrama esquemático que ilustra os tipos de ambientes de sedimentação



Fonte: adaptada de Press et al. (2006).

Nas áreas continentais, o mais importante ambiente de sedimentação é o fluvial. Embora pareça que os rios apenas transportam os sedimentos, isso não passa de uma mera impressão. Como a dinâmica fluvial é muito ativa, o balanço erosão/transporte/deposição não é trivial. Em termos deposicionais, distinguimos duas porções do ambiente fluvial: 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. Apesar de existirem diferentes morfologias do canal fluvial, essas duas regiões quase sempre existem.

No entanto, se pensarmos geologicamente, a mobilidade dos canais ao longo do tempo geológico é muito alta. Logo, os canais sofrem avulsão (mudam seu curso), de maneira que o que hoje é planície de inundação pode muito bem ter sido a região onde o rio fluía, isto é, onde o canal fluvial passava. Dessa maneira, o solo gerado nas zonas próximas aos canais fluviais é muito heterogêneo, formado pela alternância de camadas arenosas (com alta porosidade e muito permeáveis) e finas (argilosas e/ou siltosas), as quais, apesar de serem razoavelmente porosas, são bastante impermeáveis.

Na região costeira, o ambiente mais conhecido e mais notável, é a praia. Como você já deve ter percebido, todos os sedimentos que estão acumulados ali sofrem com a ação das marés, ondas e, por vezes, pelas águas dos rios que desembocam no mar. As ondas são os agentes mais conhecidos, pois remobilizam os sedimentos que chegam ao mar através dos rios. Como o movimento das ondas é contínuo e regular, salvo quando há tempestades, o grau de seletividade das ondas é alto, pois somente sedimentos mais grosseiros, como areia e cascalho, se depositam na região praial. Dessa maneira, a areia da praia apresenta boa porosidade e excelente permeabilidade, visto que a água infiltra muito rapidamente. Embora as ondas exerçam boa parte do serviço, é interessante destacar que as correntes (por exemplo, a corrente de retorno) também são responsáveis pelo carregamento dos sedimentos mar adentro, levando-os para as partes mais distais do mar.



Sugerimos fazer uma reflexão. Após ter lido sobre os processos sedimentares, você acha que todas as praias são iguais com relação aos sedimentos? Todas as praias são de areia? Existem praias escuras? Se sim, como?

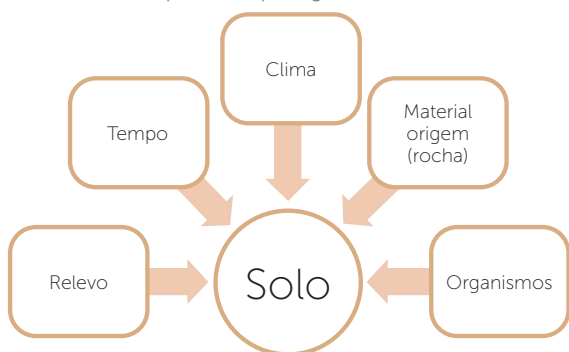
O ambiente marinho, nas margens continentais divergentes, é costumeiramente dividido em: 1) plataforma continental, que corresponde às partes submersas mais rasas; 2) talude continental, que corresponde à porção formada pela quebra abrupta do relevo submarino; e 3) planície abissal, uma zona de topografia 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 sedimento pelágico (sedimentos finos de águas profundas).

Como vemos, há inúmeros ambientes de sedimentação que podem gerar depósitos sedimentares distintos, cada qual com características singulares. No entanto, se pensarmos novamente no intemperismo e seus produtos, podemos perceber que nem todos os sedimentos são mobilizados, ou seja, nem todos sofrem erosão. Os sedimentos que ficam acumulados, e a matéria orgânica que é posteriormente incorporada, originarão os solos. Além disso, todos os solos possuem, em menor ou maior quantidade, ar e água presos nos poros.

Na realidade, todo manto de alteração que está situado acima da rocha alterada pode ter duas naturezas distintas. Quando essa zona superficial é formada por sedimentos e matéria orgânica formados *in situ*, denominamos esse solo de residual. Significa que o solo é um resíduo intempérico da rocha, de forma que os minerais do solo são provenientes da alteração da rocha situada logo abaixo. Contrariamente, se o solo posicionado acima da rocha for proveniente de outro local (*ex situ*), dizemos que o solo é transportado e, portanto, seus componentes podem não corresponder com as características da rocha situada abaixo.

De qualquer forma, o processo pedogenético envolve algumas modificações que a rocha alterada sofre para dar origem ao solo: i) perda de matéria, a qual é provocada devido à erosão e à lixiviação; ii) adição de matéria, proveniente de áreas externas, podendo ser matéria orgânica, poeira mineral vinda da atmosfera, nutrientes etc.; iii) translocação de matéria, remobilização das soluções químicas geradas durante a pedogênese, podendo fluir vertical e lateralmente; e iv) transformação da matéria, que ocorre devido ao contato com produtos da decomposição da matéria vegetal e animal. A ocorrência dessas mudanças está ligada à atuação de diversos fatores, como mostra a Figura 2.10.

Figura 2.10 | Fatores que influenciam a formação do solo, causando as modificações decorrentes do processo pedogenético



Fonte: elaborada pelo autor.

Portanto, os solos correspondem a produtos do intemperismo e suas características podem ser bastante variáveis, mesmo que a rocha subjacente seja a mesma. Caracterizá-lo e entender a sua composição pode facilitar a compreensão sobre sua gênese e identificar possíveis condicionantes ambientais que predisponham o solo a uma maior ou menor vulnerabilidade frente a derrames de óleo, vazamento de contaminantes e resíduos urbanos, entre outras aplicações.

Sem medo de errar

Caro aluno! Agora, para que você não se perca no problema apresentado inicialmente, vamos retomá-lo antes de dar prosseguimento à sua resolução.

Como abordamos anteriormente, o geólogo da GeoConsulting Magma entregou a você um documento contendo informações sobre o meio físico e geológico do local onde se está planejando a implantação do aterro sanitário em um vale. O documento era bem detalhista e informava como era a configuração do vale e também trazia todas as rochas que foram encontradas no local, pois já havia sido feita uma sondagem (perfuração). Com essas informações em mãos, você elaborou, na primeira etapa, o modelo geológico 2D e também respondeu a algumas perguntas sobre a geologia do local.

Agora, nesta segunda etapa, você foi visitar o local para obter algumas informações que lhe ajudem a caracterizar melhor o solo da região, a dar informações sobre os processos que o originaram, bem como descrever algumas características suas. Para refrescar sua memória, foi pedido que você respondesse às seguintes questões: Quais são os tipos de intemperismo responsáveis pela formação do solo? De onde vieram os sedimentos que formam o solo? O solo é pouco ou muito permeável? Que tipo de ambiente de sedimentação foi responsável pela deposição dos sedimentos do solo próximo ao rio?



Atenção

Lembre-se de que, segundo o documento que lhe foi apresentado, e conforme sua visita a campo, o solo do local é um solo residual de arenito e conglomerado.

Sobre o primeiro questionamento, insira no seu relatório que temos, basicamente, dois tipos de intemperismo que atuam sobre a superfície terrestre: o físico e o químico. Como sugestão para investigações complementares, busque elencar quais são os prováveis tipos de intemperismo físico e químico que ajudaram a originar os sedimentos que agora formam o solo da região. Cuidado! Dentre os tipos de intemperismo citados aqui, no livro didático, há alguns que não ocorrem no Brasil e outros que afetam preferencialmente determinados tipos de rochas, portanto, não influenciaram na formação do solo. Lembre-se disso quando realizar este estudo!

Com relação à segunda questão, atente-se, no relatório, para os tipos de processos sedimentares responsáveis pela erosão, transporte e sedimentação dos sedimentos que formam o solo. Segundo as informações que lhe deram, interprete se os sedimentos que cons-

tituem o solo originam-se no próprio local de ocorrência (*in situ*), e, portanto, um solo residual, ou se provieram de outros locais (*ex situ*).

Para responder à terceira pergunta, você precisará se lembrar das características das rochas sedimentares siliciclásticas (neste caso, os arenitos e os conglomerados) e associá-las às características do solo que você encontrou. Lembre-se dos componentes dessas duas rochas e sua textura (principalmente o tamanho dos grãos) e prediga se o solo será pouco ou muito permeável. Dica: rochas/solos formados por partículas finas são pouco permeáveis. Sobre sua última pergunta, busque se lembrar dos ambientes de sedimentação continentais e que próximo ao local de ocorrência desse solo há um ambiente de sedimentação ativo que transporta os sedimentos em seu leito.

Avançando na prática

Geologia ambiental: uma ferramenta de gestão

Descrição da situação-problema

A empresa Auto Posto X quer instalar um novo posto de combustíveis na região do Vale. Para isso, conforme a exigência do órgão ambiental para a liberação da licença de operação, é preciso que a empresa encaminhe um relatório contendo informações sobre o solo do local para que seja analisada a viabilidade da instalação. A localização proposta para que seja construído o posto é bem próxima à localidade onde se está planejando a instalação do Aterro Sanitário. De acordo com uma análise preliminar em imagens de satélite, elas, com o geólogo, constataram que o solo da área é formado por sedimentos depositados em um ambiente fluvial (o qual faz com que haja camadas com sedimentos grosseiros e finos intercalados) e, por isso, há a formação de uma região plana logo ao lado do rio e onde, ao longo dos últimos anos, a cidade tem avançado.

É por essa razão que o dono do Auto Posto X quer expandir os seus negócios para essa região, já prevendo que a expansão da malha urbana poderá lhe trazer benefícios econômicos significativos. Com o objetivo de apresentar as intenções de instalação do posto, o dono do autoposto marcou uma reunião com você na sede da Geoconsulting Magma. Primeiramente, ele começou a dar um breve histórico da empresa e das razões de ampliação dos negócios etc. Feito isso, ele pediu que você apresentasse algo do ponto de

vista ambiental que pudesse ser relevante para o andamento do processo de licenciamento junto ao órgão ambiental.

Já antevendo potenciais problemas, o geólogo da Geoconsulting Magma lhe pediu que respondesse algumas indagações pertinentes. Por exemplo: como o solo da área foi formado e quais tipos de sedimentos são depositados nesse ambiente? Os sedimentos que estão formando o solo são grosseiros ou finos? O solo é poroso e/ou permeável?

Resolução da situação-problema

Conforme apresentado nessa seção, você aprendeu que, por se tratar de um ambiente de sedimentação fluvial, o rio transporta uma variedade de sedimentos que acabam se depositando tanto no canal quanto nas áreas adjacentes, as chamadas planícies de inundação. Portanto, o solo do local é formado pela sedimentação das partículas carregadas pelo rio e sofre alguns processos pedogenéticos para que seja considerado um solo.

Como a dinâmica do ambiente fluvial é bastante complexa, você aprendeu que normalmente os sedimentos grosseiros são transportados e depositados no canal e que os sedimentos finos são sedimentados nas áreas externas ao canal. No entanto, como os canais apresentam avulsão ao longo tempo geológico, é provável que o solo do local seja formado pela alternância de camadas grosseiras e finas. Por último, você viu que, em geral, as camadas arenosas têm alta porosidade e permeabilidade e as finas (argilosas e/ou siltosas) são razoavelmente porosas, mas bastante impermeáveis.

Faça valer a pena!

1. Em 2015, segundo a ONU, foi comemorado o Ano Internacional dos Solos. Essa iniciativa contou com a participação de milhares de pessoas interessadas em práticas sustentáveis visando minimizar a degradação desse importante recurso natural que, acima de tudo, é responsável por fornecer alimentos a todos os seres humanos.

Sobre os processos que levam à formação dos componentes que constituem em solos, é correto afirmar que:

- a) O intemperismo é o processo responsável pela mobilização dos sedimentos originados durante a erosão.

- b) A hidrólise é um dos tipos de intemperismo físico, responsável pela fragmentação do material de origem (rocha).
- c) A erosão corresponde a um processo sedimentar responsável pela mobilização inicial dos sedimentos produzidos pela ação do intemperismo.
- d) Os sedimentos são transportados por diversos agentes, como as variações do nível do mar.
- e) Os sedimentos somente se mobilizam como partículas soltas, como acontecem nos rios.

2. O estudo dos ambientes de sedimentação é muito importante, por exemplo, para a compreensão dos processos que levam os sedimentos a se depositarem e qual sua dinâmica espacial e temporal, visto que esses ambientes são extremamente dinâmicos e complexos. Do ponto de vista aplicado, é necessário estudá-los para compreender como possíveis rochas de reservatório de petróleo são formadas e qual a sua relação com outras rochas, a fim de entender como, numa etapa mais avançada, podemos explorar petróleo e gás de forma mais eficiente.

Sobre os diversos tipos de ambientes de sedimentação e suas características particulares, julgue as alternativas e assinale a correta:

- a) O ambiente fluvial é pouco complexo, sendo possível destacar facilmente onde encontraremos sedimentos grosseiros e finos.
- b) O ambiente de sedimentação marinho é dividido, de um modo geral, em plataforma continental, talude e planície abissal.
- c) O delta é um tipo específico de ambiente de sedimentação que ocorre somente na região continental.
- d) O ambiente de sedimentação marinho é caracterizado por uma plataforma continental que mergulha suavemente até atingir a planície abissal, sendo que normalmente não há um talude.
- e) O ambiente fluvial é muito complexo, onde os sedimentos grosseiros são depositados nas áreas externas ao canal e os finos dentro da calha do rio.

3. O intemperismo é, provavelmente, o principal processo sedimentar que ocorre na superfície da Terra. Sem ele, as rochas não seriam alteradas e, em decorrência disso, os sedimentos não poderiam ser gerados. Consequentemente, não haveria a formação de rochas sedimentares nem solos e o que poderia ser ainda mais drástico, nossa sociedade seria outra porque as águas subterrâneas seriam escassas, restritas aos aquíferos presentes nas rochas cristalinas (como o granito e o basalto), e o petróleo e o gás natural sequer existiriam.

Sobre o intemperismo, seus tipos e características, assinale a opção verdadeira:

- a) O aumento das fraturas geradas pela expansão volumétrica da água causada pelo congelamento é o principal tipo de intemperismo na região Sul do Brasil.
- b) A interferência biológica no intemperismo físico, através da penetração de raízes de plantas, faz com que esse tipo de intemperismo seja fundamental para o enfraquecimento das rochas em regiões desérticas/áridas.
- c) A hidrólise é um tipo de intemperismo responsável pela formação dos argilominerais, bens minerais tão importantes para diversos ramos industriais.
- d) A dissolução caracteriza-se como um tipo de metamorfismo exclusivo das rochas sedimentares siliciclásticas.
- e) A hidratação mineral não causa tipo de alteração na estrutura mineralógica dos minerais, de forma que apenas a superfície do cristal fica molhada.

Seção 2.3

Elementos do ciclo hidrológico e técnicas aplicadas

Diálogo aberto

Prezado aluno! Seja bem-vindo à terceira e última seção da Unidade 2. Para chegar até aqui, você já aprendeu os tipos de rochas sedimentares e como elas são formadas, além disso, você viu os principais conceitos estratigráficos e quais são os tipos de estruturas geológicas que possuímos. Além disso, você também estudou, na seção anterior, os processos sedimentares responsáveis pela fragmentação das rochas, erosão e transporte de suas partículas e também os ambientes nos quais essas partículas (sedimentos) são depositados e os conceitos básicos relacionados à formação dos solos. Para concluir seus estudos, realizaremos a terceira parte deste estudo, mas antes de iniciar, não custa nada voltar à nossa situação fictícia, não é mesmo?

A Geoconsulting Magma foi contratada para a elaboração do projeto e execução de um aterro sanitário em uma região de Vale, o qual possuía rochas ígneas e sedimentares. Visando determinar a viabilidade ambiental do projeto, na primeira etapa, o geólogo lhe pediu um auxílio para elaborar o modelo geológico 2D da área de implantação do projeto e responder a algumas perguntas sobre a geologia do local. Seguindo com o relatório, na Parte 2, você caracterizou a gênese e descreveu as características do solo do local. Agora, para finalizar o relatório, você deverá propor soluções para analisar as águas (superficial e subterrânea). Para que você consiga, finalmente, concluir a viabilidade ambiental do projeto, você precisará responder às seguintes perguntas: Com relação às águas superficiais, quais fatores você levaria em consideração para avaliar o volume e a velocidade do escoamento superficial no local proposto para implantação do aterro? Caso os efluentes gerados pela atividade atinjam as águas subterrâneas, você pensa que a contaminação será local ou afetará mais lugares? Quais análises da água subterrânea você sugeriria serem feitas para garantir a sua potabilidade?

Para ajudar você a responder a essas dúvidas, estudaremos no livro didático o ciclo hidrológico e seus componentes principais em termos de distribuição da água. Isso significa que aprenderemos mais sobre as águas superficiais e subterrâneas, buscando entender seu comportamento e distribuição espacial. Além disso, veremos quais foram os tipos de análises feitas tanto nos solos quanto nas águas para a determinação de sua qualidade e potabilidade. Esses assuntos lhe ajudarão a determinar a viabilidade do projeto proposto à Geoconsulting Magma. Vamos aos estudos? Boa leitura!

Não pode faltar

Na seção anterior, nós vimos, entre outros assuntos, que os processos sedimentares são importantíssimos para a geração, o transporte e o acúmulo de sedimentos em um determinado ambiente de sedimentação. Além disso, aprendemos que a água é um dos principais agentes de transporte. Agora, nessa última seção da Unidade 2, estudaremos mais sobre os elementos do ciclo hidrológico, em especial as águas superficiais e subterrâneas, e quais os métodos mais empregados para a análise da qualidade do solo e das águas.

No entanto, antes de começarmos a falar sobre as águas superficiais, é necessário entender o ciclo da água como um todo. A Figura 2.11 mostra todos os componentes do ciclo hidrológico e os agentes responsáveis pelo seu dinamismo. A análise do ciclo pode ser iniciada através 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.

Figura 2. 11 | O ciclo hidrológico, seus elementos principais e suas relações dinâmicas



Fonte: <<http://water.usgs.gov/edu/watercycleportuguese.html>>. Acesso em: 26 set. 2016.

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 chuva ou gelo. Ao atingir a superfície terrestre, a água poderá tomar vários caminhos, mas aqui destacaremos apenas dois: 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. Para que isso aconteça, há alguns fatores que são importantes analisarmos: 1º) em termos climáticos, destacamos a intensidade e a duração da precipitação. Quanto mais intensa é a precipitação, mais rápido o solo atingirá sua capacidade de infiltração, causando o direcionamento do excesso para o fluxo superficial. Além disso, quanto maior a duração da chuva, maior a chance do escoamento superficial ocorrer de forma intensa; 2º) os aspectos fisiográficos,

dentre os quais se destaca a área e a forma da bacia hidrográfica, a capacidade de infiltração, a permeabilidade do solo e a topografia da bacia. A área da bacia influencia o total de água captada, afinal, quanto maior a área da bacia, maior a quantidade de água concentrada nela. A forma da bacia influenciará a possibilidade da ocorrência de inundações, afinal, 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. Este 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 determinará, principalmente, a velocidade de escoamento da água, de forma que bacias íngremes (como as situadas em vales) apresentam um escoamento superficial mais rápido e volumoso, devido à menor chance de infiltração; e 3º) obras hidráulicas, como barragens, aprisionam o escoamento d'água à montante, de modo que retarda seu deslocamento à jusante, enquanto que rios retificados e canalizados permitem um escoamento mais rápido.



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.

Quando analisamos o escoamento nos rios, há alguns parâmetros fundamentais que utilizamos. O primeiro deles é 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.

Outra variável medida é a altura que o nível d'água (NA) atinge em relação a um nível de referência. Referimos à cheia quando há uma elevação acentuada do nível d'água que, no entanto, permanece restrito ao leito normal do rio. Já inundação, por sua vez, é utilizada quando se eleva de forma não usual e atinge regiões externas ao leito normal, ou seja, há um transbordamento. Outro parâmetro importante é o 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). De acordo com a ASCE (*American Society of Civil Engineers*), somente para exemplificar, este valor varia de acordo com a natureza da superfície, por exemplo: no asfalto, o valor de C equivale a 0,7 – 0,95, enquanto que sob uma grama em solo arenoso, num local plano, o valor é entre 0,05 – 0,10.

Isso significa que em um solo arenoso, teoricamente, haverá maior probabilidade de infiltração da água, ou seja, a maior porcentagem da água que atinge o solo, irá para o subsolo. Na realidade, boa parte da água que atinge os continentes não infiltra somente em solos porosos e permeáveis, mas também por meio de fraturas nas rochas. Ao percolarem, tanto nos solos quanto nas rochas, essas águas atingirão um reservatório subterrâneo, denominado aquífero, mas cuidado, nem todo reservatório de água subterrânea é um explorável. Definimos aquífero como camadas geológicas que armazenam e transmitem água subterrânea em quantidade suficiente para o abastecimento.



Assimile

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

Naturalmente, no entanto, há rochas/solos que não podem ser consideradas aquíferos, visto que suas propriedades hidráulicas não são favoráveis à estocagem e escoamento da água.



Aquicludes: embora armazenem água, não possuem a capacidade de liberá-la devido à sua baixíssima permeabilidade (exemplo, argila/argilito).

Aquitardes: são capazes de armazenar água, mas a liberam muito lentamente, pois possuem porosidade e permeabilidade baixas (exemplo, arenito com matriz argilosa);

Aquifugos: não possuem capacidade nem de armazenar nem de transmitir a água, pois não há porosidade e permeabilidade (exemplo, granito não fraturado).

Embora esses conceitos pareçam ser confusos, eles são importantíssimos, pois no subsolo temos exemplos reais desses tipos de camadas, as quais favorecem ou impedem o fluxo d'água subterrâneo.

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. Logo, quanto mais espaços vazios houver na rocha/solo, maior será a quantidade de água disponível para se movimentar. A propriedade que nos permite avaliar a facilidade com que a água flui é a permeabilidade que, normalmente, é maior se a porosidade também for alta. Embora, a permeabilidade não dependa somente da porosidade, mas também da forma dos poros, da conectividade entre eles e da tortuosidade (o quão sinuoso é o caminho entre os poros). A força que atua na movimentação vertical da água subterrânea é a força da gravidade, que conduz a água regiões mais profundas, até que 100% do espaço poroso seja preenchido por água. Quando a saturação atingir esse ponto, não há mais como armazenar água, pois o espaço poroso já se encontra totalmente preenchido.

Entretanto, haverá camadas 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 a 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 se movimentará das zonas onde a superfície freática está mais alta para as partes onde a superfície se encontra mais abaixo, conforme mostra a Figura 2.12.

Figura 2.12 | Movimento da água subterrânea, sup. freática (principal e local) e olhos d'água em uma região de vales



Fonte: Wincader e Monroe (2009).

Como você pode também observar na Figura 2.12, a água subterrânea guarda uma estreita relação com os rios. Quando os rios recebem o aporte de água subterrânea, como no caso da Figura 2.12, 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. 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 2.12 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 interpretação sobre a direção de fluxo das águas subterrâneas é realizada 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. Denominamos essa representação cartográfica de mapa potenciométrico, muito útil para o entendimento da direção de fluxo da água subterrânea.



Pesquise mais

As águas subterrâneas são importantíssimas, não há dúvidas, pois são fontes de águas estratégicas. Sugerimos, portanto, que você se aprofunde um pouco mais nos estudos lendo o Capítulo 13, de Wincader & Monroe (2009), disponível na sua biblioteca virtual.

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

Do ponto de vista ambiental, além do estudo das águas superficiais e subterrâneas, é importantíssimo fazermos as análises tanto das águas quanto dos solos, afinal, ambos estão intrinsicamente relacionados. Os padrões de comparação para a análise das águas e dos solos estão fundamentados em resoluções e/ou portarias divulgados por órgãos governamentais competentes. O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), divulgou, em 2005, a resolução nº 357 (BRASIL, 2005), que contém os parâmetros de análise das águas superficiais, considerando as classes (doce, salobras, salinas etc.) e os usos preponderantes (consumo humano, irrigação, proteção das comunidades aquáticas, dessedentação animal, entre outros). O mesmo órgão publicou, em 2008, a resolução nº 396 (BRASIL, 2008) que, no sentido similar da resolução anterior, contém valores orientadores para enquadramento das águas subterrâneas, considerando suas classes e usos preponderantes. Adicionalmente, também dispomos de uma portaria do Ministério da Saúde (MS), nº 518/2004 (BRASIL, 2004), que contém os padrões de potabilidade das águas superficiais e subterrâneas.

No entanto, para aprendermos a interpretar o que esses documentos oficiais nos trazem, é importante que conheçamos os tipos

de análise da água. A grosso modo, as águas são avaliadas segundo suas características bacteriológicas e físico-químicas. Os métodos de análise bacteriológicos se encarregam da análise dos microrganismos presentes nas águas, visando garantir que, para a sua potabilidade, não haja a ocorrência de microrganismos patogênicos e bactérias indicadoras de contaminação fecal. Os indicadores de contaminação fecal, tradicionalmente aceitos, pertencem a um grupo de bactérias denominadas coliformes, sendo que a principal representante desse grupo chama-se *Escherichia coli* (FUNASA, 2006), uma bactéria termotolerante. Além disso, também são contabilizados outros tipos de bactérias, com o objetivo de analisar os coliformes totais e bactérias heterotróficas.

Com relação aos parâmetros físico-químicos, discriminados nas resoluções do CONAMA e portaria do MS apresentadas acima, há diversas variáveis que podemos analisar. Dentro as principais, podemos citar:

- Dureza total, que se refere à soma das concentrações de íons de Ca e Mg na água.
- pH, que representa a concentração de íons de H na solução.
- Sólidos totais dissolvidos (STD), que é representativo de todas as substâncias orgânicas e inorgânicas presentes na água.
- Cor, que é o aspecto visual da água em comparação a um determinado padrão.
- Turbidez, que corresponde ao grau de atenuação da intensidade da luz devido à presença de sólidos em suspensão (partículas orgânicas e inorgânicas).
- Temperatura (°C) da água.
- Oxigênio dissolvido, que se refere ao oxigênio proveniente dos organismos aquáticos fotossintetizantes e também do oxigênio atmosférico.
- Condutividade elétrica, que corresponde à capacidade da água em transmitir corrente elétrica (ou imprimir uma resistência à passagem da corrente).
- Elementos químicos maiores (> 5 mg/l Ca, Mg, Na), menores (0,01 a 10 mg/l → K, Fe, Sr, B) e traços (< 0,1 mg/l → V, Se, Ag), e também compostos orgânicos.

Os elementos químicos e compostos orgânicos são importantíssimos para avaliar a qualidade da água, principalmente se considerarmos os elementos/compostos radioativos, cancerígenos e carcinogênicos. Por exemplo, Urânio (U), Chumbo (Pb), Mercúrio (Hg), Arsênio (As), entre outros, são extremamente danosos à saúde humana e sua concentração, em mg/L, deve ficar restrita à uma pequena faixa. Adicionalmente, os compostos orgânicos, como o Cloreto de Vinila (C_2H_3Cl) ou 1,2-Dicloroetano ($C_2H_4Cl_2$), presentes nos postos de combustíveis e indústrias químicas, também possuem uma concentração restrita, devido à sua toxicidade. Para exemplificarmos, a Tabela 2.1 mostra os Valores Máximos Permitidos (VMP) de alguns elementos químicos e compostos orgânicos, em mg/L, considerando como uso preponderante o consumo humano.

Tabela 2.1 | Valores máximos permitidos de alguns elementos, segundo a Resolução nº 396, do CONAMA (BRASIL, 2008).

Parâmetro	Valor Máximo Permitido (mg/L)
Inorgânicos	
As (Arsênio)	0,01
Cd (Cádmio)	0,005
Hg (Mercúrio)	0,001
Se (Selênio)	0,01
Zn (Zinco)	5
Na (Sódio)	200
Orgânicos	
Benzeno	0,005
Benzo pireno	0,00005
Cloreto de Vinila	0,005
Tetracloro de carbono	0,002

Fonte: Brasil (2008).



Refleta

Considerando que o Cloreto de Vinila, que segundo a Resolução nº 396/2008, do CONAMA, possui VMP de 0,005 mg/L e é extremamente tóxico, o que você pode concluir do benzeno e do benzo pireno?

Complementarmente, os solos também podem ser analisados de acordo com alguns parâmetros gerais, que se dividem em: a) físicos; b) químicos; e c) mineralógicos. Os atributos físicos analisados podem ser variados, e aqui explicaremos apenas os principais: i) a granulometria, que determina as frações de tamanho dos minerais/grão que compõem o solo; ii) a densidade, representada em g/cm^3 , que ajuda a definir a composição do solo; iii) a porosidade, que refere-se ao cálculo do volume do solo ocupado com ar/água; e iv) a condutividade hidráulica, que mede a velocidade com que a água se movimenta no solo; entre outros.



Exemplificando

Os ensaios granulométricos, feitos com a utilização de um peneirador (abaixo), são os mais comuns de serem vistos na prática profissional. Esse método é extremamente útil para a determinação dos aspectos texturais do solo.

Figura 2.13| Peneirador utilizado em ensaio granulométrico



Fonte: <<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/58/PeneiradorMecanico.jpg>>. Acesso em: 27 set. 2016.

As análises químicas dos solos podem ser feitas de vários modos, mas, do ponto de vista ambiental, restringem-se basicamente à identificação dos elementos químicos presentes, da mesma forma que a água. Alguns outros parâmetros, no entanto, merecem des-

taque. O carbono orgânico total (COT) estima a quantidade de carbono na matéria orgânica do solo, em relação à massa total. Outro parâmetro de destaque é a Capacidade de Troca de Cátions (CTC), que mede a capacidade de certos minerais (por exemplo: caulinita, illita etc.) de adsorverem cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}) em sua superfície, liberando-os gradativamente, favorecendo a fertilidade do solo.

Por último, ainda é possível realizar análises dos componentes minerais dos solos. Para isso, é possível fazer a confecção de lâminas delgadas dos solos, com o objetivo de identificar os minerais silicáticos presentes. Para a identificação dos tipos de argilas do solo, aplica-se o difratômetro de raios-X, de forma que seja possível caracterizar os argilominerais. Essas análises mineralógicas podem ajudar a entender quais minerais formam os solos, objetivando entender a origem do solo (gênese) ou, em termos práticos, identificar a presença de argilas expansivas que possam causar danos a estruturas civis, entre outras aplicações.

Sem medo de errar

Caro aluno! Chegamos ao final da Unidade 2, portanto, para lembrá-lo, vamos retomar o desafio lançado inicialmente. O geólogo contratado pela GeoConsulting Magma entregou a você um documento contendo informações sobre o meio físico e geológico sobre o local, onde se está planejando a implantação de um aterro sanitário em um Vale. O documento era detalhista e informava como era a configuração do vale, destacando as rochas que foram encontradas no local, pois já havia sido feita uma sondagem (perfuração). Com essas informações em mãos, você elaborou, na primeira etapa, o modelo geológico 2D e também respondeu a algumas perguntas sobre a geologia do local. Dando sequência ao trabalho, na segunda etapa, você caracterizou a gênese e descreveu as características do solo do local.

Nesta última etapa, agora você deverá propor soluções para analisar as águas (superficial e subterrânea). Ao fazer isso, você poderá, finalmente, definir a viabilidade ambiental do projeto. Para tanto, você terá que responder às perguntas relacionadas ao conteúdo, que são: com relação às águas superficiais, quais fatores você levaria em consideração para avaliar o volume e a velocidade do es-

escoamento superficial no local proposto para implantação do aterro? Caso os efluentes gerados pela atividade atinjam as águas subterrâneas, você pensa que a contaminação será local ou afetará mais lugares? Quais análises da água subterrânea você sugeriria serem feitas para garantir a sua potabilidade?

Para responder ao primeiro questionamento, você deve se lembrar de que há alguns fatores importantes relacionados ao escoamento superficial, dentre eles: intensidade e duração da precipitação; aspectos fisiográficos, dentre os quais se destacam a área e a forma da bacia hidrográfica, a capacidade de infiltração, a permeabilidade do solo e a topografia da bacia; e, por último, a ocorrência de obras hidráulicas (como barragens), rios canalizados ou retificados etc. Lembre-se de que a velocidade de escoamento da água em bacias íngremes (como as situadas em vales) apresentam um escoamento superficial mais rápido e volumoso, devido à menor chance de infiltração.

Sobre a segunda pergunta, você deverá se atentar para o fato de que as águas subterrâneas se deslocam das porções onde a superfície freática está mais alta para regiões onde ela está mais baixa, devido à diferença de pressão a qual a água subterrânea está submetida. Além disso, lembre-se de que ao se movimentarem, as águas subterrâneas, eventualmente, interagirão com os rios, de forma a configurar rios efluentes e influentes. Para ajudá-lo, analise novamente a Figura 2.12, sobre o movimento da água subterrânea, e imagine a instalação de um aterro sanitário naquele local, isso facilitará o seu entendimento. Com isso, concluindo o questionamento, caso os efluentes atinjam e fluam em direção ao rio, o impacto da atividade não será apenas local, mas abrangerá outras áreas.

Para finalizar e responder à última questão, lembre-se de que as águas subterrâneas precisam ser analisadas conforme dois aspectos distintos, ou seja, tanto bacteriologicamente quanto físico-quimicamente. Não esqueça que, para analisar a potabilidade da água, existem dois documentos úteis para a comparação dos parâmetros de análise: 1º) a Resolução nº 396, do CONAMA (BRASIL, 2008); e 2º) a Portaria nº 518/2004, do Ministério da Saúde. Como vimos, ambos devem ser consultados para comparar os resultados dos elementos químicos e dos coliformes fecais presentes na água.

Águas subterrâneas e seus conflitos

Descrição da situação-problema

O Seu Zé, proprietário da Fazenda Rio Branco, possui uma extensa plantação de milho, soja e trigo, distribuída ao longo de 50 hectares de terra disponível para plantio. Como ele produz muitos grãos, necessita de muita água para fazer a irrigação de sua lavoura. No entanto, vizinhos à sua propriedade, há inúmeros outros sítios menores, de pessoas que se dedicam ao plantio de hortaliças e verduras para subsistência própria. Algumas dessas propriedades, inclusive, não possuem local correto para destinação de esgoto, de forma que muitos construíram fossas domésticas sem nenhum tipo de impermeabilização adequada.

O terreno que o Seu Zé possui está em uma localidade que fica topograficamente mais abaixo dessas propriedades mencionadas acima e, segundo ele apurou, a medida da superfície freática que fez em seu poço é mais baixa do que a medida nos poços desses vizinhos. Como o Seu Zé quer instalar mais um poço para retirar água subterrânea, ele consultou a GeoConsulting Magma para perguntar algumas coisas. Logo, você e o geólogo da empresa foram convocados para essa reunião. As dúvidas eram as seguintes: considerando a localização do terreno, como é possível saber se as águas subterrâneas estão fluindo em direção à propriedade? Caso isso esteja acontecendo, como analisar a qualidade da água que chega no poço?

Resolução da situação-problema

Para responder às questões, você precisa se lembrar de alguns conceitos sobre as águas subterrâneas. Conforme aprendeu nessa seção, as águas subterrâneas localizadas na zona saturada (que é de onde são extraídas as águas dos poços) movimentam-se lateralmente através da diferença de gradiente hidráulico, isto é, devido à diferença de pressão que a água subterrânea está submetida. Isso significa que, geralmente, a água se movimentará das zonas onde

a superfície freática (que é o limite superior da zona saturada) está mais alta para as partes onde a superfície se encontra mais abaixo. No entanto, vimos também que, para interpretar corretamente o fluxo d'água subterrâneo, é preciso obter essa medida em vários pontos (poços de abastecimento, poços de monitoramento, piezômetros etc), de forma que seja possível posicioná-las espacialmente. Dessa maneira, podemos construir um mapa de isovalores que representam a posição relativa dessa superfície, denominado de mapa potenciométrico. É este produto cartográfico que indicará com precisão para qual direção a água está fluindo.

Para analisar a qualidade da água no poço do Seu Zé, ressaltando novamente, é preciso fazer análises físico-químicas e bacteriológicas. Estas definirão se as fossas dos vizinhos estão contaminando a água do Seu Zé e, além disso, possibilitarão estabelecer se os outros parâmetros dos elementos químicos (como Cl, N etc.), estão dentro dos padrões aceitos pelos órgãos ambientais.

Faça valer a pena!

1. O Aquífero Alter do Chão, localizado entre os estados do Amazonas, Amapá e Pará, no Norte do Brasil, é considerado hoje o maior aquífero do mundo, com o dobro de volume de água doce se comparado ao aquífero Guarani, 86 mil quilômetros cúbicos de água.

O ciclo hidrológico é fundamental para a existência da vida na Terra e sobre o escoamento superficial, este que é fundamental para o ciclo, é correto afirmar:

- a) O escoamento superficial é realizado pelos lagos e lagoas.
- b) O escoamento superficial é realizado pelos lagos e rios.
- c) O escoamento superficial é realizado pelos rios e lagoas.
- d) O escoamento superficial é realizado por rios e córregos.
- e) O escoamento superficial é realizado por córregos e lagos.

2. A região Nordeste do Brasil há séculos é castigada pela seca, ou seja, falta de precipitação, e segundo a Organização Meteorológica Mundial (OMM), agência das Nações Unidas especializada em monitorar eventos climáticos, a seca que ocorreu no semiárido nordestino entre 2012-2013, foi a pior dos últimos 50 anos.

Fonte: <<http://www.senado.gov.br/noticias/jornal/emdiscussao/escassez-de-agua/materia.html?materia=sertao-enfrenta-a-pior-seca-em-50-anos.html>>. Acesso em: 27 set. 2016.

Uma das soluções imediatas para a falta de água, é a perfuração de poços de reservatório de água subterrânea e sobre eles é correto afirmar:

- a) O aquíclode, é um bom tipo de reservatório de água, pois apresenta alta permeabilidade e porosidade.
- b) O aquítarde é um bom tipo de reservatório de água, pois apresenta alta permeabilidade e porosidade.
- c) O aquífugo é um bom tipo de reservatório de água, pois apresenta alta permeabilidade e porosidade.
- d) O aquífugo é um bom tipo de reservatório de água, pois apresenta alta porosidade e baixa permeabilidade.
- e) O aquífero é um bom tipo de reservatório de água, pois apresenta alta permeabilidade e alta porosidade.

- 3.** Segundo dados da Organização Mundial da Saúde, a OMS, cerca de 1,8 bilhões de pessoas não têm acesso à água potável, o que representa cerca de 25% da população mundial. Por definição, à água potável é a água contaminada que foi tratada por um processo químico e físico, tornando-a própria para consumo humano.

Fonte: <<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs391/en/>>. Acesso em: 27 set. 2016.

A avaliação da qualidade das águas leva em consideração suas características bacteriológicas e físico-químicas. Sobre os parâmetros físico-químicos, é correto afirmar que:

- a) O pH refere-se à concentração de íons de hidrogênio na solução.
- b) O pH refere-se à concentração de íons de oxigênio na solução.
- c) A dureza total refere-se à soma das concentrações de íons de Ca e Pb na água.
- d) A dureza total refere-se à soma das concentrações de íons de Mg e Pb na água.
- e) A condutividade elétrica refere-se à capacidade da água em armazenar energia.

Referências

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. **Resolução CONAMA nº 396, de 7 de abril de 2008**. In: Resoluções, 2008. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=562>>. Acesso em: 21 out. 2016.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. **Resolução CONAMA nº 357, de 18 de março de 2005**. In: Resoluções, 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>>. Acesso em: 21 out. 2016.

BRASIL. Ministério da saúde. **Portaria nº 518, de 25 de março de 2004**. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativas ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Diário Oficial da União da República Federativa do Brasil, Brasília, 26 mar. 2004.

FUNASA. **Manual prático de análise de água**. 2. ed. rev. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2006.

POPP, Jose Henrique, **Geologia geral**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

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

TEIXEIRA, W. et al. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2001.

SEDIMENTOS e rochas sedimentares. Produção de Rodrigo Gomes Noreira et. al. Universidade de São Paulo. São Paulo: Estúdio Multimeios/ Centro de Computação Eletrônica. 2011. Videoaula. Disponível em: <<http://eaulas.usp.br/portal/video.action?idItem=384>>. Acesso em: 5 set. 2016.

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

Fundamentos de paleontologia

Convite ao estudo

Caro aluno! Adentramos agora na Unidade 3 da disciplina de *Geologia e Paleontologia*. A partir de agora passaremos a estudar os principais assuntos que norteiam os fundamentos de paleontologia. Deixamos de lado os aspectos de geologia aplicada para aprendermos mais sobre os fósseis e sua importância na compreensão dos princípios básicos da geologia e paleontologia fundamentados em uma visão evolutiva.

O objetivo, desta unidade, é que você saiba os fundamentos da paleontologia. Para isto, é importante que você conheça o que são fósseis, quais são seus tipos e como eles se formam e ficam preservados. Além disso, você aprenderá como eles são utilizados para auxiliar na compreensão da evolução da vida e do tempo geológico e de que forma os fósseis e os microfósseis são utilizados para delimitar ambientes geológicos pretéritos (do passado), contribuindo na reconstrução paleobiogeográfica e paleoecológica, importantes ferramentas aplicadas, inclusive, na indústria petrolífera.

Para você visualizar e aplicar melhor os conteúdos que serão apresentados na unidade, continuemos com nossas situações, agora da seguinte maneira: a GeoConsulting Magma recebeu um pedido do Ministério Público para elaborar um laudo sobre o conteúdo fossilífero encontrado durante as obras de instalação de uma indústria na cidade de Mafra/SC. O objetivo do laudo é apresentar para a comunidade que a área apresenta conteúdo fossilífero relevante e, conforme a legislação em vigor, deve ser preservada. Como o laudo deverá ser um documento completo, seu trabalho será dividido em três etapas: 1ª) realizar a conceituação de fóssil, processos fossilizadores e preservação; 2ª) detalhar a importância dos

fósseis para compreensão da evolução da vida e do tempo geológico; e 3ª) explicar se os fósseis e os microfósseis da região podem ser utilizados para caracterizar os ambientes do passado.

No fim da unidade, ao unir as três partes, teremos produzido o laudo paleontológico solicitado à empresa. Entretanto, possíveis questionamentos podem surgir, como: o que são fósseis e qual é a sua importância? Como está estabelecido o tempo geológico e por que o estudamos? De que forma estudamos os ambientes do passado (paleoambientes)?

Para confeccionar esse documento e responder a esses e outros questionamentos que serão apresentados aqui, estudaremos, nesta unidade, desde o conceito de fóssil, tipos e processos de fossilização até preservação fossilífera. Além disso, veremos a importância dos fósseis para a compreensão da evolução biológica e geológica, abordando alguns fósseis-guia importantes. Complementarmente, destacaremos alguns conceitos paleobiogeográficos, veremos os microfósseis e de que forma eles nos auxiliam na determinação dos paleoambientes de sedimentação. Portanto, é fundamental que você leia o seu livro didático. Vamos aos estudos? Boa leitura!

Seção 3.1

Princípios de paleontologia

Diálogo aberto

Caro aluno! Nessa primeira seção da Unidade 3, intitulada “*Princípios de paleontologia*”, você elaborará a primeira etapa do laudo sobre o conteúdo fóssilífero: conceituação de fóssil, processos fossilizadores e preservação.

Lembre-se de que a Geoconsulting Magma foi contratada para a elaboração desse laudo, pois uma indústria pretende se instalar na cidade de Mafra/SC. Independentemente do setor que esta indústria atuará, há uma série de leis que protegem o patrimônio paleontológico e, portanto, a elaboração desses laudos é fundamental. Você concorda?

Para dar andamento, imagine que você foi atrás de informações que lhe ajudam na confecção do laudo e você conseguiu identificar que em Mafra/SC afloram rochas da Formação Rio do Sul, a qual apresenta folhelhos e siltitos cinzas, entre eles o Folhelho Lontras, riquíssimo em conteúdo fóssilífero. Segundo sua pesquisa, é justamente nessa unidade geológica que se encontram os principais fósseis da região, os quais são constantemente utilizados por pesquisadores nacionais e internacionais para ensino e pesquisa.

No entanto, já no escritório da empresa, fazendo sua pesquisa e se preparando para iniciar a elaboração da parte inicial do laudo, algumas dúvidas fundamentais precisam ser respondidas a fim de dar prosseguimento à confecção do laudo: o que é um fóssil? Como eles são formados e como ficam preservados? Quais são os processos que levam à sua fossilização? Existem lugares onde há uma boa preservação fóssilífera?

Para começar a responder a essas dúvidas, você aprenderá, nesta seção, o que é um fóssil, quais são os principais tipos e quais são as condições necessárias para que eles fiquem preservados e quais os processos de fossilização envolvidos na sua conservação. Além disso, você verá que existem locais específicos na Terra em que os

fósseis se encontram extremamente bem preservados, os *Lagerstätten*. Esses conteúdos, com certeza, lhe ajudarão a deixar seu relatório com mais qualidade e bastante acurado.

Não pode faltar

Você terminou a Unidade 2 e, com isso, adquiriu todos os conhecimentos para dar continuidade à sua aprendizagem em geociências. Estudaremos, a partir de agora, a paleontologia. Como você já deve imaginar, a paleontologia se dedica ao estudo dos fósseis, que são os registros da vida antiga. Por isso, como toda ciência, para fazer paleontologia, o profissional que se dedica a esta atividade segue um método científico. Logo, ele descreverá e classificará os fósseis, além disso, ele também deverá entender a evolução e a interação dos seres pré-históricos com seus antigos ambientes, compreender a distribuição e a possibilidade de datação das rochas portadoras de fósseis. No entanto, a utilidade da paleontologia não para por aí, empresas de consultoria ambiental, grandes construtoras e empresas petrolíferas possuem profissionais dessa área, ou seja, a ciência paleontológica não é importante somente para a ciência, mas para o desenvolvimento planejado e sustentável da nossa sociedade.

Por ser uma ciência que agrega conceitos de várias áreas para entender a vida do passado, a paleontologia relaciona-se com a geografia (paleogeografia), a climatologia (paleoclimatologia), a ecologia (paleoecologia), e muitas outras áreas, ou seja, é uma ciência interdisciplinar por natureza, literalmente. No entanto, antes de começarmos a conhecer mais sobre os fósseis, é importante conhecer o que é um fóssil e quais são os seus tipos. A palavra fóssil tem origem do latim e significa “ser desenterrado” ou “extraído da terra”. Logo, os fósseis são restos ou vestígios (traços) de animais, vegetais e de outros microrganismos (por exemplo, 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, podemos dividir os fósseis 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 (Figura 3.1A), folhas etc. Além disso, é comum que essas partes duras deixem impressões, moldes e contramoldes nas rochas, enquanto que os próprios restos não ficam preservados. Os fósseis-traço, por sua vez, são mais conhecidos como vestígios, pois compreendem o registro das atividades que os organismos desenvolveram, enquanto vivos, e que agora se encontram gravados em um substrato. Pegadas, pistas (sequência de pegadas), perfurações, escavações etc. Interessante notar que incluímos como vestígios os ovos e os ninhos fossilizados e também os coprólitos (Figura 3.1B), isto é, as fezes fossilizadas dos animais.

Embora as partes duras sejam as que mais ficam preservadas, em casos excepcionais, é possível que partes moles (tecidos, vasos sanguíneos, vísceras) também fiquem registradas e, 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).



Vocabulário

Para enriquecer o seu vocabulário, podemos também destacar os seguintes termos:

- **Fósseis químicos:** preservação de biomoléculas (proteínas, ácidos nucleicos etc.).
- **Fóssil-vivo:** organismos presentes no registro fóssil e que se encontram ainda viventes.
- **Pseudofóssil:** marcas, impressões e objetos inorgânicos que se parecem a fósseis verdadeiros.

Figura 3.1 | Exemplo de fóssil corpóreo (A) e fóssil traço/vestigio (B)

Tronco fossilizado de gimnosperma
(Fm. Santa Maria, Bacia do Paraná)



Fonte: Soares (2015a, p. 22).

Coprólito de tetrápode (Fm. Santa Maria, Bacia do Paraná)



Fonte: Soares (2015a, p. 22).

No entanto, para que possamos estudá-los, é necessário que esses registros fossilíferos fiquem preservados, caso contrário, não seria possível. Isso ocorre através da fossilização, que é um conjunto de processos de ordem física, química e biológica que evita a decomposição natural do ser que morre. Para que isso ocorra, é necessário algumas condições, entre elas: i) rápido soterramento – evitando que o intemperismo haja 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.

Existe uma extensa gama de processos de fossilização e estudá-los a fundo seria impossível. Aqui destacaremos alguns tipos principais que ocorrem nos grupos apresentados anteriormente. Como

os restos são, normalmente, partes duras dos organismos, estas 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 ocorre de forma total (preservação total) quando são preservadas as partes duras e moles dos organismos, acontecendo sob condições excepcionais, como no caso do âmbar (Figura 3.2A) e criopreservação (gelo) (Figura 3.2B). O âmbar nada mais é do que uma resina viscosa secretada por algumas gimnospermas e, por possuir um odor característico muito forte, acaba atraindo alguns invertebrados que, consequentemente, atraem outros animais que ficam presos na resina e, por não conseguirem escapar, ficam englobados por ela. Ao secar, o âmbar 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, com isso, acaba preservando muito bem alguns seres vivos.



Assimile

Fósseis corpóreos ou restos são partes duras preservadas dos organismos e fósseis-traço ou vestígios são registros da ação dos organismos, sem preservação de fragmentos corpóreos.

Em ambos os casos 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. A carbonificação (incarbonização) ocorre quando o carbono presente nos organismos fica preservado, enquanto os outros minerais foram perdidos (Figura 3.2C). Esse processo é mais comum em restos vegetais depositados em condições de baixa concentração de O_2 , como nos fundos de lagos. Com o aumento da pressão causada pelo soterramento de camadas sucessivas, os elementos voláteis da matéria orgânica (nitrogênio, oxigênio e hidrogênio) são eliminados e o carbono permanece, causando um aspecto escuro, visível até mesmo a olho nu.

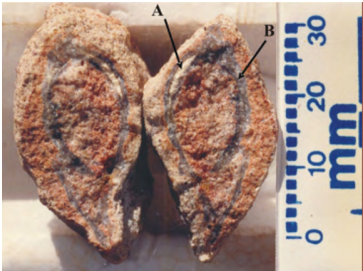
A recristalização (Figura 3.2D) ocorre quando minerais instáveis são modificados em outras formas minerais mais estáveis às atuais condições geológicas, diferentes da época em que o organismo ainda estava vivo. Esse rearranjo mineralógico é comumente visto em conchas e exoesqueleto de alguns organismos e, corriqueiramente, chega a destruir algumas feições associadas à morfologia dos restos. Note, entretanto, que não há modificação química (composicional), somente alteração da estrutura mineralógica, como no caso da transformação da aragonita para calcita.

A modificação química implicará a ocorrência de outro processo de fossilização, denominado de substituição. Nesse processo, o mineral original dos restos é substituído por outro, pois este último 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 (Figura 3.2E); 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 (Figura 3.2F), isto é, 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 bastante peculiar é a permineralização (Figura 3.2G), que acontece quando os sedimentos que se encontram ao redor do fóssil são transportados para cavidades ou pequenas fraturas que ocorrem nos fósseis. Esse transporte é facilitado pela percolação da água que transporta, inclusive, algumas substâncias solubilizadas que, ao se precipitarem nos espaços vazios, formam novos minerais. Algumas vezes isso ocorre acompanhado de um aumento de volume, fazendo com que o fóssil apresente um aspecto inchado.

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, precipita alguns minerais (Figura 3.2H). Com isso, normalmente há o desenvolvimento de nódulos (mais comumente de carbonato de cálcio) que protege o fóssil, preservando-o de forma quase íntegra.

Figura 3.2 | Exemplos de processos de fossilização responsáveis pela preservação dos restos

A	B
 Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b6/Amber2.jpg>. Acesso em: 7 nov. 2016.	 Fonte: Soares (2015a, p. 93).
C	D
 Fonte: <https://goo.gl/ou83Xt>. Acesso em: 7 nov. 2016.	 Fonte: Soares (2015a, p.93).

E	F
 Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f7/Bulypyrite.jpg>. Acesso em: 7 nov. 2016.	 Fonte: Soares (2015a, p. 97).
G	H
 Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/57/Petrified_forest_log_2_md.jpg>. Acesso em: 7 nov. 2016.	 Fonte: Soares (2015a, p. 98).

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 for preenchido por sedimentos nas cavidades internas e seu exoesqueleto for dissolvido posteriormente, o molde resultante será o interno. Caso o registro seja da superfície do organismo, seu molde será externo (Figura 3.3B), pois gravará as feições da parte externa do animal. 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.

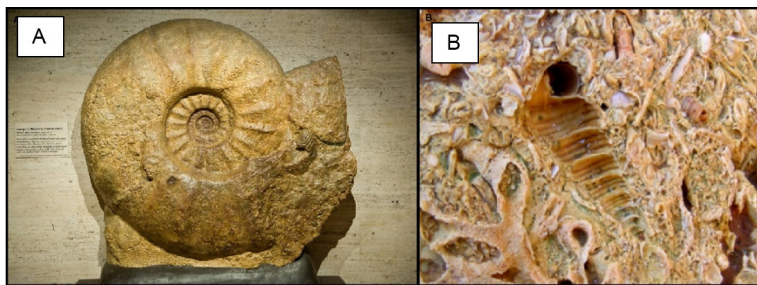
Dessa maneira, teremos um contramolde (Figura 3.3A).



Exemplificando

Seguem dois exemplos:

Figura 3.3 | contramolde (A) e um molde externo (B)



Fonte: (A) https://c1.staticflickr.com/3/2245/2142233928_912c0633c0_b.jpg. Acesso em: 07 de novembro de 2016.

Fonte: <http://webpages.fc.ul.pt/~cmsilva/Paleotemas/Moldagem/Moldagem.htm>. Acesso em: 07 de novembro de 2016.

Fonte: (A) <https://c1.staticflickr.com/3/2245/2142233928_912c0633c0_b.jpg e (B) <http://webpages.fc.ul.pt/~cmsilva/Paleotemas/Moldagem/Moldagem.htm>>. Acesso em: 7 nov. 2016.

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 fóssilífera são lagos, lagoas, mares, mangues, pântanos, entre outros, com sedimentos finos em suspensão e relativamente profundos, de modo que haja pouco O_2 no fundo do corpo aquoso.



Reflita

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?

Em alguns lugares do mundo, as condições foram tão propícias que os fósseis são encontrados em abundância e seu grau de preservação é excepcional. Esses locais são conhecidos como *Lagerstätten* (do alemão *Lager* ‘armazém, jazimento’ e *Stätte* ‘lugar’), e estão distribuídos ao longo do globo em várias bacias sedimentares antigas (Pré-cambriano < 545 milhões de anos) e recentes (Pleistoceno > 26 mil anos). Os fósseis ali preservados auxiliam no entendimento paleontológico de vários períodos geológicos, aumentando o grau de detalhamento do conhecimento científico acerca da vida no passado.

Os especialistas dividem os *Lagerstätten* em dois tipos: 1) *Konzentrat-Lagerstätten*; e 2) *Konservat-Lagerstätten*. O primeiro refere-se aos depósitos concentrados, onde houve uma especial acumulação de partes duras desarticuladas dos organismos, que foram transportados por algum mecanismo físico (água, gelo etc.). O segundo está relacionado a depósitos com elevado grau de conservação tanto dos restos quanto dos vestígios fossilíferos, fornecendo informações cruciais sobre a evolução biológica. O Quadro 3.1 contém alguns exemplos de *Lagerstätten* encontrados em diferentes períodos geológicos, em distintos locais do mundo, inclusive no Brasil.

Quadro 3.1 | Alguns exemplos de *Lagerstätten*, destacando seu período geológico e importância científica

Período (Ma)	Nome/Local	Importância
Pré-cambriano (545 – 550Ma)	Ediacara Hills, AUS	Ocorrência dos metazoários (primeiros seres vivos multicelulares da Terra).
Cambriano (508 Ma)	Burgess Shale, CAN	Vários invertebrados e ancestrais dos cordados; “Explosão Cambriana”.
Carbonífero (310 Ma)	Mazon Creek, EUA	Flora de gimnospermas e rica fauna marinha.
Cretáceo (108 – 92 Ma)	Formação Santana, Brasil	Peixes, anfíbios, répteis, e dinossauros.

Fonte: <<http://palaeo.gly.bris.ac.uk/palaeofiles/lagerstatten/>>. Acesso em: 8 fev. 2017.



Pesquise mais

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>. Acesso em: 18 out. 2016.

Retomando a situação lançada no início dessa seção, lembre-se de que a Geoconsulting Magma foi contratada para a elaboração de um laudo sobre o conteúdo fossilífero encontrado durante as obras de instalação de uma indústria na cidade de Mafra/SC. Você, visando obter mais informações que lhe ajudem na confecção do laudo, foi atrás de informações e conseguiu identificar que em Mafra/SC afloram rochas da Formação Rio do Sul, que apresentam folhelhos e siltitos cinzas, dentre eles o folhelho Lontras, riquíssimo em conteúdo fossilífero. No entanto, já no escritório da empresa, fazendo sua pesquisa e se preparando para iniciar a elaboração da parte inicial do laudo, algumas dúvidas, que precisam ser respondidas a fim de dar prosseguimento ao laudo, vieram à sua cabeça: O que realmente que é um fóssil? Como eles são formados e como ficam preservados? Quais são os processos que levam à sua fossilização? Existem lugares onde há uma boa preservação fossilífera?

Por isso, para que você consiga dar prosseguimento à elaboração desse laudo, é importante que você se recorde e inclua no documento, conforme abordamos aqui no livro didático, que os fósseis são restos ou vestígios de animais, vegetais e de outros microrganismos que viveram em um passado longo, e que hoje se encontram preservados nas rochas sedimentares. Não se esqueça de destacar que para que sejam considerados fósseis, os registros precisam ser mais antigos que 11 mil anos, ou seja, devem datar de antes do Holoceno, que é a época geológica atual.

Com relação à segunda pergunta, detalhe no laudo que o processo de formação envolve o rápido soterramento do organismo, para que o intemperismo que atua na superfície terrestre não tenha tempo de atuar. Além disso, destaque que a ausência da ação bacteriana é fundamental para que não haja decomposição e, com isso, o organismo consiga ficar preservado.

Complementarmente, respondendo ao terceiro questionamento, exemplifique os principais processos de fossilização, entre eles: a) carbonificação, que ocorre quando o carbono presente nos organismos fica preservado, enquanto os outros minerais foram perdidos; b) recristalização, que acontece quando minerais instáveis são modificados em outras formas minerais mais estáveis às atuais con-

dições geológicas; c) substituição, processo no qual o mineral original dos restos é substituído por outro, pois este se encontra abundante no meio geológico atual; d) incrustação, quando uma fina camada de mineral é precipitada sobre a carapaça, protegendo-o; e) permineralização, que acontece quando os sedimentos que se encontram ao redor do fóssil são transportados para cavidades ou pequenas fraturas que ocorrem nos fósseis; e f) concreção, quando há a formação de um envoltório mineralizado ao redor do fóssil.

Finalmente, você deve afirmar no laudo de registro fossilífero que, há lugares em que a preservação fossilífera é excepcional e que, além do excelente grau de preservação, há uma abundante diversidade de organismos que são utilizados, inclusive, para a compreensão sobre o processo evolutivo das espécies e o entendimento sobre a dinâmica da evolução paleoambiental. Denominamos esses lugares de *Lagerstätte*.

Avançando na prática

Paleontologia no ambiente escolar

Descrição da situação-problema

A ONG Vigilantes Ambientais achou interessante a intervenção do Ministério Público de SC na construção da obra da indústria a ser implementada em Mafra/SC e elogiou a atitude da GeoConsulting Magma em elaborar o laudo paleontológico. Como a ONG possui parcerias com escolas municipais e estaduais da região, ela solicitou à GeoConsulting Magma que alguém da empresa fosse dar uma breve palestra para os alunos do Ensino Médio da escola local, que estão estudando sobre a Teoria da Evolução de Darwin. A bióloga da empresa foi chamada para proferir essa palestra e, você, com seu conhecimento de geologia e paleontologia, foi convidado para acompanhá-la.

Após a palestra, o professor da turma sugeriu que vocês apresentassem alguns fósseis coletados na área da instalação da empresa, em Mafra/SC. Os alunos, após manusear as amostras e discutir entre eles, lhe abordaram com algumas dúvidas: você sabe explicar quais são os principais fatores condicionantes para formação dos fósseis? Somente as partes duras ficam preservadas? Há alguma reação química que ocorre para que o fóssil fique preservado?

Agora é com você. Esclareça as dúvidas dos alunos.

Resolução da situação-problema

Como você acabou de aprender nessa seção, há dois fatores primordiais que condicionam a formação dos fósseis. O primeiro deles é o soterramento, que precisa acontecer a uma taxa elevada, de forma que o organismo morto seja recoberto por sedimentos, evitando assim a ação do intemperismo. Afinal, a desfragmentação do organismo por ação das intempéries prejudica o potencial de preservação e reduz a possibilidade de conservação das partes moles (tecidos, órgãos etc.) e duras (ossos, dentes, caule vegetal, entre outros). O segundo fator condicionante é a atividade bacteriana, já que são esses microrganismos que realizam o processo de decomposição. Dessa maneira, é fundamental que as bactérias não estejam presentes no ambiente ou sejam poucas. Essas condições são encontradas em ambientes de sedimentação em que o oxigênio é reduzido, como lagos, lagoas e mares relativamente profundos.

Esclarecendo a segunda pergunta, você viu aqui no livro que as partes duras são as mais fáceis de serem preservadas. No entanto, as partes moles (tecidos, vasos sanguíneos, vísceras) também podem ser conservadas, conforme já documentados na literatura. Por último, esclareça que há uma série de reações químicas e rearranjos mineralógicos que acontecem na preservação dos fósseis, para dar um exemplo, cite o caso da substituição, que é quando os restos dos organismos são substituídos por outro mineral, pois este se encontra abundante no meio geológico atual. É o caso da silicificação, em que o mineral sílica substituiu o material original do fóssil.

Faça valer a pena!

- 1.** A paleontologia se tornou uma ciência importantíssima, pois boa parte da teoria evolutiva de Darwin é baseada no estudo dos fósseis. Além disso, a definição de intervalos interessantes para a prospecção de petróleo e gás natural é feita a partir da análise dos fósseis e sua correlação espaço-temporal dentro da bacia sedimentar.

Sobre os fósseis, os conceitos e os termos relacionados à paleontologia, é correto afirmar:

- a) Somente os restos de animais e vegetais que existiram no passado são considerados fósseis.

- b) Normalmente não é definido um limite temporal para que algum resto ou vestígio seja considerado fóssil.
- c) Evidências fossilíferas com menos de onze mil anos são consideradas pseudofósseis.
- d) Pseudofósseis são exemplos fósseis que aparecem no registro geológico e que ainda são viventes.
- e) Fóssil-vivo é um organismo presente no registro fóssil e que se encontra ainda vivo.

2. Os fósseis são divididos, de uma maneira geral, em fósseis corpóreos, também denominados de restos, e fósseis-traço ou vestígios. Aqueles referem-se a 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. A excepcional preservação de alguns fósseis os tornam fundamentais para o estudo e a compreensão das espécies de animais e vegetais antigos e modernos, os modos de vida e o habitat de organismos também nos ensinam muito sobre as condições paleoclimáticas e paleoecológicas, fundamentais até mesmo para 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 o sedimento fino tem tempo para decantar.
- b) O intemperismo atua de forma benéfica na preservação fossilífera.
- 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 expulso.

Seção 3.2

Tempo geológico e evolução

Diálogo aberto

Caro aluno! Seja bem-vindo à segunda seção dessa unidade, denominada “Tempo geológico e evolução”. Para darmos início ao seu processo de conhecimento dos fundamentos de paleontologia, lembre-se de que você já estudou o que é fóssil, como ele se forma e de que maneira, através dos inúmeros processos fossilizadores, ele fica preservado nas rochas sedimentares. Além disso, você viu que há locais onde há uma excelente e abundante preservação, os denominados *Lagerstätten*.

No entanto, para dar prosseguimento à sua atividade de construção de conhecimento sobre paleontologia, você deverá fazer a segunda tarefa do laudo que lhe foi solicitado, isto é, você deve destacar a importância dos fósseis para compreensão da evolução da vida e do tempo geológico. Antes, que tal recordarmos nossa situação? A GeoConsulting Magma recebeu um pedido do Ministério Público para elaborar um laudo sobre o conteúdo fossilífero encontrado durante as obras de instalação de uma indústria na cidade de Mafra/SC. Visando apresentar esse laudo para a comunidade local, e para conhecimento da comunidade científica, que se beneficia dos afloramentos que contêm fósseis, você já realizou a conceituação de fóssil e destacou quais são os processos responsáveis pela sua fossilização e preservação.

Para realizar a segunda etapa, imagine que você foi convidado pelo diretor da GeoConsulting Magma para visitar o local onde são realizadas as obras, pois o prefeito de Mafra gostaria de saber por que elas estavam momentaneamente paralisadas devido à descoberta de fósseis. No entanto, antes de encontrá-lo no local, você decidiu buscar subsídios técnico-científicos, que devem constar no laudo, e que também lhe auxiliariam a responder às possíveis perguntas do prefeito. Logo, para concluir esta etapa do laudo e enriquecer o seu documento, você deve responder: Como explicar a divisão do tempo geológico, destacando à que idade as rochas de

Mafrá/SC pertencem? Quais são os princípios aplicados para compreender a evolução da vida e correlacionar o conteúdo fossilífero utilizando as rochas que lá afloram? As rochas da cidade são datadas do Permiano, sobre isso, quais são os fósseis desse período?

Para auxiliar você nestes questionamentos, abordaremos, nesta seção, o tempo geológico, detalhando os pensadores que deram origem à noção de “Tempo Profundo” e os fósseis que os auxiliaram a entender a evolução geológica da Terra, bem como da própria vida terrestre. Para finalizar, estudaremos alguns dos fósseis-guia que nos auxiliam na compreensão sobre as determinadas unidades geológicas e como eles são essenciais para a correlação fóssil, ferramenta fundamental da bioestratigrafia. Vamos aos estudos? Boa leitura!

Não pode faltar

A idade da Terra sempre foi um tema muito discutido e debatido entre diversos especialistas. Se analisarmos do ponto de vista puramente científico, podemos estimar a idade da Terra de duas formas: absoluta e relativamente. Caso você se esforce para lembrar os conteúdos que já estudou, você se recordará que no final da Unidade 1, você viu um pouco sobre a geocronologia, a ciência que utiliza os métodos radioativos para calcular a idade das rochas, minerais e até mesmo dos eventos geológicos, como a formação do próprio planeta Terra. No entanto, há um outro ramo da geocronologia que utiliza os dados paleontológicos para estudar determinados eventos de forma relativa, isto é, sem precisar a idade exata em termos numéricos.

Contudo, não se deve assumir que um método está errado e outro está correto, ambos se complementam. De fato, toda a construção da Coluna do Tempo Geológico (mais recentemente denominada de Tabela Estratigráfica Internacional) é fruto da colaboração entre diferentes áreas, em especial a paleontologia, a estratigrafia e a geocronologia. É a partir do advento desse instrumento que nós conseguimos nos “localizar” no tempo profundo e entendermos todas as mudanças que ocorreram no nosso planeta, sem nos perdemos na magnitude do tempo geológico. Utilizando a analogia descrita em Soares (2015a), podemos buscar entender o tempo

geológico conforme um livro de 460.000 páginas, considerando que cada página conta 10.000 anos de história.

Dessa maneira, a página um conta a origem da Terra, ao passo que os primeiros organismos unicelulares surgiriam somente na página 70.000; as primeiras plantas terrestres na página 418.000; os dinossauros, por incrível que pareça, somente na página 440.000 e nós, seres humanos, começamos a tingir o papel somente na página 459.600. Essa comparação parece ser absurda, mas é muito útil para entendermos a vastidão do tempo geológico e nos instigar a estudar mais sobre a evolução da vida.

Apesar de muitas pessoas associarem à paleontologia os dinossauros, a história deles começa, na verdade, a partir do surgimento das primeiras formas de vida, no final do longo Éon Arqueano. A divisão em Éons, eras, períodos e épocas, aliás, não é um mero detalhe, afinal, ela reflete importantes acontecimentos que marcaram do ponto de vista geológico e biológico a evolução do nosso planeta. A Figura 3.4 mostra as principais divisões do tempo geológico, de forma ordenada e sequencial.

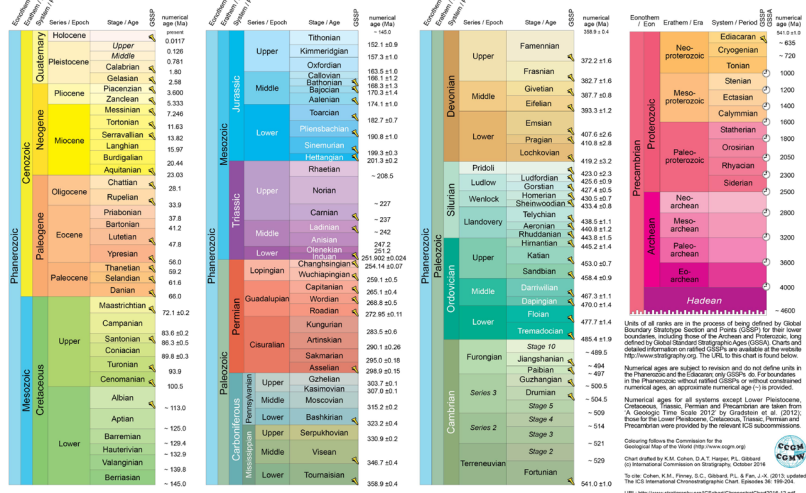
Os éons são as maiores subdivisões da escala do tempo e simbolizam grandes etapas de desenvolvimento do planeta. Atualmente, consideramos a existência de quatro éons: 1º) Hadeano, que se inicia com a formação da Terra a 4,6 bilhões de anos e que, com o tempo, evolui para um planeta formado por “oceanos” de rochas fundidas, com enormes crateras e intensa atividade vulcânica. A atmosfera, se existente, era quente e densa, formada por gases como o nitrogênio, a amônia, o hidrogênio, o monóxido de carbono, o metano e o vapor d’água; 2º) Arqueano, inicia-se aproximadamente 600 milhões de anos após a formação da Terra, quando a maior parte das rochas se encontram resfriadas e grande parte do vapor d’água já havia se condensado para formar um imenso oceano; 3º) Proterozoico, que se inicia após 2,1 bilhões de anos após o início do Hadeano e dura quase 2 bilhões de anos. Nesse intervalo, já havia continentes sendo formados e as colisões entre extensos corpos rochosos já eram frequentes. A vida, ainda incipiente, encontrava-se nos oceanos, mas as algas e as bactérias já liberavam O_2 , que se tornou cada vez mais abundante; e 4º) Fanerozoico, quando há explosão da vida, ou seja, quando os organismos passam a dominar o globo.



www.stratigraphy.org

International Commission on Stratigraphy

v 2016/12



O Fanerozoico, o Éon mais estudado, apresenta três eras: a) Paleozoica; b) Mesozoica; e c) Cenozoica. No Paleozoico, que significa vida antiga, temos vários períodos, como o Cambriano (542-485 Ma), Ordoviciano (485-443 Ma), o Siluriano (443-419 Ma), o Devoniano (419-358 Ma), o Carbonífero (358-298 Ma) e o Permiano (298-252 Ma). No período Cambriano houve um surgimento significativo dos animais, a chamada “explosão cambriana”, no entanto, foi durante o Período Ordoviciano que ocorre a diversificação na qual quase todos os filos atuais (e até mesmo os extintos) apareceram. Já o seu fim é marcado durante o Permiano, na maior extinção em massa já registrada na Terra, a qual afetou cerca de 90% de toda as espécies marinhas. Sob a ótica da paleontologia, portanto, o final do Proterozoico (especificamente no Neoproterozoico) e início do Paleozoico são os intervalos-chave para analisarmos a evolução da vida.



Além da extinção do Permiano (Permo-Triássica), temos outras quatro grandes extinções:

- Extinção do Ordoviciano: dizimou 60% dos invertebrados marinhos, associada à glaciação e à queda do nível do mar.
- Extinção do Devoniano: vitimou 70% da vida marinha, extinguiu boa parte dos peixes e coincide com a expansão da vegetação terrestre.
- Extinção do Triássico-Jurássico: 20% de todas as famílias marinhas, arcosauros e grandes anfíbios foram extintos.
- Extinção do Cretáceo-Terciário (K-T): extinguiu boa parte dos seres vivos, incluindo os dinossauros e outros répteis gigantes, associado à colisão de um asteroide, extensa atividade vulcânica e emissão de partículas que bloquearam a penetração da luz solar.

Antes de entrarmos na evolução da vida na Terra, no entanto, é necessário sabermos como a noção do tempo profundo começou. O propulsor dessa concepção foi James Hutton que, em 1795, publicou sua célebre obra *Teoria da Terra*. Nela, Hutton aplicou os princípios do uniformitarismo, o qual assume que as leis naturais atuais também se repetiam no passado. Além disso, Hutton percebeu que, em algumas regiões, havia superfícies erosivas que cortavam os pacotes rochosos, separando rochas diferentes. Essas discordâncias refletem um hiato temporal onde as camadas tiveram sido erodidas ou os sedimentos simplesmente não se depositaram (Figura 3.5).

Figura 3.5 | Exemplo de uma discordância geológica, na qual a linha tracejada separa rochas depositadas em intervalos de tempo diferentes



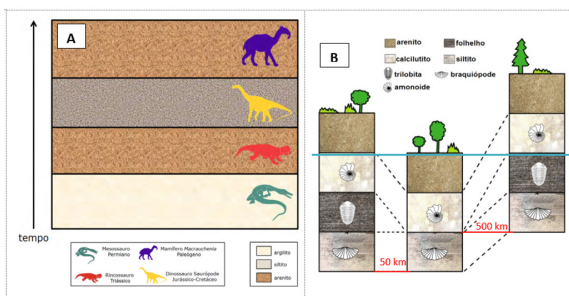
Fonte: <http://s0.geograph.org.uk/photos/10/76/107618_3651a35a.jpg>. Acesso em: 24 out. 2016.

Adicionalmente aos princípios da estratigrafia, que você viu na unidade 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. De acordo com Cuvier (1769-1832), essa distinção era fruto de extinções catastróficas que aconteciam esporadicamente ao longo do tempo.

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” (Figura 3.6A). Complementarmente, das observações de Smith surgiu também o princípio da Correlação Fóssil (Figura 3.6B), que estabelece que camadas de rochas encontradas em áreas geográficas distantes uma das outras podem ser correlacionadas de acordo com os fósseis que hospedam.

Com isso, inaugurava-se uma nova abordagem paleontológica e estratigráfica, a qual passou a ser denominada de bioestratigrafia. Esse novo ramo permitiu o empilhamento das rochas e sua correlação temporal baseado, exclusivamente, no conteúdo fossilífero das camadas. Dessa maneira, houve a possibilidade do estabelecimento de um contexto propício para a datação relativa das rochas.

Figura 3.6 | Novos conceitos estratigráficos baseados em estudos paleontológicos: (A) princípio da sucessão faunística; e (B) correlação fóssil



Fonte: adaptado de Soares (2015a).

Para que isso seja feito, no entanto, é necessário analisar fósseis que possuem características singulares, que sejam característicos de uma unidade estratigráfica, tanto em idade quanto em ambiente deposicional, onde é possível mapear sua extensão lateral (distribuição geográfica). Além disso, é preciso que a distribuição geográfica apresente curta amplitude vertical (ter surgido e se extinto rapidamente), deve ter rápida taxa de dispersão, devem ser facilmente identificáveis e devem ser abundantes (SOARES, 2015a). Chamamos estes fósseis de fósseis-guia ou fósseis-índice.



Pesquise mais

Para entender melhor as discordâncias do registro geológico e, complementarmente, entender melhor a correlação fóssil, leia o Capítulo 17 de Wicander & Monroe (2009), disponível em sua biblioteca virtual.

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

Com relação à história e à evolução da vida na Terra, há evidências científicas de que ela começou no éon Arqueano, com os primeiros vestígios de atividade biológica, marcado pelas bactérias filamentosas de Apex Chert e pelos estromatólitos (Figura 3.7), a aproximadamente entre 3,5 – 3,8 bilhões de anos. Essas rochas são 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.

Figura 3.7 | Exemplos de estromatólitos. À esquerda, estromatólitos recentes de Shark Bay (AUS) e à direita, estromatólitos fossilizados do Arqueano



Fonte: <<http://www.ib.usp.br/evosite/evo101/IIIE2aOriginooflife.shtml>>. Acesso em: 22 out.2016.

É no éon Proterozoico, contudo, que com o aumento de O₂ na atmosfera, que a vida começa a se diversificar e proliferar, com o aparecimento dos primeiros seres multicelulares (metazoários da Fauna de Edicara). Já no éon Fanerozoico, surgem os esqueletos calcários (conchas). Na era Paleozoica, como vimos, começa a explosão da vida – no Cambriano – 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, onde surgem os primeiros corais e os primeiros vertebrados (peixes agnatos, sem mandíbula – ostracodermes).

Após a extinção do Ordoviciano, já no Siluriano, os organismos sobreviventes se readaptaram às novas condições, de forma que peixes ósseos e cartilaginosos começaram a surgir. Além disso, as primeiras plantas (avasculares) e animais terrestres (artrópodes) começam a invadir o continente. No mar, os cefalópodes nautiloides eram os grandes predadores. No Devoniano, entretanto, os cefalópodes nautiloides começam a perder importância, ao passo que os amonites ganhavam número. Os peixes já eram bem diversificados e já habitavam, inclusive, ambientes de água doce. Nesse período também surgiram os tetrápodes, dando início ao aparecimento dos anfíbios, entre eles o *Tiktaalik*. Em terra, as plantas começam a evoluir e ganhar porte, marcando o início da era das plantas vasculares e o surgimento das sementes. O final do período é marcado pela extinção devoniana, delimitando a transição para o próximo período, o Carbonífero. Marcado por extensos depósitos de carvão, foi nesse período que surgem as primeiras gimnospermas e os primeiros répteis, inaugurando a era dos animais que não dependiam mais da água para sua reprodução. É nesse período também que o nível de oxigênio dissolvido na atmosfera é cerca de 35%, o que possivelmente possibilitou a existência de insetos gigantes, os famosos Meganeuras.

O Permiano começa a se moldar quando as grandes porções continentais começam a se unir e formar a Pangeia, causando um agrupamento de continentes generalizada e o estabelecimento de cenários áridos. Nas regiões temperadas, no entanto, desenvolve-se a “Flora de *Glossopteris*”, que marca o período. Os amniotas diver-

sificam-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 (SOARES, 2015a). Ao final do período, ocorre a maior extinção, que dizima 90% das espécies marinhas e muitas espécies terrestres.



Assimile

Pangeia (300-175 Ma) é um supercontinente que unificava todas as massas continentais da Terra, foi o último a existir. A evidência de que esse enorme bloco continental de fato existiu está gravado no registro paleontológico e geológico de muitos continentes agora separados por grandes oceanos.

Após a grande extinção permiana, adentramos na era Mesozoica, onde 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 começaram 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 flores) 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 marca o fim do Mesozoico e o início do Cenozoico, fato 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, o período mais antigo do Cenozoico. No Neógeno, o período Cenozoico intermediário, houve o estabelecimento de uma intensa ligação entre os continentes, possibilitando um intercâmbio de flora e fauna. Com a expansão das gramíneas e o 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 da época Pleistocênica, já no Quaternário (período mais recente do Cenozoico). A megafauna de mamíferos do período (preguiças gigantes, mamutes, mastodontes e tigres dente-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, a época Cenozoica atual.



Refleta

O estabelecimento de uma época geológica leva em consideração o impacto indelével de um determinado grupo de animais ou plantas que ficam preservados em rochas e sedimentos. Dessa forma, nós humanos podemos marcar um novo período geológico? Será que já entramos no “Antropoceno”?

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.

Em termos bioestratigráficos, ou seja, para correlação entre camadas geológicas, os fósseis-guia são extremamente úteis, conforme abordamos anteriormente. Por isso, a utilização desses marcos nos auxilia a entendermos em que era, período ou até mesmo época do registro geológico estamos trabalhando. Em termos econômicos mais práticos, a utilização dos fósseis-guia ajuda a identificar intervalos propícios para a prospecção de recursos minerais e energéticos restritos a rochas de idades específicas. O Quadro 3.2 contém alguns fósseis-índice do Paleozoico e Mesozoico, divididos em seus respectivos períodos e um link para acessar as imagens dos fósseis.

Quadro 3.2 | 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</i> sp.) ¹
	Jurássico	Amonites (<i>Perisphinctes</i> sp.) ²
	Triássico	Cefalópode (<i>Trophites subbullatus</i>) ³
Paleozoico	Permiano	Foraminíferos fusulinídeos (<i>Parafusulina bosei</i>) ⁴
	Carbonífero	Corais (<i>Lophophylidium proliferum</i>) ⁵
	Devoniano	Braquiópodes (<i>Mucrospirifer mucronatus</i>) ⁶
	Siluriano	Nautilóides (<i>Hexamoceras hertzeni</i>) ⁷
	Ordoviciano	Graptólitos (<i>Pendeograptus fruticosus</i>) ⁸
	Cambriano	Trilobita (<i>Paradoxides</i> sp.) ⁹

Links para as fotos: ¹<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/99/InoceramusCretaceousSouthDakota.jpg/800px-InoceramusCretaceousSouthDakota.jpg>; ²https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fd/Perisphinctes_%28Prososphinctes%29_virguloides_%28Waagen%29.jpg; ³<https://media1.britannica.com/eb-media/66/4766-004-BE428562.jpg>; ⁴<http://www.nimrf.net.cn/getimage?zyType=ept&width=1024&height=768&tpName=2342C0001000002277.jpg>; ⁵http://www.catnapin.com/Fossil/CoralReef/Lophophylidium_proliferum_small1.jpg; ⁶https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/23/Mucrospirifer_mucronatus_Silica_Shale.JPG/1024px-Mucrospirifer_mucronatus_Silica_Shale.JPG; ⁷http://1.bp.blogspot.com/_ovprbLW3hY/TO7VlSeCmDI/AAAAAAAAAG8/zs-ngpttcWk/s200/vivang.jpg; ⁸<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a9/TetragraptusfruticosusBendigonian.jpg/784px-TetragraptusfruticosusBendigonian.jpg>; ⁹[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ea/BLW_TriLOBITE_\(Paradoxides_sp.\).jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ea/BLW_TriLOBITE_(Paradoxides_sp.).jpg).

Fonte: elaborado pelo autor.

Sem medo de errar

Voltando à situação lançada no início da unidade, destacamos que a GeoConsulting Magma foi contratada para a elaboração de um laudo sobre o conteúdo fossilífero de um local onde uma indústria pretende se instalar, na cidade de Mafra/SC. Você, na primeira etapa, já realizou a conceituação de fóssil, processos fossilizadores e preservação, inclusive descobriu que as rochas da Formação Rio do Sul, a qual apresenta folhelhos e siltitos cinzas, entre eles o Folhelho Lontras, que se apresentam riquíssimos em conteúdo fossilífero, afloram na cidade. Agora, na segunda etapa, você tem que destacar a importância dos fósseis para compreensão da evolução da vida e do tempo geológico e, para isso, você foi convidado pelo diretor da GeoConsulting Magma para visitar o local onde são realizadas as obras, pois

o prefeito de Mafra gostaria de saber porque elas estavam momentaneamente paralisadas devido à descoberta de fósseis.

Ao decidir buscar subsídios técnico-científicos, que devem constar no laudo, e que também lhe auxiliariam a responder às perguntas do prefeito, você deve responder: como explicar a divisão do tempo geológico, destacando à que idade as rochas de Mafra/SC pertencem? Quais os princípios aplicados para compreender a evolução da vida e correlacionar o conteúdo fossilífero utilizando as rochas que lá afloram? As rochas da cidade são datadas do Permiano, sobre isso, quais são os fósseis desse período?

Logo, para que você dê prosseguimento à resolução desse trabalho, é preciso, primeiramente, responder aos questionamentos. Lembre-se de que o tempo geológico está dividido em Éons, Eras, Períodos e Épocas. Segundo os dados da literatura, temos quatro Éons: Hadeano, Arqueano, Proterozoico e Fanerozoico, sendo que o Fanerozoico é o Éon mais detalhado e que apresenta a maior quantidade de dados, o que permitiu subdividi-lo em várias Eras (Paleozoica, Mesozoica e Cenozoica), cada uma com características geológicas e paleontológicas específicas, as quais embasaram as divisões em períodos e épocas. Além disso, como você aprendeu nessa seção, os fósseis (entre eles os fósseis-guia) podem auxiliar a determinar a idade das rochas que afloram em Mafra/SC e, dessa maneira, seria possível amarrá-las à escala do tempo geológico.

Respondendo ao segundo questionamento, lembre-se de que dois princípios paleontológicos foram chaves para entender o registro fossilífero, dando base para a compreensão da evolução. O primeiro, desenvolvido por 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 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. Esses dois princípios ajudaram a alavancar o princípio da “Sucessão Faunística”. Além disso, das observações de Smith, também nasceu o princípio da Correlação Fóssil, ao estabelecer que camadas de rochas encontradas em áreas geograficamente distantes podem ser correlacionadas por meio de seu conteúdo fossilífero.

Esses conceitos também podem ser aplicados nas rochas de Mafra/SC, que possuem relevante conteúdo fóssilífero e, com isso, podem ser utilizadas para entender melhor o período em que elas se formaram.

Por último, você deve destacar que o Permiano é caracterizado, em termos geológicos, pela união de grandes massas continentais para formar o Supercontinente Pangeia, o que causou o estabelecimento de cenários áridos em muitas regiões. 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 pelicosauros, 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.

Avançando na prática

Expondo o tempo geológico e a evolução da vida

Descrição da situação-problema

O coordenador do CENPALEO, ao saber que a GeoConsulting Magma estava realizando o laudo paleontológico do local da instalação da empresa via contato realizado por você, decidiu convidá-lo para elaborar um material didático explicativo sobre o tempo geológico e evolução da vida, o qual seria exposto no Museu da Terra e da Vida, localizado nas dependências da universidade local. Além disso, o coordenador solicitou que você se deslocasse até o local para inaugurar a exposição, o que seria feito 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 forma 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 questionou: como é feita a correlação fóssil entre as camadas, se elas ocorrem em localidades tão distantes? E, para finalizar, outro estudante perguntou: qual é 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 deve respondê-los da seguinte maneira: 1º) 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 e o denominamos 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, você deve 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, 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. 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*, estamos no Proterozoico.
- b) Quando perfuramos um poço e encontramos cefalópodes nautiloides do gênero *Hexamoceras* sabemos que se trata 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 contenha fósseis de trilobitas do gênero *Paradoxides* foram interpretadas como do Mesozoico.

2. William Smith (1769-1839) foi o primeiro geólogo a desenhar o mapa da Inglaterra, País de Gales e parte da Escócia. Foi ele quem concebeu, também, o que hoje conhecemos como Princípio da Sucessão Faunística, utilizado até os dias atuais como um dos princípios bases da bioestratigrafia, um dos principais ramos da estratigrafia.

Sobre o Princípio da Sucessão Faunística, é correto afirmar que ele estabelece que:

- a) Os fósseis de mesma idade podem ser correlacionados em rochas que ocorrem geograficamente separadas.
- b) Os fósseis ocorrem segundo uma ordem estabelecida, de forma que os mais novos posicionam-se sucessivamente acima dos mais antigos.
- c) Os fósseis ocorrem de forma aleatória, sem uma ordem estabelecida, sendo difícil estabelecer uma sucessão temporal.
- d) Os fósseis que ocorrem em diferentes locais, mesmo que apresentem a mesma idade, jamais podem ser correlacionados.
- e) Os fósseis ocorrem segundo uma ordem estabelecida, de forma que os mais antigos posicionam-se sucessivamente acima dos mais novos.

3. Em agosto de 2016, uma equipe de pesquisadores liderados por Allen Nutman (Universidade de Wollongong, Austrália) anunciaram a descoberta de estruturas com evidência de vida 220 milhões de anos mais antigas que os estromatólitos mais velhos conhecidos até então.

Fonte: <<http://www1.folha.uol.com.br/ciencia/2016/09/1809229-vida-na-terra-se-originou-220-milhoes-de-anos-antes-do-que-se-pensava.shtml>>. Acesso em: 21 out. 2016.

Considerando essa descoberta e outras evidências da vida antiga na Terra, julgue as alternativas e assinale a correta:

- a) Os estromatólitos são estruturas rochosas marcadas pela intercalação de lâminas microbianas e sedimentos.
- b) Os estromatólitos não podem ser considerados registros de vida porque não são formadas por bactérias e sedimentos.
- c) Os fósseis mais antigos datam, na verdade, do Hadeano, como é o caso do Apex Chert.
- d) As evidências de vida só ocorreram no Proterozoico, com o surgimento do O₂ na atmosfera.
- e) Os metazoários da Fauna de Ediacara são as primeiras evidências de seres vivos.

Seção 3.3

Paleoecologia

Diálogo aberto

Caro aluno! Entramos agora na última seção da Unidade 3, que tratará sobre a paleoecologia. Lembre-se de que, para chegar até aqui, você já estudou os fósseis e os processos fossilizadores, preservação dos fósseis e os locais de excelente preservação. Além disso, na Seção 3.2, você aprendeu mais sobre o tempo geológico, evolução da vida, conceitos aplicados relacionados à sucessão faunística e correlação fóssil e fósseis-guia. Para dar prosseguimento ao nosso estudo, no entanto, você não deve se esquecer da situação proposta no início da unidade. Vamos retomá-la?

A GeoConsulting Magma recebeu um pedido do Ministério Público para elaborar um laudo sobre o conteúdo fossilífero encontrado durante as obras de instalação da indústria na cidade de Mafra/SC. Para fazê-lo, você realizou primeiramente a conceituação de fóssil, processos fossilizadores e preservação e, posteriormente, você destacou a importância dos fósseis para compreensão da evolução da vida e do tempo geológico. Para finalizar o laudo, agora você deve concluir a terceira etapa, ou seja, explicar se os fósseis e os microfósseis da região podem ser utilizados para caracterizar os ambientes do passado.

Para isso, imagine que agora você voltou ao escritório para finalizar o laudo, mas você se deu conta de que deveria checar novamente os fósseis (e microfósseis) que ocorrem na Formação Rio do Sul, Membro Lontras, e constatou que há ocorrência de conodontes, escolecodontes e ostracodes. No entanto, assim que você iniciou sua pesquisa, você teve algumas dúvidas, as quais deverão ser respondidas, para incluí-las no laudo, que são: qual é a aplicabilidade dos microfósseis em estudos paleoecológicos? Quais tipos de microfósseis ocorrem na região de Mafra/SC e quais interpretações eles fornecem? Por que seria importante preservá-los, pensando em termos científico-econômicos?

A fim de auxiliá-lo nesses questionamentos, estudaremos, nesta seção, os conceitos fundamentais aplicados à paleoecologia, os microfósseis, seus tipos e aplicação à interpretação paleoambiental, destacando alguns principais grupos, e, para finalizar, destacaremos algumas outras aplicações da utilização dos conceitos paleoecológicos e microfósseis em termos científico-econômicos. Logo, é imprescindível que você leia o livro didático para que consiga, finalmente, concluir o laudo paleontológico. Que tal começarmos a colocar a mão na massa? Bons estudos!

Não pode faltar

A utilização dos fósseis para o entendimento do tempo geológico e aplicação dos princípios da sucessão faunística e correlação fóssil, estudados na seção anterior, não são as únicas utilidades dos fósseis. Muito pelo contrário, há uma imensa aplicabilidade e, entre elas, podemos destacar a paleoecologia. Se a ecologia se dedica ao estudo da interação entre os seres vivos e destes com o meio ambiente onde vivem, considerando que há uma coexistência entre várias espécies, ao estudarmos a paleoecologia, estamos interessados em entender a distribuição dos organismos, seus hábitos e sua tendência de organização em comunidades, interação dos organismos de várias comunidades e entender as condições ambientais que proporcionaram (ou impediram) o desenvolvimento da vida no passado geológico.

Para que isso seja possível, é necessário emprestarmos alguns conceitos e fundamentos de ecologia e geologia e aplicá-los no estudo do registro fóssilífero. O primeiro é o conceito do uniformitarismo, já explicado anteriormente. Nos estudos paleoecológicos admite-se que os processos que vemos hoje em dia são os mesmos que ocorriam no passado geológico, de maneira que as leis naturais teriam permanecidas inalteradas, apesar de que as taxas e as condições para a ocorrência dos processos não fossem necessariamente as mesmas. Assim, uma maneira de analisar a preferência do habitat de determinada espécie com base no estudo do registro fóssilífero é observar a preferência ecológica dos seres ainda vivos que tenham um certo grau de parentesco com o fóssil sob análise.

O segundo conceito é o da parcimônia (ou simplicidade), que estabelece que os dados e os fatos observados devem ser explicados de maneira simples, assim a explicação mais provável para determinada observação deve ser aquela que apresente o grau de proximidade mais aceitável com relação às causas e efeitos que produziram um resultado final. Adicionalmente, os estudos paleoecológicos podem enfocar na análise de uma única espécie (paleoautoecologia) ou várias espécies (paleossinecologia).

Na paleoautoecologia, a análise está geralmente relacionada a alguma mudança que a espécie sofreu devido a uma determinada alteração ocorrida no ambiente em que ela vivia. Por exemplo, os organismos podem sofrer transformações morfológicas que melhor os adaptem para as novas condições climáticas ou, inclusive, no comportamento predatório que proporcione um melhor aproveitamento da presa. A paleossinecologia, entretanto, dedica-se ao entendimento da relação das espécies com os ecossistemas (comunidade de organismos interagindo com seu ambiente abiótico) e os biomas, de forma a montar um quebra-cabeça maior, dando uma visão mais abrangente sobre o assunto.



Assimile

Alguns conceitos emprestados da ecologia precisam ser destacados novamente:

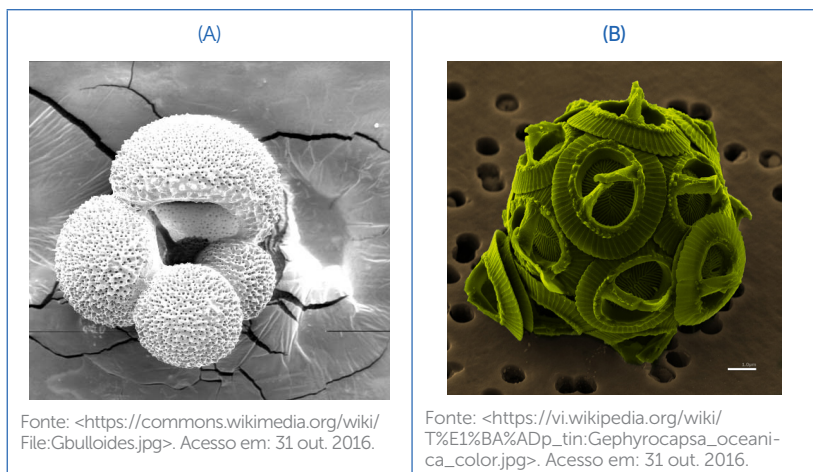
- Ecossistema: conjunto de organismos de diferentes espécies, pertencentes a diferentes comunidades, que interagem entre si e com o seu meio físico.
- População: conjunto de indivíduos de uma espécie que habitam e interagem numa área geográfica específica, na qual seu modo de vida se mantém inalterado.
- Comunidade: todas as populações que ocupam uma área geográfica específica.

Na prática paleoecológica, os estudos são baseados na identificação e interpretação de microfósseis, que são organismos invisíveis ao olho nu. Normalmente, costuma-se referir a microfósseis quando estamos diante de organismos menores que 4 a 5 mm, e comumente menores que 1 mm. Assim, esses minúsculos seres são somente visíveis por meio da utilização de microscópios óticos

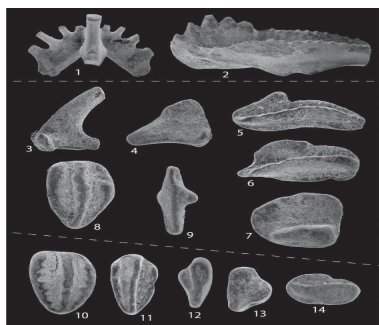
ou eletrônicos (por exemplo, através da Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV). Alguns microfósseis não são organismos inteiros, mas fragmentos de organismos maiores, como dentes, ossículos, carapaças, entre outros.

A fim de organizar o agrupamento dos microrganismos, os microfósseis são classificados em grupos que os diferenciam de acordo com sua constituição química: a) microfósseis carbonáticos (calcários), que são microrganismos com carapaças formadas por CaCO_3 . Nesse grupo, destacam-se os foraminíferos (Figura 3.8A) e os cocolitoforídeos (Figura 3.8B); b) microfósseis fosfáticos, que são formados por fosfato (PO_4^{3-}), sendo que os maiores representantes são os conodontes (Figura 3.8C), formados por hidroxiapatita, e alguns escolecodontes (Figura 3.8D); c) microfósseis silicosos, formados por sílica (SiO_2), grupo do qual pertencem os radiolários (Figura 3.8E) e diatomáceas (Figura 3.8F); e d) microfósseis orgânicos, que são microrganismos fósseis com partes orgânicas preservadas, grupo do qual fazem parte os pólenes (Figura 3.8G) e os esporos (Figura 3.8H), objetos de estudo da palinologia.

Figura 3.8 | Exemplos de microfósseis: (A) foraminífero; (B) cocolitoforídeo; (C) conodonte; (D) escolecodonte; (E) radiolário; (F) diatomácea; (G) pólen; e (H) esporos



(C)



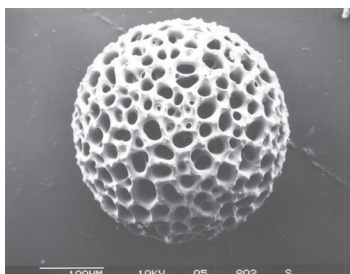
Fonte: <<https://tl.wikipedia.org/wiki/Talaksan:-Conodonts.jpg>>. Acesso em: 31 out. 2016.

(D)



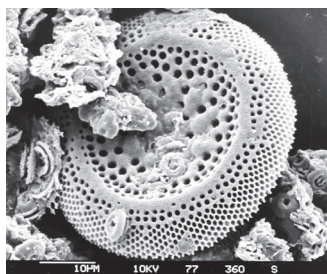
Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fc/Scolecodont_ramphopriion.png>. Acesso em: 31 out. 2016.

(E)



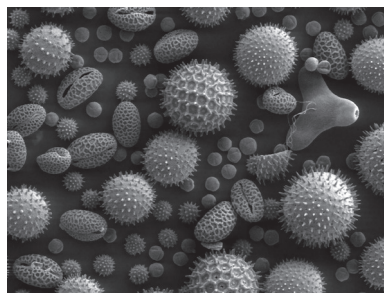
Fonte: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Radiolaria-sp2_hg.jpg>. Acesso em: 31 out. 2016

(F)



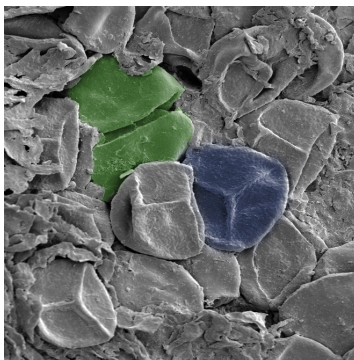
Fonte: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diatom_hg.jpg>. Acesso em: 31 out. 2016.

(G)



Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sporopollenin#/media/File:Misc_pollen.jpg>. Acesso em: 31 out. 2016.

(H)



Fonte: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Trilete_spores.png>. Acesso em: 31 out. 2016.

Na própria Formação Rio do Sul, ao qual pertencem os folhelhos do Membro Lontras, existem microfósseis fosfáticos e carbonáticos. Conodontes e escolecodontes já foram descobertos e catalogados, revelando uma importante história geológica do período, com implicações paleoclimáticas (eventos de glaciação e deglaciação) e geológicas (mudança do contexto tectônico do Gondwana, por exemplo). Além disso, os conodontes podem fornecer dados bioestratigráficos mais acurados, de forma a auxiliar no refinamento da correlação temporal dos estratos, permitindo um estudo aplicado, por exemplo, para correlação das camadas geológicas de interesse para exploração de óleo e gás. Com relação aos microfósseis carbonáticos, destaca-se a ocorrência de ostracodes, importantes na indicação de condições paleoambientes, principalmente devido à sua capacidade de readaptação morfológica devido às condições físico-químicas impostas pelo ambiente deposicional, o que permite interpretar cenários paleoecológicos de forma bastante precisa.



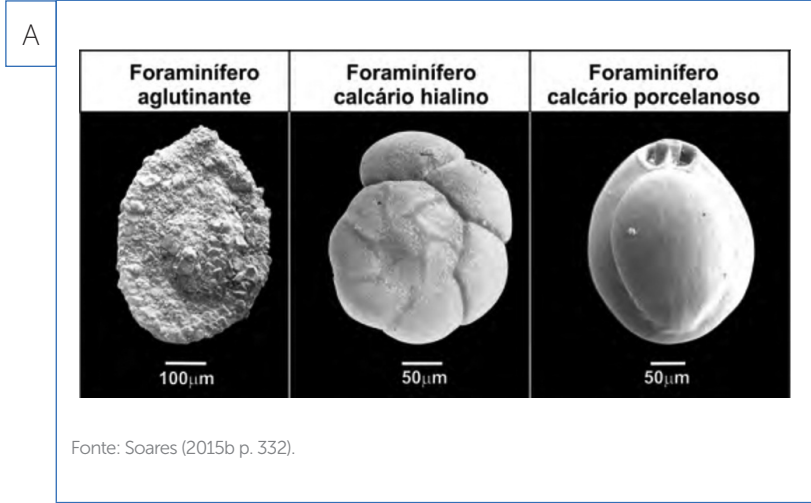
Pesquise mais

Para se aprofundar no “mundo dos microfósseis”, sugerimos a leitura do Capítulo 9 de Soares (2015), que traz mais detalhes sobre esses minúsculos seres fossilizados. FAUTH, G.; BAECKER-FAUTH, S. O mundo dos microfósseis. In: SOARES, M. B. (Org.). **A paleontologia na sala de aula**. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Paleontologia, 2015. Disponível em: <<http://www.paleontologianasaladeaula.com/>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

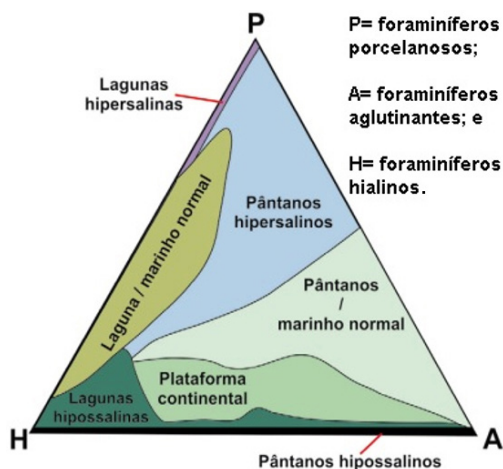
Portanto, conforme pode ser visto, os microfósseis apontam informações que nos remetem aos cenários ambientais do passado, de forma que é possível fazer inferências sobre as condições biológicas, químicas e físicas da natureza em que esses diminutos seres habitavam, demonstrando, com isso, as condições do tempo em que os sedimentos foram depositados. Se você lembrar, há alguns ambientes de sedimentação principais: continental, costeiro e marinho. Tentar interpretar em qual dessas regiões as rochas foram depositadas e em quais condições, muitas vezes, somente é possível com o auxílio da micropaleontologia.

Para isso, lançamos mão de alguns microfósseis que ajudam nesse desafio. Os foraminíferos, por exemplo, são protozoários marinhos que habitam os oceanos profundos e até mesmo regiões costeiras, como estuários e lagunas. No entanto, algumas espécies são exclusivamente planctônicas e habitam as porções mais superficiais dos oceanos, deslocando-se por grandes distâncias ao sabor das correntes marinhas. Além disso, como estão em equilíbrio químico com o mar, são excelentes na função de registrar alterações na temperatura e composição do oceano. Outros, no entanto, são bentônicos e vivem no fundo do mar (sobre ou dentro do sedimento marinho), ficando restrito a uma determinada região. Esses últimos possuem uma diferenciação com relação ao tipo de parede de suas carapaças, de forma que os enquadramos em: aglutinantes, calcários hialinos e calcários porcelanosos (Figura 3.9A). A proporção desses foraminíferos bentônicos encontrados nas rochas define a porção onde, dentro do ambiente marinho/costeiro, essa rocha foi formada, conforme mostra a Figura 3.9B.

Figura 3.9 | Foraminíferos aglutinantes, hialinos e porcelanosos (A) e diagrama ternário usado na interpretação de paleoambientes com base na proporção entre eles (B)



B



Fonte: adaptado de Soares (2015b, p. 333).

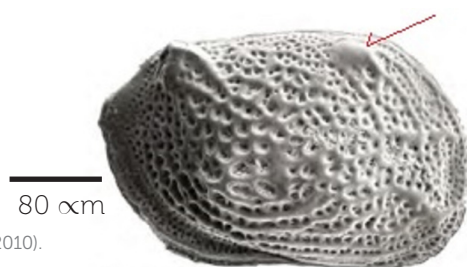
Adicionalmente, o percentual de foraminíferos planctônicos é um indicativo de profundidade, variando de 0% para ambientes costeiros até 90% ou mais em ambiente marinho de água profunda. Outro microfóssil útil para reconstruções ambientais é o ostracode. Como é muito sensível às mudanças do ambiente, ele se torna um incrível aliado na interpretação paleoambiental, pois muitas espécies estão condicionadas à salinidade e à temperatura da água, e também à composição química da água em que viveram.



Exemplificando

A presença do tubérculo ocular (seta vermelha) nas valvas dos ostracodes é indicativa de espécies que viviam na zona fótica e, portanto, pouco profundo.

Figura 3.10 | Tubérculo ocular nas valvas de um ostracode



Fonte: Sousa (2010).

Como você já deve ter percebido, há inúmeras aplicações científicas dos conceitos paleoecológicos e também dos microfósseis. De fato, todos os conceitos paleoecológicos e geológicos explicados no início da seção (atualismo, parcimônia, paleoautoecologia, paleossinecologia, comunidade, ecossistema, etc) são essenciais na reconstrução ambiental, estabelecimento de contextos de correlação bioestratigráfica, datação relativa e até mesmo na identificação de potenciais rochas reservatórios de hidrocarbonetos e outros recursos minerais e estágio de maturidade termal em que as rochas que geram hidrocarbonetos.



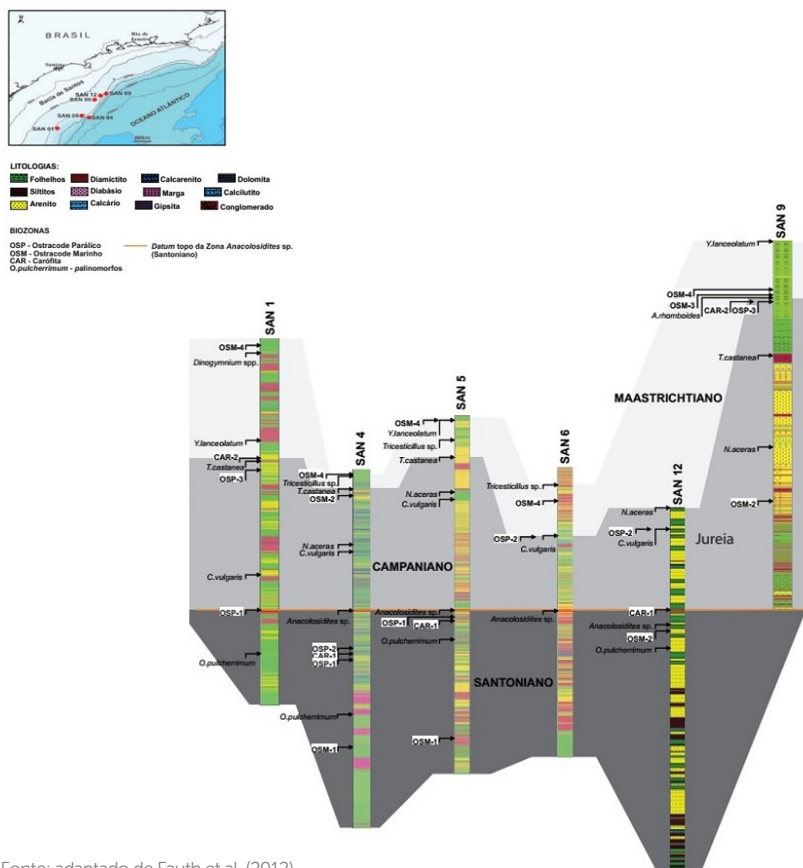
Reflita

Muitas vezes, mesmo com uma infinidade de dados geológicos, os pesquisadores ainda possuem dúvidas sobre se um ambiente deposicional era, de fato, marinho ou continental. Quais microfósseis podem auxiliá-los a responder essa questão?

A reconstrução ambiental baseia-se na ocorrência de alguns fósseis e microfósseis que são específicos de determinadas regiões e ocorrem conjuntamente com outros organismos, de forma a identificar uma assembleia que denote um ecossistema similar. Esses estudos podem, inclusive, identificar possíveis impactos ambientais ocasionados pela atividade antrópica, caso sejam considerados sedimentos mais recentes (Holocênicos). Já para a correlação bioestratigráfica, os microfósseis são valiosos, pois seu pequeno tamanho influencia o grau de preservação em afloramentos ou amostras de testemunhos provenientes de sondagens. Os estudos bioestratigráficos são variados, mas, de maneira geral, servem para melhor caracterizar o modelo geológico de uma região, de forma a entender melhor o contexto deposicional e estratigráfico da localidade, estabelecendo melhor os limites entre as unidades geológicas e as idades das rochas (Figura 3.11).

Em termos científico-econômicos, os microfósseis auxiliam na identificação de zonas mais interessantes para exploração petrolífera, na qual podemos destacar duas aplicações interessantes: a) estudos de posicionamento de antigas linhas de costa, os quais ajudam a inferir a história evolutiva de preenchimento da bacia sedimentar do ponto de vista preditivo, identificando locais propícios para perfuração de poços exploratórios.

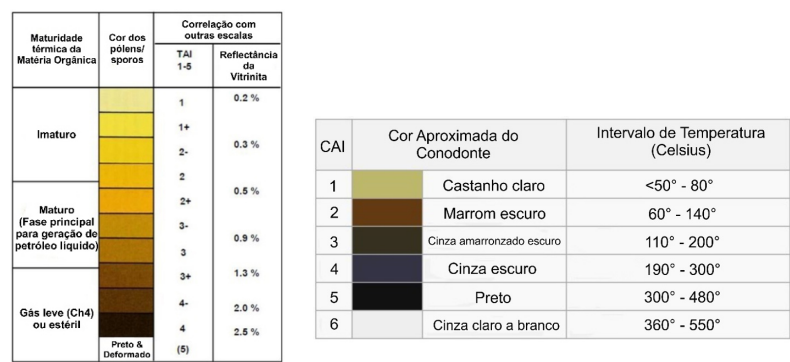
Figura 3.11 | Exemplo da utilização dos microfósseis para correlação estratigráfica e definição de unidades bioestratigráficas



Fonte: adaptado de Fauth et al. (2012).

Para isso, é comum a análise de pólen e esporos, microfósseis mais restritos ao ambiente continental/costeiro em detrimento da inexistência (ou baixíssima ocorrência proporcional) desses fósseis no ambiente marinho; e b) estimativa do grau de maturação termal de rochas geradoras (com potencial para gerar óleo e/ou gás), através do estabelecimento de índices, como o Índice de Alteração Termal (TAI, em inglês) no qual utiliza-se da mudança de temperatura ocasionada nos pólen e esporos quando submetidos ao aquecimento e também o Índice de Alteração de Cor em Conodontes (CAI, em inglês), conforme pode ser observado na Figura 3.12.

Figura 3.12 | Índices de alteração da cor de pólen e esporos (A) e conodontes (B) e seus respectivos estágios de maturidade termal



Fonte: adaptado de Pearson (1984). Fonte: <<http://naturalgasnow.org/business-opportunities-in-the-uticashale-play/>>. Acesso em: 3 nov. 2016.

*Reflectância da vitrinita: é um método em que se utiliza a vitrinita, um dos componentes da matéria orgânica, mais especificamente o seu grau de reflectância da luz, para estimar o estágio de maturidade térmica da rocha.

Sem medo de errar

Caro aluno, chegamos ao final da Unidade 3, portanto, para relembrá-lo, vamos retomar o desafio lançado inicialmente. A Geo-Consulting Magma foi contratada para a elaboração de um laudo sobre o conteúdo fossilífero de um local na cidade de Mafra/SC. Você já realizou as duas primeiras etapas do documento e agora, você deve destacar se os fósseis e os microfósseis da região podem ajudar caracterizar os ambientes do passado, não esquecendo que você deverá responder as seguintes perguntas para finalizar o laudo: qual a aplicabilidade dos microfósseis em estudos paleoecológicos? Quais tipos de microfósseis ocorrem na região de Mafra/SC e quais interpretações eles fornecem? Por que seria importante preservá-los, pensando em termos científico-econômicos?

Para resolver essas perguntas e finalizar o laudo, você deve se lembrar que, conforme estudou no livro didático, os microfósseis fornecem informações que nenhum outro método é capaz, de maneira que podemos inferir sobre os cenários ambientais do passa-

do. Assim, escreva em seu laudo que é possível fazer inferências sobre as condições biológicas, químicas e físicas da natureza em que esses diminutos seres habitavam, demonstrando, com isso, as condições do tempo em que os sedimentos foram depositados. Destaque inclusive, que, para se chegar às conclusões paleoecológicas, devemos respeitar os princípios do atualismo, parcimônia, paleoautoecologia, paleossinecologia, entre outros conceitos ecológicos fundamentais.

Respondendo ao segundo questionamento, você deve se recordar primeiro que, como já destacamos anteriormente, as principais rochas fossilíferas que ocorrem em Mafra/SC pertencem à Formação Rio do Sul, mais precisamente de seu membro inferior, o Folhelho Lontras. Nessas rochas já foram catalogadas descobertas de conodontes e escolecodontes, dois microfósseis fosfáticos que permitem entender sobre as condições paleoclimáticas (eventos de glaciação e deglaciação) e geológicas (mudança do contexto tectônico) da região, de forma a melhorar a compreensão sobre a evolução estratigráfica da área. Além disso, os conodontes podem fornecer dados bioestratigráficos mais precisos, de forma a auxiliar no refinamento da correlação temporal dos estratos, permitindo um estudo aplicado, por exemplo, para correlação das camadas geológicas de interesse para exploração de óleo e gás.

Adicionalmente, com relação aos microfósseis carbonáticos, também característicos da região estudada em seu laudo, onde destaca-se a presença de ostracodes, informe que estes são importantes na indicação de condições paleoambientais devido à sua capacidade de readaptação morfológica devido às condições físico-químicas impostas pelo ambiente deposicional.

Finalmente, para concluir o seu documento, você deve destacar que os microfósseis são importantes para a identificação de zonas mais interessantes para exploração petrolífera, no qual destaca-se à interpretação dos estágios de maturidade termal, o qual pode ser estimado através da utilização do Índice de Alteração de Cor em Conodontes (CAI, em inglês), afinal os conodontes ocorrem de forma abundante no folhelho que aflora em Mafra/SC. Dessa forma, é importante que os fósseis (em especial os microfósseis) sejam preservados, permitindo o avanço futuro da pesquisa científica aplicada.

Microfósseis como protagonistas

Descrição da Situação-Problema

A GeoConsulting Magma está apoiando a realização de uma feira científica de um colégio estadual localizado em sua cidade. Por isso, visando organizar o stand na qual a empresa ficará instalada, o diretor de projetos decidiu organizar uma reunião para tratar sobre o assunto. Ele chamou vários profissionais da área de meio ambiente e você ficou encarregado de participar do evento também. Na reunião ficou acertado que vocês levariam amostras de rochas, minerais e fósseis para deixar exposto na área do stand, visando estimular as pessoas a visitar e conhecer a empresa.

Como você está ajudando a equipe responsável pela elaboração do laudo paleontológico de Mafra/SC, você foi convidado a ficar encarregado de levar os microfósseis encontrados no local em que a empresa está trabalhando e outros recebidos de doação. Durante o evento, você recebeu a visita de vários estudantes interessados no assunto, os quais lhe fizeram várias perguntas, como: qual microfóssil representa um ambiente marinho e qual representa um ambiente continental? Para que são usados os foraminíferos? Há outras aplicações para o uso dos microfósseis?

Resolução da Situação-Problema

Para não os deixar sem resposta, você deve se lembrar do que aprendeu nessa seção da unidade de paleontologia. Sobre a primeira pergunta, lembre-se de que há diversos tipos de microfósseis, mas há alguns específicos do ambiente marinho e outros do ambiente continental. Do ambiente marinho, destaque que os principais são os foraminíferos. Já no continente, como há um predomínio de vegetação terrestre de grande porte, há a maior ocorrência de pólenes e esporos.

Considerando a segunda pergunta, diga a eles que os foraminíferos podem ser usados para interpretar as condições de temperatura do mar, a profundidade da lâmina d'água (mar profundo ou mar raso), e que eles servem também para correlação fóssil, para correlacionar rochas de mesma ocorrência fóssilífera e, portanto, de mesma idade.

Finalmente, respondendo à última pergunta, lembre-se de que os microfósseis podem ser úteis na estimativa do estágio de maturidade termal das rochas ricas em matéria orgânica (as chamadas rochas geradoras). Dessa forma, é possível saber se a rocha atingiu profundidade suficiente para gerar óleo e/ou gás, importantes recursos energéticos e que possuem alta demanda.

Faça valer a pena!

1. A Paleoecologia é uma ciência multidisciplinar. É através da utilização de conceitos da ecologia, geologia e biologia que tiramos as interpretações sobre os ecossistemas do passado, apontando informações sobre o modo de vida dos seres e também as condições ambientais da época.

Considerando os princípios básicos da paleoecologia, é possível afirmar:

- a) O princípio da parcimônia diz que as interpretações precisam ser as mais complexas possíveis.
- b) O princípio do uniformitarismo não pode ser aplicado nas interpretações paleoecológicas.
- c) Na paleoautoecologia, estuda-se transformações que uma espécie sofreu devido à alteração nas condições ambientais.
- d) Na paleossinecologia, estuda-se transformações que uma espécie sofreu devido à alteração nas condições ambientais.
- e) A paleoautoecologia dedica-se ao entendimento da relação das espécies com os ecossistemas e os biomas.

2. Os microfósseis são os principais fósseis utilizados nos estudos paleoecológicos e paleoambientais, sendo sua aplicabilidade extremamente variada. Esses seres são bastante estudados, inclusive, em empresas de petróleo, pois são úteis no entendimento dos ambientes deposicionais e estágios de maturação das rochas geradoras.

Sobre os microfósseis, seus grupos e características, assinale a alternativa correta:

- a) Os microfósseis são divididos em cinco tipos (calcários, quitinosos, silicosos, fosfáticos e orgânicos).
- b) Dentre os microfósseis carbonáticos, podemos citar os conodontes e os foraminíferos.
- c) Os escolecodontes são representantes dos grupos de microfósseis silicosos.

- d) Pólen e esporos, objetos de estudo da paleopalinologia, são microfósseis orgânicos.
- e) Os microfósseis são divididos em quatro tipos (calcários, quitinosos, fosfáticos e orgânicos).

3. No estudo do estágio termal que uma rocha rica em matéria orgânica atingiu, os profissionais utilizam várias técnicas, dentre elas os famosos índices de alteração de cor dos microfósseis, como os pólen, os esporos e os elementos dos conodontes. Esses índices são correlacionados com outros métodos para se ter uma estimativa mais precisa sobre a temperatura que a rocha chegou.

Com relação ao Índice de Alteração de Cor em Conodontes (CAI, em inglês), é possível afirmar que:

- a) Um conodonte que possui cor castanha clara atingiu uma faixa de temperatura alta.
- b) Conodontes com cores mais claras estão relacionadas a temperaturas mais altas.
- c) A coloração cinza escura indica que o conodonte atingiu temperatura abaixo de 80 °C.
- d) Conodontes com cores mais escuras estão relacionadas a temperaturas mais baixas.
- e) Quanto mais escuro for a cor do conodonte, maior a temperatura que esse microfóssil atingiu.

Referências

- CASATI, R. **Paleontologia geral**. 2014. Disponível em: <https://youtu.be/P76_dPex1eY>. Acesso em: 18 out. 2016.
- FAUTH, G. et al. Bioestratigrafia integrada do cretáceo superior da bacia de Santos: ostracodes, carófitas e palinóforos. **Boletim de Geociências da Petrobras**, 20:229-258, 2012.
- PEARSON, D. L. Pollen/spore color 'standard'. Phillips Petroleum Company Exploration Projects Section. 1984. (reproduced in Traverse, A., 1988. Palaeopalynology, Plate 1. Unwin Hyman, Boston).
- SOARES, M. B. **Os fósseis e o tempo geológico**. In: SOARES, M. B. (Org.). A paleontologia na sala de aula. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Paleontologia, 2015a.
- SOARES, M. B. **A paleontologia na sala de aula**. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Paleontologia, 2015b.
- SOUSA, A. J. **Ostracodes marinhos de águas profundas do Pleistoceno-Holoceno, Bacia de Campos**: interpretações paleoambientais e paleoclimáticas. Departamento de Geociências, Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Monografia de Conclusão de Curso, Graduação em Geologia, 2010.
- THEORY OF THE EARTH; with Proofs and Illustrations. Edinburgh: William Creech. 2 vols, 1795.
- WICANDER, R., MONROE, J. S. **Fundamentos de geologia**. Tradução H. O. Avritcher; revisão técnica M. A. Carneiro. São Paulo: Cengage Learning Edições, 2009.

Paleontologia aplicada

Convite ao estudo

Caro aluno, iniciamos agora a Unidade 4 da disciplina de Geologia e Paleontologia, a nossa última unidade da disciplina. Aqui estudaremos os principais assuntos relacionados à paleontologia aplicada, isto é, aprenderemos mais sobre como os fósseis são aplicados na compreensão dos princípios básicos da geologia e paleontologia fundamentados em uma visão evolutiva. Nessa unidade, o objetivo é que você compreenda como os fundamentos da paleontologia, que você estudou na unidade anterior, auxiliam no entendimento das particularidades do registro fóssil.

Para isso, vamos encaixar nosso assunto, novamente, em uma situação prática. Imagine-se na seguinte situação: você foi aprovado no concurso público para trabalhar em um órgão que se dedica à gestão de unidades de conservação, que administra um parque natural com inúmeras ocorrências fossilíferas, cujas rochas são dos períodos Devoniano (Paleozoico) e Neógeno (Cenozoico), mais especificamente do Plioceno. Na sua primeira semana de trabalho, você foi convidado pelo diretor do parque para compor o grupo de trabalho que encaminhará um relatório para a UNESCO solicitando que o parque integre a lista de Geoparques Globais (*UNESCO Global Geoparks*) da entidade. Para isso, ele lhe solicitou desenvolver três etapas, as quais ajudarão a compor todo o documento. Logo, você deverá: 1º) mostrar como os fósseis podem ser utilizados para a interpretação paleobiogeográfica; 2º) explicar como são as etapas da prática paleontológica, desde a prospecção até a exposição; e 3º) demonstrar quais fósseis do paleozoico e do cenozoico ainda podem ser descobertos no parque.

No fim da unidade, ao unir as três partes, você terá contribuído com o grupo, produzindo a sua parte. No entanto, possíveis questionamentos podem surgir, como: como podemos entender a distribuição geográfica dos fósseis? Quais são as etapas seguidas para se fazer paleontologia? Quais são os principais fósseis do paleozoico e do cenozoico?

Para confeccionar esse documento e responder a esses e outros questionamentos que serão apresentados aqui, estudaremos, nesta unidade, os conceitos básicos da paleobiogeografia, e como os aplicamos no estudo da evolução geológica das bacias sedimentares e, também, na evolução biológica das espécies animais e vegetais. Além disso, você aprenderá quais são as etapas da prática paleontológica, desde a prospecção até a exposição. No final, veremos os principais fósseis do paleozoico, a era mais rica em registro de vida, e também do meso e do cenozoico, destacando suas características e aspectos evolutivos.

Seção 4.1

Paleobiogeografia

Diálogo aberto

Caro aluno, nessa primeira seção da Unidade 4, intitulada Paleobiogeografia, você elaborará a primeira parte de seu relatório. Lembre-se de que seu trabalho está incluído em um projeto maior, o qual será encaminhado para a UNESCO, visando incluir o parque natural em que você trabalha na lista de Geoparques Globais (*UNESCO Global Geoparks*). Por isso, é importante que ele seja bem-conceituado e muito bem elaborado, concorda?

Para dar prosseguimento à situação, imagine que você, na sua mesa de trabalho dentro do escritório do parque, foi buscar mais informações sobre as rochas que afloram no local e também os fósseis já encontrados. Com isso, você descobriu que havia alguns trabalhos que relatavam a ocorrência de braquiópodes e trilobitas, do Paleozoico, e alguns fósseis de mamíferos, entre eles o tigre-dente-de-sabre (*Smilodon*).

Com essa informação em mãos, você foi atrás de outras informações sobre a importância desses achados para o estudo paleontológico e descobriu que eles são importantes em estudos paleobiogeográficos. A partir desse momento, no entanto, você se deparou com algumas dúvidas, as quais precisam ser respondidas para que você consiga dar início ao seu relatório: quais são os principais conceitos paleobiogeográficos? Como é possível correlacionar a descoberta de fósseis com outras ocorrências em localidades geográficas diferentes? Quais são as implicações paleogeográficas da descoberta do tigre-dente-de-sabre?

Para começar a responder a essas dúvidas, você aprenderá, nesta seção, os conceitos básicos que norteiam os estudos paleobiogeográficos, entre eles o de dispersão e vicariância. Além disso, exemplificaremos um dos métodos de análise paleobiogeográfica, o de pan-biogeografia e a aplicabilidade dele. Depois, você estudará como a distribuição espacial desses fósseis podem ser

utilizados para estabelecer zoneamentos de ocorrência comum, mesmo entre bacias. Finalmente, veremos como ocorre o intercâmbio faunístico, dando especial atenção ao Grande Intercâmbio Faunístico das Américas. Esses conteúdos, com certeza, lhe ajudarão a deixar seu relatório com mais qualidade e aumentarão a chance de o parque ser nomeado para integrar a desejada lista de geoparques globais.

Não pode faltar

Na última seção da unidade anterior, abordamos a paleoecologia, que, relembrando, dedica-se a entender a distribuição dos organismos, seus hábitos, tendência de organização e interação, e, além disso, as condições ambientais que proporcionam o desenvolvimento da vida no passado geológico. A paleobiogeografia, em contrapartida, busca oferecer uma explicação do porquê de um grupo de organismos estar em um local e não em outro, de forma a dar razões de larga escala temporal e espacial que levou ao desenvolvimento dos organismos, por exemplo, mudanças eustáticas (nível do mar), construção de cadeias de montanhas (tectônica de placas), mudanças climáticas etc. Para isso, são usados grupos exclusivamente fósseis para se fazer tais estudos paleobiogeográficos, como o próprio nome já indica.

O avanço da paleobiogeografia se deve, em grande parte, aos estudos da biogeografia, da qual se emprestam muitos conceitos. O conceito-chave mais importante é o de área de distribuição, que pode ser definida como uma área geográfica determinada, que é ocupada por populações, espécies ou táxons supraespecíficos. Essa área é delimitada por barreiras físicas (por exemplo: um oceano) ou barreiras ecológicas (condições ambientais específicas que impedem o desenvolvimento de um grupo taxonômico). O sucesso colonizador (ou o fracasso) de determinada espécie dependerá, em última instância, da eficiência do tipo de barreira.



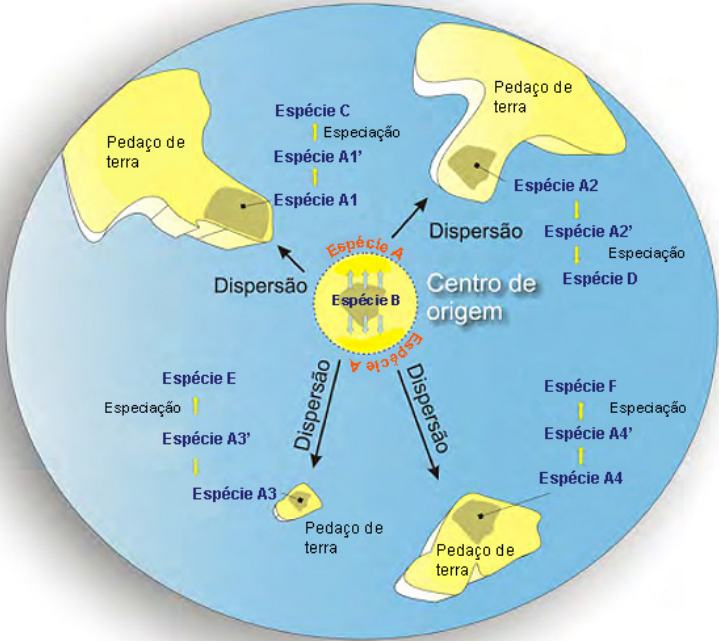
Uma barreira para determinado grupo de organismos pode atuar como uma ponte para outra e vice-versa?

Além disso, a partir das ideias evolutivas de Charles Darwin (1809-1892), Alfred R. Wallace (1823-1913) e Leon Croizat (1894-1982), surgem duas linhas de abordagens biogeográficas que são também aplicadas em dados fósseis: 1ª) dispersão (translocação geográfica) e 2ª) vicariância. Na primeira, se supõe que as espécies se originavam a partir de um centro de origem (a ocorrência de fósseis mais antigos é provável nesses centros de origem) e espalhavam-se, isto é, havia uma dispersão (RIBEIRO; ILHA, 2015). Após essa dispersão, haveria uma sequência de eventos de especiação, na qual novas espécies surgiriam, deslocando as mais antigas para as zonas periféricas (Figura 4.1).

Cabe ressaltar que, como muitas ideias sobre dispersão foram publicadas anteriormente à Teoria da Tectônica de Placas, os autores da época assumiam que as barreiras (físicas, principalmente) eram imóveis e sua existência era prévia ao fenômeno de dispersão. De qualquer maneira, para que esse fenômeno ocorra, é necessário que haja rotas de dispersão, que tem início no centro de origem.

Para tanto, existem basicamente três rotas: i) corredor, considera que as condições ecológicas de cada extremidade de área de distribuição seriam similares e, assim, permitiria o livre fluxo ao longo dessa área, fato que contribuiria para uma maior homogeneidade; ii) filtro, considera que ao longo da área de distribuição há uma mescla de condições ecológicas favoráveis e desfavoráveis, de forma que só os organismos mais bem adaptados conseguiriam alcançar os extremos; e iii) páreo, onde a distância entre os extremos é tão grande e as condições ecológicas nas zonas intermediárias são muito desfavoráveis, que a chance de sucesso é rara.

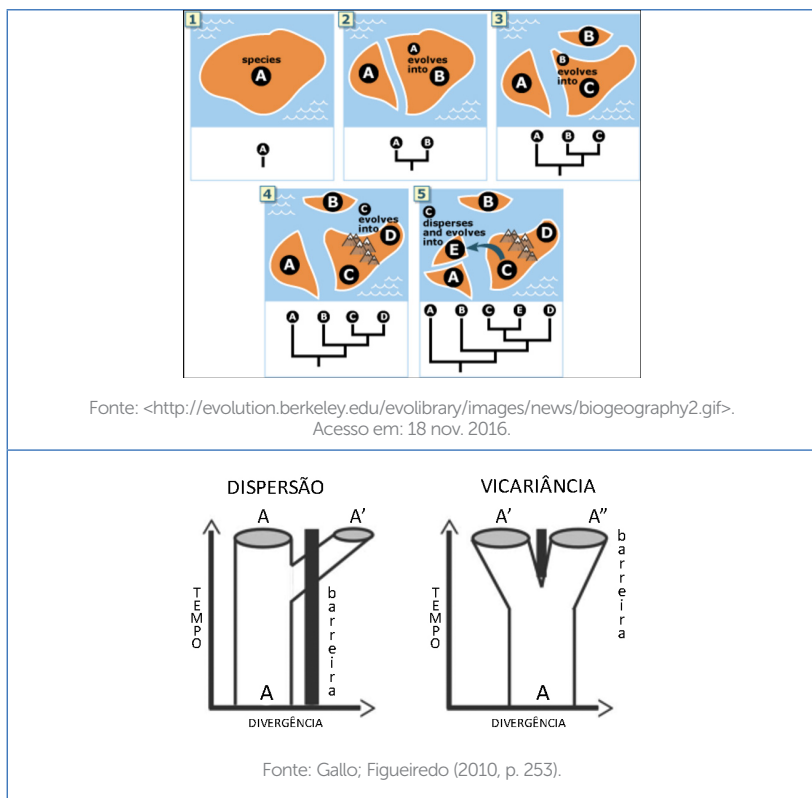
Figura 4.1 | Imagem demonstrativa do fenômeno de dispersão, destacando os eventos de especiação decorrentes



Fonte: Ribeiro; Ilha (2015, p. 336).

A segunda linha de abordagem biogeográfica, vicariância, baseia-se na hipótese de que a evolução de determinado grupo de organismos se deu a partir do surgimento de barreiras, que os separavam em grupos menores. Com esse isolamento geográfico, os organismos sofriam uma restrição reprodutiva e, após longos períodos de tempo, novas espécies surgiriam. Com o passar do tempo, as populações originais, que predominavam antes do evento vacariante, perdiam espaço e eram substituídas pelas espécies novas (Figura 4.2A).

Figura 4.2 | Exemplificação do fenômeno de vicariância (A) e ilustração da diferença entre dispersão e vicariância (B)



Fonte: Ribeiro; Ilha (2015, p. 336).

Note que o surgimento ocorre pelo aparecimento da barreira (ecológica ou física), a qual pode ser dinâmica e, portanto, não é imóvel e preexistente, como preconizam os defensores da dispersão. Logo, a barreira, no caso da vicariância, é da mesma idade dos grupos de organismos separados por ela (Figura 4.2B). A explicação dessa linha de pensamento biogeográfico se tornou mais sólida com o advento da Tectônica de Placas, mais especificamente sobre a Deriva Continental.



Deriva Continental é a teoria pioneira, apresentada em 1912 pelo meteorologista alemão Alfred Wegener, que postulou que as massas continentais da Terra não eram imóveis, mas, sim, dinâmicas, argumentando que os continentes se moviam.

A partir desses conceitos, há uma série de métodos que são aplicados no estudo paleobiogeográfico, ou seja, visando ao estudo de táxons extintos (fósseis), sendo que atualmente a ênfase se dá com base na vicariância. Um exemplo desse estudo é a pan-biogeografia, estabelecida por Croizat (1952, 1958, 1964), que consiste na união de localidades ou áreas de distribuição de ocorrência de um determinado táxon por meio de linhas seguindo, como critério, a mínima distância entre eles. Dessa forma, temos as linhas individuais. Ao fazermos isso para diferentes grupos, que não estão relacionados filogeneticamente, teremos uma série de linhas que coincidem, dando origem a um traço generalizado. Isso demonstra uma história comum por vicariância (GALLO; FIGUEIREDO, 2010).



Exemplificando

Para exemplificar, na Figura 4.3A está representada a linha individual de anfíbios ritidosteídeos (amarelo), mastodontossaurídeos (vermelho) e lydekkerínídeos (azul), enquanto na Figura 4.3B está o traço generalizado da sobreposição das linhas individuais.

Figura 4.3 | Linha individual de três espécies de anfíbios (A) e traço generalizado relativo à sobreposição das diferentes espécies (B)



Fonte: Ribeiro; Ilha (2015, p. 351).



Fonte: Ribeiro; Ilha (2015, p. 351).



Para se aprofundar mais nos conceitos de paleobiogeografia, recomendamos a leitura do Capítulo 16, de Carvalho (2010) e do Capítulo 16, de Soares (2015).

RIBEIRO, J. R. I.; ILHA, A. L. R. Paleobiogeografia: a dinâmica da Terra e da vida. In: SOARES, M. B. (Org.). **A paleontologia na sala de aula**. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Paleontologia, 2015, 714p. Disponível em: <<http://www.paleontologianasaladeaula.com/>>. Acesso em: 9 jan. 2017.

GALLO, V.; FIGUEIREDO, F. J. Paleobiogeografia. In: CARVALHO, I. S. (Org.). **Paleontologia: conceitos e métodos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Inter-ciência, 2010, v. 1, p. 351-370. Disponível em: <<http://www.labictio.uerj.br/?download=paleobiogeografia.pdf>>. Acesso em: 9 jan. 2017.

A partir do posicionamento geográfico dos fósseis encontrados, também podemos estabelecer zonas onde a ocorrência dos grupos fósseis revela alguma informação paleobiogeográfica. O desenvolvimento desse zoneamento é importante para a compreensão da evolução biológica da espécie, mas, sobretudo, nos permite estudar a evolução geológica de uma determinada região, de uma bacia sedimentar ou até mesmo de várias bacias sedimentares. Como ferramenta auxiliadora, os estudos bioestratigráficos identificam intervalos em que a abundância (ou ausência) de algumas espécies de fósseis e/ou microfósseis, que nos remetem a cenários paleogeográficos específicos e, portanto, dão dicas sobre a configuração geológica antiga. Por exemplo, para deixar o assunto mais prático e aplicado, vamos analisar os dados de braquiópodes, que são fósseis abundantes do período Devoniano de muitas bacias sedimentares brasileiras. A ocorrência desses animais está relacionada ao ambiente marinho e, segundo estudos recentes (FONSECA 2001; GAMA JR., 2008), estes organismos possuíam distribuição geográfica bastante ampla, disseminada pelas bacias Amazônica, Parnaíba e Paraná. Essas bacias encontram-se, atualmente, bem separadas e distantes umas das outras, conforme a Figura 4.4 demonstra.

No entanto, isso nem sempre foi assim. O descobrimento de espécies de braquiópodes (*Amphigenia cf. a. elongata*), que ocorre em rochas eifelianas (estágio inferior do Devoniano médio) das bacias do Parnaíba e do Amazonas, nos permite interpretar, por correlação fóssil, que havia uma conexão entre essas duas bacias, a qual possibilitou esse intercâmbio entre os organismos.

Figura 4.4 | Mapa das bacias sedimentares brasileiras



Fonte: Bizzi et al. (2003, p. 118).

Note a separação entre as bacias do Amazonas, Parnaíba e Paraná. Além disso, o registro de braquiópodes da espécie *Australocoelia palmata*, em rochas da Formação Pimenteira (Devoniano Médio, Eifeliano Superior), da bacia do Parnaíba, e em rochas da Formação Ponta Grossa (Devoniano Inferior, Emsiano), da bacia do Paraná, revela que havia uma conexão também entre as duas bacias, indicando, de certa forma, uma deposição contemporânea entre os sedimentos dessas duas formações (GAMA JR., 2008). Esse tipo de informação, além de inovadora, esclarece uma história geológica singular e, anteriormente, desconhecida, revelando uma paisagem paleobiogeográfica, bem diferente do atual cenário biogeográfico.

Conforme vimos, no início dessa seção, se encontrarmos mais espécies de diferentes organismos em área de distribuição similar, mais reforçada ficaria a hipótese de que houve conexão entre as

duas bacias, o que de fato acontece também nesse caso citado anteriormente. A descoberta de trilobitas da espécie *M. tuberculatus* nas rochas devonianas confirma essa hipótese formulada (MEIRA, 2016), indicando possíveis ocorrências de rotas de migração das espécies durante ciclos transgressivos (estágios em que o nível do mar avança em direção ao continente) que, provavelmente, conectava os mares epicontinentais que havia sobre o território brasileiro.

Como podemos ver, a aplicação dos fósseis para estudos paleobiogeográficos, aliados a dados bioestratigráficos, que permitem um correlacionamento em termos de idade, aporta informações valiosas, pois, ao definirmos essas zonas conectadas entre bacias marinhas, é possível estudarmos as rotas de dispersão dos organismos. Assim, podemos compreender como ocorre o surgimento de novas espécies e, além disso, como os eventos de especiação estão relacionados ao estabelecimento de eventos de intercâmbios faunísticos.

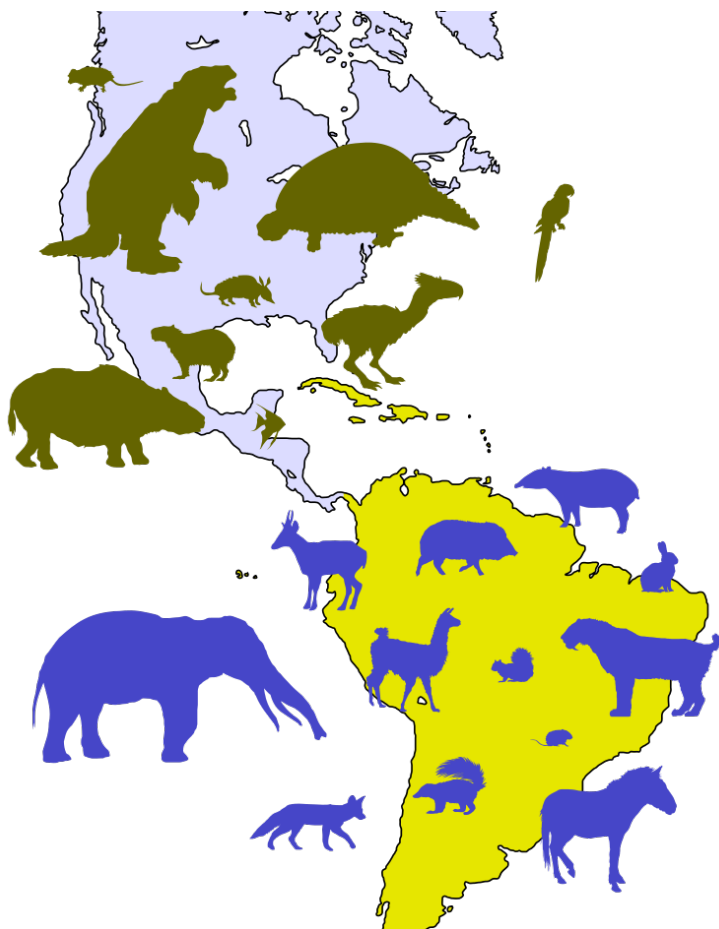
Com relação a isso, é importante analisarmos o Grande Intercâmbio Faunístico da América (Figura 4.5) que, segundo muitos pesquisadores, teria ocorrido durante o Piacenziano, no Plioceno superior (aproximadamente três milhões de anos). Esse evento permitiu, através da consolidação do Istmo do Panamá, que a fauna da América do Sul migrasse para a América Central e do Norte, e vice-versa. Dessa maneira, houve uma “troca” de táxons bastante intensa de forma que muitos animais sul-americanos, apresentam ancestrais norte-americanos, e o mesmo acontece com os norte-americanos. Como exemplos de táxons que migraram para a América do Sul temos o *Smilodon* (tigre-dente-de-sabre) e os camelídeos (camelos). Já os que migraram para a América do Norte, temos como exemplo as *Hydrochoeridae* (capivaras), *Dasypodidae* (tatus), *Erethizontidae* (porco-espinho), beija-flor e a preguiça-gigante (*Megalonyx*), os quais se instalaram ao sul do continente norte-americano.



Assimile

Um istmo é uma estreita porção de terra emersa que se encontra cercada por água em ambos os lados que interliga duas grandes áreas continentais.

Figura 4.5 | Mapa ilustrando as principais faunas envolvidas no intercâmbio faunístico. Em verde-castanho, os animais norte-americanos com ancestrais sul-americanos e, em azul, os animais sul-americanos com ancestrais norte-americanos



Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Grande_Interc%C3%A2mbio_Americano#/media/File:Great_American_Biotic_Interchange_examples.svg>. Acesso em: 18 nov. 2016.

No entanto, não foram somente os representantes da fauna que realizaram esse intercâmbio. Cody et al. (2010), por exemplo, demonstraram que para as plantas o intercâmbio ocorreu bem antes, relevando um evento assíncronico. Adicionalmente, outras análises feitas com fósseis de alguns animais revelaram que sua dispersão teria ocorrido antes do completo fechamento do istmo, há cerca de 3 Ma, como dito anteriormente. Por isso, constantemente, o assunto é debatido e

diversas opiniões controversias surgem. Um fato geológico que ajuda a explicar tanta controvérsia é que o Istmo do Panamá é formado por rochas formadas em ilhas vulcânicas, as quais, dependendo da proximidade dos centros eruptivos, originam um conjunto de ilhas que possuem certo grau de conexão, ou, pelo menos, curto distanciamento, o que favoreceria a migração de algumas espécies mais resistentes.

Sem medo de errar

Antes de continuarmos, vamos retomar a situação prática lançada no início dessa seção. Lembre-se de que você trabalha em um parque natural com inúmeras ocorrências fossilíferas, cujas rochas são dos períodos Devoniano (Paleozoico) e Neógeno (Cenozoico), mais especificamente do Plioceno, e que agora você também faz parte do grupo de trabalho que encaminhará um relatório para a UNESCO, solicitando que o parque integre a lista de Geoparques Globais (*UNESCO Global Geoparks*) da entidade. Você, na sua mesa de trabalho dentro do escritório do parque, começou a buscar mais informações sobre as rochas que afloram no local e também os fósseis já encontrados. Como resultado de sua pesquisa, você descobriu que havia alguns trabalhos que relatavam a ocorrência de braquiópodes e trilobitas, do Paleozoico, e alguns fósseis de mamíferos, entre eles o tigre-dente-de-sabre (*Smilodon*).

A partir disso, você decidiu ir ao encontro de outras informações sobre a importância desses achados para o estudo paleontológico e descobriu que eles são importantes em estudos paleobiogeográficos. A partir desse momento, no entanto, você se deparou com algumas dúvidas, as quais precisam ser respondidas para que consiga finalizar a primeira etapa do seu relatório, sendo elas: quais são os principais conceitos paleobiogeográficos? Como é possível correlacionar a descoberta de fósseis com outras ocorrências em localidades geográficas diferentes? Quais são as implicações paleogeográficas da descoberta do tigre-dente-de-sabre?

Por isso, para que você consiga dar prosseguimento à elaboração do relatório, é importante que se recorde que, conforme abordamos aqui no livro didático, há dois principais conceitos paleobiogeográficos, ambos ligados ao surgimento de espécie e sua relação com a situação geográfica em que estavam inseridos. O primeiro (dispersão)

destaca que as espécies se originavam a partir de um centro de origem e, posteriormente, dispersavam-se. Após essa dispersão, haveria uma sequência de eventos de especiação, na qual novas espécies surgiriam, deslocando as mais antigas para as zonas periféricas. Nessa linha de pensamento, assume-se que as barreiras (físicas, principalmente), que induziam a especiação, eram imóveis e sua existência era prévia ao fenômeno de dispersão. O segundo (vicariância), baseia-se na hipótese de que a evolução de determinado grupo de organismos se deu a partir do surgimento de barreiras, ou seja, o surgimento ocorre pelo aparecimento da barreira (não é imóvel e preexistente). Por isso, com esse isolamento geográfico, os organismos sofriam uma restrição reprodutiva e novas espécies surgiam.

Sobre a segunda pergunta, você deve destacar que uma das maneiras de se fazer o correlacionamento é a partir do posicionamento das ocorrências fossilíferas no espaço geográfico, de maneira que os estabelecimentos desses achados podem ser traçados conforme o método Pan-biogeográfico, desenvolvido por Croizat. Assim, ao gerar essas linhas, você analisa possíveis zonas onde a ocorrência do fóssil está relacionada, tanto temporal quanto espacialmente.

Por último, você deve deixar claro no documento que a ocorrência do tigre-dente-de-sabre (*Smilodon*), na unidade de conservação, uma espécie originária da América do Norte, é uma evidência de que o intercâmbio faunístico ocorreu na área onde o parque está instalado. Como vimos, esse fato faz parte do Grande Intercâmbio Faunístico da América, que aconteceu há aproximadamente 3 Ma. Com isso, é possível que haja mais fósseis relacionados a esse evento, os quais podem revelar novas informações sobre esse importante acontecimento biológico.

Avançando na prática

Geoparques: alternativas sustentáveis

Descrição da situação-problema

O presidente da associação de municípios que integra a região do parque natural onde você trabalha ficou sabendo da formação do grupo de trabalho que está desenvolvendo o relatório a ser enca-

minhado para a UNESCO. A notícia de que, com o estabelecimento do geoparque na região, a atratividade turística dos municípios sofreria um alto impacto positivo, o deixou animado. Afinal, o propósito da criação do geoparque é justamente criar um sistema de gestão ambiental que proporcione uma administração holística que integra a proteção do patrimônio paleontológico, a educação e o desenvolvimento econômico sustentável da região.

Tendo em vista o objetivo dessa possibilidade se concretizar, ele convidou toda a equipe de trabalho, inclusive você, para uma apresentação da proposta de estabelecimento do geoparque para diversas autoridades (prefeitos e vereadores dos municípios), moradores e até mesmo a imprensa. No dia do evento, após a apresentação de vocês, surgiram, naturalmente, algumas perguntas sobre o tema. Algumas delas foram direcionadas a você: a ocorrência de fósseis de braquiópodes e trilobitas no parque pode sugerir algo sobre a paleogeografia? Falando sobre o Grande Intercâmbio Faunístico da América, como ocorreu esse evento?

Agora é com você. Esclareça as dúvidas que vieram do público.

Resolução da situação-problema

Como você acabou de ver nessa seção, a ocorrência de braquiópodes e trilobitas, da mesma espécie nas bacias do Amazonas, Parnaíba e Paraná, sugerem que havia uma conexão entre elas no Devoniano. No entanto, isso não significa que os fósseis de braquiópodes e trilobitas encontrados no parque sejam exatamente os mesmos que foram descobertos nesses locais acima mencionados. No entanto, a implicação paleogeográfica que se pode fazer é que esses fósseis indicam a existência de um ambiente marinho, ou seja, é possível afirmar que a região onde o parque se encontra era um mar no período Devoniano.

Esclarecendo a segunda pergunta, você aprendeu que, anteriormente, a América do Norte e a do Sul estavam desconectadas, pois não havia indicativos da fauna norte-americana na América do Sul, e vice-versa, antes do Plioceno. O estabelecimento do Istmo do Panamá foi formado pela intensa atividade vulcânica, a qual desenvolveu um conjunto de ilhas, criando uma paisagem que levou à conexão entre os dois continentes. Com isso, criou-se uma rota de migração da qual os animais (e vegetais) se aproveitaram. O resultado é o interessante intercâmbio de espécies, que aumentou a biodiversidade das Américas.

Faça valer a pena!

- 1.** É senso geral que inúmeros fatores bióticos e abióticos, entre eles a disponibilidade de alimento e água, forçam a migração dos animais de um local para outro. Um conhecido exemplo são as andorinhas, que se deslocam sentido Hemisfério Norte ou Hemisfério Sul, de acordo com o clima da região em que estão.

Sabendo que durante o Plioceno no continente americano ocorreu o grande intercâmbio faunístico da América, é correto afirmar que os:

- a) Tigres-dente-de-sabres migraram da América do Sul para a América do Norte.
- b) Camelos migraram da América do Sul para a América do Norte.
- c) Beija-flores migraram da América do Sul para a América do Norte.
- d) Beija-flores migraram da América do Norte para a América do Sul.
- e) Tatus migraram da América do Norte para a América do Sul.

- 2.** A paleontologia, ramo da geologia, que realiza o estudo de animais pré-históricos fossilizados encontrados preservados em rochas sedimentares com mais de 10 mil anos, é fundamental para compreensão da evolução dos animais, bem como na análise voltada à prospecção petrolífera.

Assim, é correto afirmar que o ramo da paleontologia responsável pelo estudo da dispersão e vicariância dos animais no ambiente pré-histórico é a:

- a) Paleoeecologia.
- b) Paleobiogeografia.
- c) Paleocnologia.
- d) Paleossinacologia.
- e) Paleometria.

- 3.** Vitor, aluno de mestrado de geociências da Universidade Brasil Verde, ao analisar os dados de sua dissertação, percebeu que a espécie de mamífero B, localizada na Bacia do Paraná, também foi registrada na Bacia do Parnaíba. Estudos anteriores afirmaram que a espécie teria surgido nos mares epicontinentais preservados da Bacia do Parnaíba.

Assim, considerando os dados observados por Vitor e expostos na bibliografia, é correto afirmar que a espécie de mamífero B encontrada na Bacia do Paraná, sofreu um efeito evolutivo chamado de:

- a) Dispersão.
- b) Vicariância.
- c) Alopatria.
- d) Migração.
- e) Alogênia.

Seção 4.2

Prática paleontológica

Diálogo aberto

Caro aluno, seja bem-vindo à segunda seção dessa unidade, denominada “Prática paleontológica”. Para darmos prosseguimento ao seu processo de aquisição de conhecimento sobre as principais definições e conceitos da paleontologia aplicada, você deve primeiro se lembrar de que já aprendeu os princípios paleobiogeográficos e como eles são utilizados para realizar interpretações da evolução biológica e geológica de determinadas regiões. Além disso, você viu o que é intercâmbio faunístico e sua importância para a diversificação das espécies.

Agora, para que possa continuar com seu trabalho, desenvolvendo a segunda etapa do relatório que lhe foi solicitado na seção anterior, você deverá explicar como são as etapas da prática paleontológica, desde a prospecção até a exposição. Antes, que tal recordarmos nossa situação? Você foi aprovado no concurso público para trabalhar num órgão que administra um parque natural com inúmeras ocorrências fossilíferas, cujas rochas são dos períodos Devoniano (Paleozoico) e Neógeno (Cenozoico), mais especificamente do Plioceno. Logo no início de seu trabalho, você foi convidado pelo diretor do parque para compor o grupo de trabalho que encaminhará um relatório para a UNESCO, solicitando inclusão do parque na lista de Geoparques Globais (*UNESCO Global Geoparks*) da entidade.

Visando dar continuidade à construção do relatório, o diretor do parque lhe solicitou que, nessa segunda parte do documento, descreva as etapas da prática paleontológica que são desenvolvidas no parque onde vocês trabalham. Desse modo, você deve fazer um relato das atividades que são levadas a cabo desde a etapa de pesquisa prévia até a exposição dos fósseis no museu do parque nacional, por exemplo. Portanto, os seguintes pontos devem ser explorados no seu documento: como é feita a seleção dos locais onde será realizada a escavação? Como é feita a preparação dos fósseis em laboratório? De que maneira pode ser feita a exposição dos fósseis?

Para responder a estas dúvidas e elaborar a segunda etapa do trabalho, você aprenderá nesta seção que a prática paleontológica se divide em quatro etapas básicas: 1ª) prospecção, escavação e coleta; 2ª) preparação laboratorial; 3ª) curadoria; e 4ª) exposição. Para que essas etapas sejam cumpridas, veremos que há diferentes fontes de informações, técnicas e metodologias a serem seguidas visando à otimização de recursos financeiros e tempo. Além disso, veremos que há uma série de ferramentas e abordagens que deixam o fóssil mais “atrativo” e chame a atenção do público especializado e leigo.

Não pode faltar

Nas seções anteriores, você aprendeu os conceitos básicos que norteiam as principais áreas da paleontologia, tanto na parte científica quanto aplicada. Agora passaremos a ver um pouco mais os aspectos ligados à prática paleontológica, destacando os procedimentos e as etapas básicas a serem seguidas, desde a pesquisa para a localização de afloramentos com maior probabilidade de haver fósseis (prospecção) até sua preparação laboratorial, curadoria e exposição. Antes de iniciar, no entanto, não se iluda. A descoberta de fósseis intactos, com todas as suas partes duras preservadas (como o esqueleto), são raras e, de forma ocasional, equivocadamente reportadas pelas mídias televisivas e impressas. A prática profissional é muito mais complicada e cruel.

Como vimos na Seção 3.1 da Unidade 3, há inúmeros fatores que afetam o grau de preservação de um fóssil, mas cabe aqui enfatizar que o potencial de preservação dos vertebrados, invertebrados, microfósseis e plantas são variados, de forma que para a recuperação desses fósseis nas rochas em que ficaram conservados é necessário um estudo detalhado. A primeira etapa que merece atenção é a da pesquisa prévia, a qual é conduzida, muitas vezes, antes da prospecção propriamente dita. O objetivo é subsidiar a escolha de um determinado tipo de organismo (ou conjunto de organismos) que viveu durante um período geológico específico, afinal não há tempo hábil, nem recurso financeiro disponível, para simplesmente sair a campo e localizar locais de forma aleatória. Assim, é importante atentar-se para as rochas.

Como vimos na Seção 1.2, as rochas ígneas se formam em condições, pressão e temperatura adversas para a preservação do registro fossilífero, de modo que podemos considerá-las, a priori, estéreis do ponto de vista paleontológico. O mesmo vale para as rochas metamórficas de médio e alto grau, a exceção sendo as rochas metamórficas de baixo grau (por exemplo, as ardósias), as quais podem conter fósseis preservados. Entretanto, são as rochas sedimentares que possuem maior relevância para a paleontologia e, portanto, o foco na etapa de pesquisa são, prioritariamente (se não únicas), essas rochas.

Para isso, analisamos os mapas geológicos disponíveis que, normalmente, são acompanhados de notas explicativas, as quais detalham melhor as características geológicas em termos descritivos, associando-as aos elementos cartográficos encontrados nos mapas. Para a pesquisa paleontológica, uma das informações mais importantes é o ambiente de formação da rocha, pois isso dará uma ideia dos possíveis fósseis a serem encontrados e, adicionalmente, o seu potencial de preservação. Complementarmente, é comum utilizar trabalhos científicos anteriormente publicados para guiar de forma mais eficiente a escolha dos locais de prospecção.



Exemplificando

Para exemplificar a situação acima exposta, se estamos interessados em estudar um grupo específico de dinossauros, não iremos encontrá-lo em rochas permianas, por exemplo. Afinal, nesse período, os dinossauros nem existiam, recorda-se?

Após esse direcionamento inicial, começa a prospecção propriamente dita. Nessa fase, após identificados os locais onde há maior probabilidade de encontrar os fósseis, monta-se o “quartel general” de toda a etapa prospectiva. O objetivo é encontrar afloramentos propícios que apresentem indícios evidentes de material fossilizado. Essa etapa é fundamental, e prévia à escavação, por ser útil na otimização de tempo e recursos, evitando o esforço desnecessário de busca em locais estéreis. Nessa etapa é comum realizar a visitação em áreas de mineração, ativa ou abandonadas, pois esta atividade expõe a rocha e, consequentemente, os fósseis (Figura 4.6A e Figura 4.6B).

Figura 4.6 | Prospecção paleontológica em áreas de mineração desativada (A) e ativa (B)



No entanto, é comum também a prospecção em parques naturais e unidades de conservação, pois nesses locais há um grande número de afloramentos, barrancos, cavernas, entre outros locais, bastante preservados, o que facilita o trabalho de campo de todos os envolvidos com a pesquisa.

Selecionados os locais com maior probabilidade de ocorrência fóssilífera, a próxima parte é colocar a mão na massa, ou melhor, nas ferramentas. A etapa de escavação é a mais dispendiosa, exige tempo, dedicação e energia para retirar o material estéril do afloramento de forma que possamos coletar apenas o fóssil. Para isso, empregam-se diversos utensílios, levando em consideração também o tipo de fóssil a ser estudado. Por exemplo, fósseis de vertebrados exigem mais cuidado de manuseio – devido ao seu tamanho, grau de fragilidade e preservação – do que os microfósseis que, em contrapartida, demandam um controle milimétrico rigoroso estratigráfico e catalogação, até mesmo devido à aplicabilidade de sua análise (estudos paleoambientais e paleoecológicos, como vimos na Seção 3.3).

O material de trabalho para escavação e coleta, em linhas gerais, não se modificou muito ao longo do tempo e, até hoje, as pás, picaretas, martelos, marretas, ponteiras, trincha e pincel são utilizados, com algumas ferramentais mais modernas, como os marteletes pneumáticos. Para que a escavação e a coleta dos fósseis seja feita de maneira adequada, é preciso ter em mente que o material fóssil é de-

licado e frágil, por isso é necessário extrema cautela para recuperá-lo sem perder material. Além disso, ainda que não seja o foco do estudo, é imprescindível observar a relação do fóssil com o sedimento ou rocha na qual ele foi coletado (nível estratigráfico, textura do sedimento/rocha, espessura da camada etc.). Adicionalmente, sugere-se demarcar a área de escavação em quadrantes regulares numerados, fotografando-o, de forma que seja fácil sua identificação posterior.

A escavação consiste, então, em estabelecer um ambiente propício para encontrar o fóssil. Para isso, muitas vezes, é preciso confeccionar uma trincheira ou degrau que facilite o acesso ao fóssil. Caso isso não seja possível, escava-se ao redor do fóssil, mantendo-se uma distância segura para que as ferramentas não destruam o material (Figura 4.7A). Posteriormente, tanto em trincheira quanto em afloramentos, é possível realizar o procedimento de estabelecimento de blocos, os quais podem ser engessados. Primeiramente, forma-se uma jaqueta de gesso ao redor do bloco que é, em seguida, escavado na sua parte inferior e virado para engessamento da parte de baixo e, finalmente, a parte de cima, formando assim um bloco rígido (Figura 4.7B).

Figura 4.7 | Procedimentos realizados durante a escavação e a coleta de fósseis – Estabelecimento de blocos e quadrantes (A) e engessamento dos fósseis (B)

(A) Formação de blocos ao redor do fóssil e estabelecimento de quadrantes numerados



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/a/ab/WCFP_2.jpg>. Acesso em: 28 nov. 2016.

(B) Engessamento do bloco contendo fóssil



Fonte: adaptada de Kellner (2015, p. 413).



Para mais explicações sobre as técnicas de coleta e escavação, sugerimos a leitura do Capítulo 18, do livro de Soares (2015).

KELLNER, A. W. A. Do campo ao laboratório: a viagem de um fóssil. In: SOARES, M. B. (Org.). **A paleontologia na sala de aula**. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Paleontologia, 2015. Disponível em: <<http://www.paleontologianasaladeaula.com/>>. Acesso em: 28 nov. 2016.

Para fósseis menores, ou até microfósseis maiores, também é recomendada a utilização de embalagens plásticas, que devem ser lacradas e etiquetadas, sempre com referência a alguma informação geológica e estratigráfica de onde o fóssil foi retirado. Cabe destacar aqui que, além da escavação convencional, em afloramentos, em alguns casos a retirada do material fóssil se dá através de testemunhos de sondagem (amostra contínua de rocha na forma cilíndrica, coletada durante a perfuração), os quais normalmente recuperam microfósseis, motivo pelo qual a própria rotina de trabalho é diferente.

Depois de coletado o fóssil, e seu consequente transporte até o laboratório, inicia-se a etapa de preparação. Entende-se como preparação, em paleontologia, as atividades desenvolvidas para a retirada da matriz rochosa na qual o fóssil se encontra, deixando-o livre para análise. Embora aparentemente simples, essa etapa exige conhecimento de geologia (qual é a característica física e química do material rochoso em que o fóssil se encontra?) e anatomia (como é o esqueleto do organismo?). Tudo isso permite que a preparação seja prática e sem perda de material.

De forma generalizada, todas as técnicas de preparação podem ser agrupadas em dois tipos diferentes: a) preparação mecânica e b) química. Na **etapa mecânica** são empregados diversos equipamento que permitem um "desbaste" adequado da rocha matriz. Martelos e ponteiros de diversos tamanhos auxiliam na remoção de material grosseiro e também em fósseis mais resistentes à vibração. Para detalhes mais delicados, utilizam-se instrumentos odontológicos (espátulas, esculpidores, brocas etc.), acompanhados de outras ferramentas, como pincéis, sopradores, talhadeiras, martelos pneumáticos, entre outros. Para a remoção de envoltório de gesso, é comum o emprego da esmerilhadeira e aspirador de pó (para a remoção das partículas).

Para minimizar os impactos que o fóssil sofre, recomenda-se apoiá-lo sobre travesseiros de areia situados sobre uma bancada firme e que esteja posicionada a uma altura adequada que permita o trabalho em pé ou sentado em uma banqueta confortável (Figura 4.8). Nessa bancada, a iluminação deve ser prioridade, com luzes direcionadas ao material fóssil, que deve estar posicionado em uma lente de aumento. Conforme o fóssil ficar exposto, emprega-se uma série de substâncias que visam a sua proteção, como o para-loide (acrilóide).



Refleta

Qual seria a solução que você adotaria caso, durante a preparação mecânica de algum fóssil, um pedaço do fóssil viesse a fragmentar? Seria possível colá-lo novamente no local?

Na **preparação química** é utilizada uma série de ácidos, geralmente orgânicos, para a dissolução de alguns componentes da rocha matriz. Os ácidos normalmente utilizados são os ácidos acéticos (CH_3COOH) e fórmicos (CH_2O_2), os quais possuem a capacidade de dissolver compostos com carbonato de cálcio, presente nas rochas bioquímicas e, em menor quantidade, nas rochas siliciclásticas. Em alguns casos, em que os fósseis são formados por carbonato de cálcio, deve-se realizar a proteção prévia e, em outros casos, em que o fóssil é formado por fosfato de cálcio (que se dissolve a uma taxa mais lenta que o carbonato de cálcio), aconselha-se a rápida intervenção para neutralização da reação, visando à preservação das feições de interesse.



Você já viu isso na Seção 2.1, mas não custa lembrá-lo: os minerais carbonáticos (como a calcita) são instáveis e se dissolvem sob o efeito de ácidos, mesmo que fracos. Já os minerais siliciclásticos (como o quartzo) são quimicamente estáveis e, geralmente, não se dissolvem facilmente.

Figura 4.8 | Preparação mecânica de um fóssil, apoiado sobre uma bancada dotada de lupa binocular, com o auxílio de um martelo pneumático



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/62/Fossil_preparation_at_the_Condon_Center_lab.jpg>. Acesso em: 28 nov. 2016.

De qualquer modo, todo o espécime que sofrer ataque químico deve ser previamente limpo e protegido com uma substância “inerte”, que não sofrerá reação química com o reagente (como o próprio paraloide, massa de modelar, durepoxi, entre outros). Na sequência, os exemplares são imersos na solução diluída – para redução da concentração do ácido – por um determinado período de tempo, sendo constantemente monitorados (Figura 4.9). A paralisação da reação é feita através da neutralização da ação do ácido, que é normalmente realizada por meio de água corrente. Após isso, o fóssil é seco sem o auxílio de secadores, estufas ou qualquer tipo de forno, ou seja, somente ao ar livre. Feito isso, avalia-se a necessidade de novo ataque químico, caso contrário, segue-se para a lim-

peza e armazenamento final (ou ainda, se necessário, restauração de fragmentos).

Figura 4.9 | Exemplos fósseis imersos em uma solução contendo ácido diluído



Fonte: adaptada de Silva et al. (2015, p. 432).

Depois de totalmente preparado, os fósseis são catalogados e encaminhados aos acervos científicos. Esses procedimentos favorecem a criação de um banco de dados organizado e devidamente registrado e, além disso, protegem os exemplares de agentes físicos, químicos e biológicos que possam, aos poucos, degradá-los. Caixas forradas com espuma sintética e outros recipientes plásticos são normalmente utilizados para acomodar e separar os fósseis em gavetas e prateleiras, preferencialmente de aço. A madeira, comumente empregada, facilita a proliferação de microrganismos que reduzem a durabilidade do fóssil. Adicionalmente, amplitudes térmicas muito grandes favorecem o desenvolvimento de microfraturas que, com o tempo, fragmentam o fóssil. O ideal seria a aclimação permanente do local de armazenamento por meio de ar-condicionado e desumidificadores, embora esse cenário nem sempre seja o encontrado nos acervos brasileiros.

Com o auxílio da tecnologia, a cura paleontológica está se tornando cada vez mais digital e, com isso, qualquer um pode ter acesso a informações via internet, o que facilita a busca por exemplares já catalogados e armazenados.

A última etapa da prática paleontológica é a exposição dos fósseis, geralmente realizada em museus de instituições científicas voltadas à pesquisa e à educação. O enfoque, nesse caso, é a divulgação do patrimônio paleontológico de determinado local, que fica à mostra para a população em geral. No entanto, apesar do senso comum achar que os fósseis em exibição são somente aqueles extremamente bem preservados, isso não ocorre na prática. Ao invés de colocar os fósseis originais, muitas vezes, opta-se pela reprodução de cópias fiéis, preservando a integridade do fóssil original. Ao fazer isso, é possível multiplicar os fósseis e, além disso, permitir o intercâmbio de réplicas entre as instituições.

O uso de réplicas fósseis é importante também no caso de exposições itinerantes, como a que acontece em escolas e shopping centers. Nessas situações, o transporte constante, a remobilização e a montagem das exposições configuram-se cenários estressantes para o fóssil, podendo deteriorá-lo. Adicionalmente, o contato direto com um fóssil (mesmo sendo uma réplica) deixa o aprendizado muito mais visual, prático e imaginativo, o que é especialmente atraente para o público leigo.

A técnica geralmente empregada para a confecção de réplicas passa, primeiro, pela elaboração do molde, que pode ser interno ou externo, dependendo da feição anatômica de interesse para a exposição paleontológica. Diferentemente do que você aprendeu na Seção 3.1, aqui o molde e o contramolde (molde interno) são artificiais, criados com o intuito de capturar os detalhes do material fóssil original.



Pesquise mais

Para saber mais sobre a confecção dos moldes artificiais, elaboração das réplicas e suas diferentes técnicas, recomendamos a leitura do Capítulo 20, do livro de Soares (2015).

OLIVEIRA, T. V.; PRETTO, F. A.; NETO, V. D. P.; MACEDO, P. A. Técnicas para confecção de réplicas de fósseis. In: SOARES, M. B. (Org.). **A paleontologia na sala de aula**. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Paleontologia, 2015. Disponível em: <<http://www.paleontologianasaladeaula.com/>>. Acesso em: 28 nov. 2016.

Outra forma de exposição paleontológica se dá por meio da reconstrução. O objetivo nessa técnica é diminuir as imperfeições que surgem devido às modificações durante a diagênese da rocha, que

pode manifestar-se na forma de fraturas, quebras ou até mesmo deformações. Complementarmente, ao estudar a anatomia do organismo fossilizado, analisando sua relação com ancestrais, é possível reconstruir algum elemento faltante, uma parte do fóssil que não foi encontrado no local de escavação. Aqui se empregam diversos materiais, como gesso, argila, resinas etc.

Com o avanço tecnológico, principalmente na área de tomografia de raios-x, tem se tornado cada vez mais comum a utilização de equipamentos de análises não destrutivas. O objetivo é fazer um escaneamento do fóssil e, aplicando técnicas computacionais, reconstruí-lo tridimensionalmente sem necessidade de muito trabalho manual. Assim, ao gerar um arquivo digital do fóssil, é possível projetá-lo em uma tela e expô-lo de forma interativa. Outra possibilidade, é fazer a modelagem do fóssil através da tomografia e, posteriormente, imprimi-lo em uma impressora 3D, a qual deverá se tornar cada vez mais utilizada com o tempo, até mesmo na área paleontológica.

Sem medo de errar

Relembrando brevemente a situação lançada no início da unidade, foi solicitado que você relatasse, no documento para a UNESCO, as etapas da prática paleontológica que são desenvolvidas no parque onde vocês trabalham. Desse modo, você deve abordar desde a etapa de pesquisa prévia até a exposição dos fósseis no Museu do Parque Nacional, por exemplo. Portanto, os seguintes pontos devem ser explorados: como é feita a seleção dos locais onde será feita a escavação? Como é feita a preparação dos fósseis em laboratório? De que maneira pode ser feita a exposição dos fósseis?

Portanto, para que você dê prosseguimento à resolução desse trabalho, é preciso, primeiramente, responder aos questionamentos. Com relação ao primeiro, você deve se lembrar de que, antes de efetivamente realizar as escavações em busca dos fósseis, você deve, antes de tudo, efetuar uma pesquisa prévia, pois isso o ajudará a subsidiar a elaboração dos objetivos. Com isso em mente, começa a etapa de prospecção paleontológica. Aqui, utilizam-se mapas geológicos e, complementarmente, trabalhos científicos publicados antes para guiar de forma mais eficiente a escolha dos locais onde será realizada a escavação e a coleta. Lembre-se de que, para que

consiga realizar essa etapa, é importante conhecer a geologia do local, afinal, é ela que irá guiá-lo de forma mais precisa a sua escolha.

Respondendo à sua segunda questão, você deve inserir em seu relatório que há, basicamente, dois tipos de preparação laboratorial dos fósseis. O primeiro e, geralmente, o mais desgastante, é a preparação mecânica. Essa atividade envolve a utilização de ferramentas como martelos e ponteiros de diversos tamanhos para a remoção de material grosseiro ou nos fósseis mais resistentes à vibração. Para detalhes, utilizam-se instrumentos odontológicos (espátulas, esculpidores, brocas etc.), e outras ferramentas como pincéis, sopradores, talhadeiras, martelos pneumáticos. Neste procedimento, o objetivo é fazer um “desbaste” adequado da rocha matriz, expondo o fóssil, como vimos anteriormente. O segundo tipo de preparação laboratorial é a preparação química, na qual são utilizados ácidos para a dissolução de alguns componentes da rocha matriz. Os ácidos normalmente empregados são os ácidos acéticos (CH_3COOH) e fórmico (CH_2O_2), comumente diluídos, os quais possuem a capacidade de dissolver compostos gradualmente. Essa etapa é realizada através da imersão na solução durante determinado período de tempo e, posteriormente, checa-se a necessidade de continuar o processo. Caso contrário, realiza-se a neutralização. Lembrando que durante o procedimento o fóssil deve ser recoberto e, dessa forma, fique protegido.

Concluindo e solucionando sua terceira dúvida, atente-se para o fato de que são raros os casos em que o fóssil original deva ser encaminhado para exposição. Assim, o que geralmente se faz é replicá-lo, reconstruí-lo ou, cada vez mais comum nos dias de hoje, imageá-lo com equipamentos de alta resolução.

A elaboração da réplica envolve a preparação do molde, que pode ser interno ou externo, dependendo a feição anatômica de interesse para a exposição paleontológica, que é posteriormente preenchido com alguma substância sintética. A reconstrução envolve o reparo e de componentes originais do fóssil e até mesmo a criação de partes do fóssil cujo fragmento não tenha sido encontrado nas escavações. Para isso, no entanto, lembre-se de que é necessário o conhecimento sobre a anatomia do fóssil em estudo. A outra possibilidade é a criação de modelos digitais tridimensionais dos fósseis através da aplicação da técnica de tomografia computadorizada, a qual é caracterizada pela aquisição de imagens de altíssima resolução (muitas vezes na escala

micrométrica – μm). Assim, os fósseis podem ser expostos em telas projetadas e/ou TVs de alta definição, deixando a exposição totalmente digital e interativa, sem comprometer a integridade do fóssil.

Avançando na prática

Gestão do patrimônio paleontológico

Descrição da situação-problema

A universidade regional, cujo campus central fica numa cidade próxima ao parque onde você está trabalhando, lhe convidou para dar uma palestra sobre as etapas da prática paleontológica durante a semana acadêmica integrada dos cursos de Biologia, Engenharia e Gestão Ambiental. O tema principal do evento era “Gestão Ambiental Sustentável” e um dos subtemas era justamente a gestão dos patrimônios naturais do estado. Como sua participação nessa área está bem ativa, eles lhe solicitaram para colaborar com o evento.

Considerando que o público-alvo serão estudantes das fases iniciais do curso, você pensou em elaborar algo bastante interativo e didático. Além disso, você preferiu por ministrar a palestra de forma mais informal, deixando o ambiente mais descontraído e aberto para perguntas. Por isso, você resolveu dividir a palestra em duas partes: uma teórica e outra prática, quase como se fosse um “minicurso”. Assim, você primeiro foi à universidade e apresentou a parte teórica, abordando as principais etapas da prática paleontológica em sala. No outro dia, quando os alunos vieram à sede do parque para a parte prática, já tendo visto a parte teórica, é que as dúvidas começaram a surgir. Os seguintes questionamentos foram lançados: quais métodos de escavação existem, você poderia dar um exemplo? Durante a preparação química é preciso ter algum cuidado especial? Qual é a importância da curadoria paleontológica?

Agora é com você! Esclareça as dúvidas que os alunos possuem.

Resolução da situação-problema

Conforme vimos nessa seção, as escavações podem ser feitas em: a) degraus, que são afloramentos divididos em pequenas bancadas, de forma que o acesso ao material fóssil seja mais fácil; b)

trincheiras, as quais são escavadas em rochas/solos com o objetivo de expor alguma camada previamente protegida e assim garantir a escavação adequada até atingir o fóssil e, além disso, observar a relação do material fossilizado com o perfil estratigráfico; e c) em afloramentos naturais, onde já existem fósseis aflorantes e visíveis, precisando estabelecer, neste caso, apenas os limites dos fósseis e realizar a escavação ao redor do material e, com cuidado, se o organismo for frágil, engessá-lo na forma de um bloco único e rígido.

Esclarecendo a segunda pergunta, você deve lembrá-los de que os fósseis podem acabar dissolvidos com a aplicação do ácido, de maneira que é aconselhável recobri-los com algum material (massa de modelar, por exemplo), a fim de não permitir o contato direto com o ácido. Além disso, caso os fósseis sejam totalmente imersos numa solução, é importante fazer o monitoramento constante do andamento da reação.

Por último, respondendo ao terceiro questionamento, diga para os alunos que a curadoria é a etapa que garante o correto armazenamento dos fósseis e catalogação da base de dados, o que facilita a busca por material fóssil para futuras pesquisas e exposições em museus.

Faça valer a pena!

1. É comum observar pesquisadores produzindo e engessando grandes blocos de rochas ao longo das estradas na região de Santa Maria, Rio Grande do Sul. Nessa região afloram fósseis de dicinodontes (A), rincossauros (B), entre outros, e, por se tratar de fósseis de vertebrados com grande fragilidade, se faz necessário o envoltório de gesso.

A



Fonte: <<http://www.ufrgs.br/paleovert/paleo/projeto/stahleckeria.html>>. Acesso em: 11 jan. 2017.

B



Fonte: <<http://www.ufrgs.br/paleovert/paleo/projeto/hyperodapedon-sp.html>>. Acesso em: 11 jan. 2017.

É correto afirmar que ao deslocar o gesso até o laboratório de paleontologia, as etapas de retirada do fóssil da matriz é denominada:

- a) Preparação física.
- b) Preparação mecânica.
- c) Preparação pneumática.
- d) Preparação removedora.
- e) Preparação erosiva.

- 2.** Lucas Santos, aluno da escola Brasil Geológico, do interior de Minas Gerais, após a aula de métodos de coleta e exposição de fósseis, foi requisitado pelo professor para produzir um passo a passo com relação às etapas da prática paleontológica. Ele elencou os seguintes pontos: 1 – Escavação e coleta; 2 – Pesquisa prévia; 3 – Preparação química; 4 – Preparação mecânica; 5 – Réplica.

Entre os pontos selecionados por Lucas, é correto afirmar que a sequência de etapas é:

- a) 2 – 1 – 3 – 4 – 5.
- b) 1 – 2 – 4 – 3 – 5.
- c) 1 – 2 – 3 – 4 – 5.
- d) 2 – 1 – 4 – 3 – 5.
- e) 2 – 3 – 4 – 1 – 5.

- 3.** À medida que avança o conhecimento científico, ocorre a impulsão de novos métodos didáticos, novas maneiras de ensinar e aprender são estimuladas por diversos fatores, um deles é o avanço da tecnologia, onde as geociências têm se favorecido em vários quesitos, ampliando as fronteiras de pesquisa e ensino, entre eles a exposição de fósseis.

Considerando as informações acima, é correto afirmar que um tipo de utilidade da tecnologia para exposição de fósseis é:

- a) A réplica em molde.
- b) A réplica em contramolde.
- c) A digitalização e a projeção virtual.
- d) A réplica usual.
- e) A duplicata do fóssil.

Seção 4.3

Principais fósseis do Brasil

Diálogo aberto

Caro aluno, seja bem-vindo à última seção desta unidade e da disciplina, denominada “Principais fósseis do Brasil”. Ao final desse conteúdo, você adquirirá a competência geral da disciplina, de conhecer os princípios básicos da geologia e paleontologia fundamentados em uma visão evolutiva. Para darmos prosseguimento ao seu processo de conhecimento sobre a paleontologia aplicada, você deve primeiro se lembrar de que já aprendeu os princípios paleobiogeográficos e para que eles são utilizados, também o que é intercâmbio faunístico e sua importância para a diversificação das espécies. Além disso, na seção anterior, você viu como é dividida a prática paleontológica, na qual destacamos o papel metodológico normalmente seguido nos trabalhos de paleontologia.

Antes de avançarmos, que tal recordar nossa situação? Você foi aprovado no concurso público para trabalhar num órgão que administra um parque natural com inúmeras ocorrências fossilíferas, cujas rochas são dos períodos Devoniano (Paleozoico) e Neógeno (Cenozoico), mais especificamente do Plioceno. Logo no início de seu trabalho, você foi convidado pelo diretor do parque para compor o grupo de trabalho que encaminhará um relatório para a UNESCO solicitando inclusão do parque na lista de Geoparques Globais (*UNESCO Global Geoparks*) da entidade.

Agora, para que possa finalizar o seu trabalho, desenvolvendo a terceira etapa do relatório que lhe foi solicitado no início da unidade, foi decidido pelo Conselho do parque que você deverá demonstrar no documento que será encaminhado para os pareceristas da UNESCO quais são os fósseis do paleozoico e do cenozoico que ainda podem ser descobertos no parque. Lembre-se! Você deve estar atento aos períodos (idade) das rochas encontradas no parque e discorrer sobre: quais são os possíveis fósseis do Devoniano que podem ser encontrados no parque? E sobre o Neógeno,

há alguma possível descoberta? Por que não é possível que haja fósseis de dinossauros?

A fim de auxiliá-lo nesses questionamentos, estudaremos, nessa seção, os principais fósseis do Paleozoico inferior (Cambriano, Ordoviciano e Siluriano), do Paleozoico Superior (Devoniano, Carbonífero e Permiano), do Mesozoico (Triássico, Jurássico e Cretáceo) e do Cenozoico (Paleógeno, Neógeno e Quaternário), dando ênfase aos macrofósseis e também aos microfósseis do Brasil, portanto, é imprescindível que você leia o livro didático para que consiga dirimir suas dúvidas e concluir o seu trabalho. Que tal começarmos a colocar a mão na massa? Bons estudos!

Não pode faltar

Agora que vimos os principais assuntos que compreendem o entendimento de paleontologia básica, vamos fazer uma breve apresentação dos principais fósseis encontrados no Brasil. A leitura desse livro ajudará você na resolução da situação prática, mas também terá um caráter informativo, de divulgação científica do patrimônio fossilífero brasileiro. No entanto, como nosso assunto está dividido em eras geológicas, vamos, primeiramente, revisar a tabela do tempo geológico e como a dividimos especificamente para estudarmos os fósseis que ocorrem em território nacional.

A sequência de apresentação dos principais fósseis do Brasil será feita em ordem cronológica, isto é, se olharmos a tabela do tempo geológico (Figura 4.10), partiremos de baixo para cima, afinal os primeiros fósseis a surgirem foram os mais antigos. Conforme podemos ver na imagem, apresentaremos primeiro os fósseis do Paleozoico Inferior que, no nosso caso, compreendem os fósseis dos períodos Cambriano, Ordoviciano e Siluriano (I). Na continuação, veremos os fósseis do Paleozoico Superior, que englobam os períodos Devoniano, Carbonífero e Permiano (II). Finalizada a era Paleozoica, partiremos para a era Mesozoica (III) e, por último, finalizaremos com a era Cenozoica.

Figura 4.10 | Tabela do tempo geológico, destacando as eras e os períodos geológicos de ocorrência dos fósseis no Brasil

ÉON	ERA		PERÍODO	IDADE (Ma)
			ÉPOCA	
FANEROZOICO	CENOZOICA (IV)	Quaternário	Holoceno	0,011
			Pleistoceno	2,58
		Neógeno	Plioceno	5,33
			Mioceno	23
		Paleógeno	Oligoceno	33,9
			Eoceno	56
			Paleoceno	66
	MESOZOICA (III)	Cretáceo		145
		Jurássico		201,3
		Triássico		252,1
	PALEOZOICA	Paleozoico superior (II)	Permiano	298,9
			Carbonífero	358,9
			Devoniano	419,2
		Paleozoico inferior (I)	Siluriano	443,4
			Ordoviciano	445,2
			Cambriano	541
PRÉ-CAM-BRIANO	PROTEROZOICO			2.500
	ARQUEANO			4.000
	HADEANO			4.600

Fonte: adaptada de Soares (2015, p. 106).



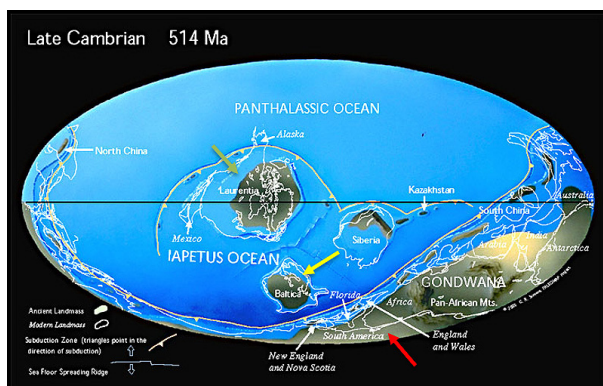
Assimile

Não esqueça e nem confunda, a era Paleozoica inferior é caracterizada pelos períodos Cambriano, Ordoviciano e Siluriano, enquanto que a era Paleozoica superior é marcada pelos períodos Devoniano, Carbonífero e Permiano.

Como você deve se lembrar, estudamos na Seção 3.2 o tempo geológico e a evolução da vida. Naquela ocasião, vimos que o período Cambriano é marcado pela explosão da vida. A causa desse fenômeno está possivelmente relacionada a diversos fatores, como o aumento do teor de oxigênio na atmosfera e nos mares – e a consequente aptidão dos organismos em utilizá-lo –, o início da reprodução sexual, fragmentação dos continentes (formando blocos continentais menores) e seu deslocamento para os trópicos (Figura 4.11A), ocorrência de maior vulcanismo, aumento de número de nutrientes no mar etc.

Figura 4.11 | Mapa paleogeográfico do Cambriano tardio (A) e exemplo de icnofóssil desse período (B)

(A) Mapa paleogeográfico do Cambriano superior (514 Ma), mostrando o deslocamento das massas



Fonte: <<http://www.scotese.com/newpage12.htm>>. Acesso em: 6 dez. 2016.

(B) *Cochlichnus lagartensis* (Fm. Estância, Bacia de Sergipe), icnofóssil de um possível animal vermiforme ou larva de inseto



Fonte: Muniz (1980, s.p.).

Nota: Em A, o continente Gondwana (seta vermelha), é onde estaria, aproximadamente, o Brasil na época. As setas amarela e verde indicam, respectivamente, as principais porções de terra da Europa e América do Norte.

Como nesse período a vida marinha era muito mais abundante, e o território onde hoje se encontra o Brasil estava emerso (fora d'água), o registro fóssil desse período é bastante escasso, tanto que até o presente momento, não foram encontrados fósseis corpóreos marinhos no país, o que corrobora a interpretação paleogeográfica mostrada no mapa da Figura 4.11A. Os únicos registros de vida cambriana no Brasil estão restritos aos icnofósseis, ou seja, os vestígios da atividade desenvolvida pelos organismos do passado, como ilustrado na Figura 4.11B. As principais ocorrências desses fósseis do gênero *Cochlichnus* sp. aparecem nas Bacias de Sergipe (SE) e Camaquã (RS).



Refleta

Por que há tão poucos registros de vida no Pré-Cambriano e Cambriano no Brasil?

A partir do Ordoviciano, e mais notadamente durante o Siluriano, com o Gondwana se deslocando mais para o norte, em direção aos trópicos, começa a aumentar o registro de vida. Mesmo assim, entretanto, os principais fósseis ficam restritos a icnofósseis (como o *Arthropycus alleghaniensis*, *Planolites*, *Skolithos isp.*) e microfósseis (acritarcos e quitinozoários). No entanto, o Grupo Trombetas (Bacia do Amazonas) é a unidade litoestratigráfica brasileira mais antiga a apresentar macrofósseis em suas rochas silurianas, encontrados principalmente nas formações Pitinga e Manacapuru: os graptólitos (*Climacograptus innotatus brasiliensis*).

No Paleozoico superior (II), começam a aparecer os vertebrados no registro fóssil. O mais notável é o aparecimento de restos de peixes, além dos já comuns microfósseis. A ocorrência de peixes fossilizados na Fm. Manacapuru (Bacia do Amazonas), é marcada por restos e espinhos de acantódios (*Machaeracanthus* s.p.) e possíveis condrictes. Nesse período também aparecem muitos braquiópodos (*Pleurochonetes comstocki*, *Spiriferida*), trilobitas, crinoides, restos de algas e os primeiros vegetais terrestres (Horneophytales e Cooksoniales), estes na Bacia do Paraná. Esses fósseis são representativos do Devoniano de algumas bacias brasileiras.

O registro Carbonífero do Brasil distingue-se do resto do mundo, principalmente, com relação à América do Norte e Europa.

Enquanto nessas regiões o calor era predominante, no Gondwana o clima era frio, por isso os fósseis são tão distintos. O cenário começa a mudar durante o Permiano, quando a vegetação era essencialmente arbórea, constituída principalmente pelas samambaias (*Pecopteris* sp. – Figura 4.12B), pteridospermas (samambaias com sementes) e coníferas (gimnospermas). O clima quente desse período, aliado à abundância de vegetação arbórea e arbustiva, favoreceu a geração de depósitos de carvão mineral, encontrados em Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Paraná. Além disso, há registro dos primeiros répteis, como o *Stereosternum tumidum* (Figura 4.12A).

Figura 4.12 | (A) Exemplar de um fóssil de um mesossaurídeo (*Stereosternum tumidum*) e (B) exemplar de uma samambaia fossilizada (*Pecopteris* s.p.), ambos do período Permiano



Como já vimos anteriormente, na Seção 3.2, o cenário Pós-Permiano foi completamente diferente. A extinção do Permiano dizimou 90% da vida marinha. Já ao final do período e início do Triássico (Mesozoico), a junção total do Pangea permitiu a migração de espécies de Norte a Sul, sendo o Gondwana uma região de conexão entre as massas continentais nortenhas e sulistas. Por essa razão, o número de fósseis do período Triássico, no Brasil, é bastante notável. A vegetação terrestre, adaptada à aridez, é umas das características do período. A Fm. Santa Maria (Bacia do Paraná), uma das mais ricas em fósseis do Triássico, tem como fósseis vegetais: coníferas (inclusive com troncos fossilizados), cicadáceas, ginkgoáceas (exemplo Ginkgo biloba – fóssil vivo) e a famosa Flora de Dicroidium. Além disso, com relação à fauna do Triássico, podemos destacar a clas-

se Sinapsida (Dicinodontes – *Dinodontosaurus turpior* Cox 1965), répteis (Rincossauros – *Brasinorhynchus mariantensis*), tecodontes (*Prestosuchus chiniquensis*) e dinossauros (*Staurikosaurus pricei* – um dos mais antigos dinossauros do mundo, Figura 4.13).

Figura 4.13 | Reconstrução do *Staurikosaurus pricei*, um dos mais antigos dinossauros do Brasil e do mundo, descoberto nas rochas triássicas da Fm. Santa Maria (Bacia do Paraná)



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a8/Staurikosaurus_pricei.jpg>. Acesso em: 6 dez. 2016.



Pesquise mais

Se você se interessa em aprofundar mais seus conhecimentos sobre os dinossauros, acesse a página do projeto “O Rio Grande do Sul no tempo dos dinossauros”. Nele, você verá vários animais que viveram durante o Triássico.

O Rio Grande do Sul no tempo dos dinossauros. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/paleovert/paleo/projeto/>>. Acesso em: 6 dez. 2016.

No Brasil, o período Jurássico representou um cenário desértico (inclusive onde hoje domina a Floresta Amazônica), em que a probabilidade de preservação fossilífera é bastante escassa. No Nordeste do Brasil, na Bacia de Sergipe-Alagoas e Recôncavo, por exemplo, há fósseis indicativos da fase rifte (abertura do Atlântico Sul, que viria a se consolidar somente no final do Cretáceo). Na Bacia do Paraná, mais especificamente na Fm. Botucatu, pistas de tetrápodes (formas dinossauroides bípedes, além de formas teromorfoides e mamali-formes), mamíferos, escorpiões e besouros são comuns. Além disso, conchostráceos (crustáceos bentônicos de ambientes aquáticos temporários) e ostracodes também são encontrados.

Um fato interessante na Fm. Botucatu é a documentação histórica dos urólitos. Esses vestígios foram registrados como “urinas fossilizadas” de dinossauros (Figura 4.14A). Esse tipo de fóssil é raramente preservado no registro geológico, sendo este caso brasileiro um dos pouquíssimos documentados no mundo.

Figura 4. 14 | Urólito da Fm. Botucatu (A) e de uma ave com penas parcialmente preservadas (B)



O Cretáceo é marcado pelo rompimento do Pangea e formação do Atlântico Sul. No Brasil, isso proporcionou a formação das Bacias da Margem Leste (Bacia de Campos, Santos, Espírito Santo etc.) e também a ocorrência de um extenso vulcanismo continental, causado pela formação de zonas rifte. A Bacia do Araripe, especialmente sua Fm. Santana, destaca-se por possuir os primeiros registros de tecidos moles (não ósseos) de pterossauros e tiranossauros do mundo, as primeiras fanerógamas fósseis da América do Sul e por sua abundância de peixes fósseis. As aves também já habitavam o cenário cretácico do Brasil, demonstrado pela descoberta de fósseis de aves (Figura 4.14B) com penas parcialmente preservadas (CARVALHO et al., 2015). Com relação à flora, destaca-se a ocorrência de fósseis de angiospermas na Bacia do Amazonas, Fm. Alter do Chão.

O fim da era Mesozoica, drasticamente marcada pelo evento K/T, põe fim à era dos dinossauros, mas dá início ao estabelecimen-

to de um ambiente propício para a prosperidade dos mamíferos em escala global, que acontece no Cenozoico, e no Brasil isso não foi diferente. No Norte do Brasil (Bacia do Acre), no entanto, essa era é marcada, também, pelo registro de répteis enormes, como o *Purussaurus brasiliensis*, o maior crocodilomorfo (15 m) encontrado no país, e o *Gryposuchus*. A ocorrência de quelônios de água doce (*Podocnemis* sp., *Stupendemys*) também é bem documentada para o Paleógeno e Neógeno.

Nas bacias costeiras, esses dois períodos são marcados pelo desenvolvimento de uma extensa fauna marinha, dando destaque para a ocorrência de tubarões e sirenídeos. Corais também se estabeleceram durante esse tempo e, em terra, aparecem cobras, lagartos e aves (Bacia de São João do Itaboraí), as quais simbolizam o único registro de aves paleocênicas na América do Sul. Essa mesma bacia também guarda exemplares de mamíferos ungulados (cujos dedos terminam em casco), como o *Carodnia vieirai*. A Fm. Tremembé, Bacia de Taubaté, possui muitos insetos preservados, principalmente das ordens Hemiptera e Coleoptera, mas também aves carnívoras gigantes (*Paraphysornis brasiliensis*), que chegavam a alcançar até 2 metros de altura, e não voavam.

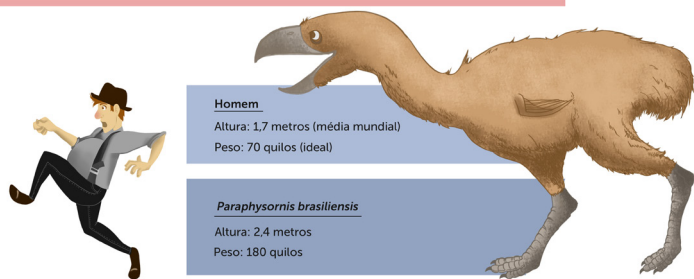


Exemplificando

Para se ter uma ideia do tamanho da *Paraphysornis brasiliensis*, analise a Figura 4.15, que mostra uma comparação entre nós humanos e essa enorme ave. PENDING APPROVAL COPYRIGHT.

Figura 4.15 | Comparação entre o tamanho da *Paraphysornis brasiliensis* e um homem de tamanho médio

Comparado a um homem adulto, o *Paraphysornis brasiliensis* era um gigante.



Fonte: <<http://www.almanaqueurupes.com.br/portal/textos/o-comeco-de-tudo/>>. Acesso em: 7 dez. 2016.

O Quaternário do Brasil, período atual, é marcado pelos depósitos de planícies costeiras, com o aparecimento de inúmeros microfósseis (foraminíferos, diatomáceas, bivalvíos, tubos de crustáceos decápodes) e pelo intercâmbio faunístico, o qual trouxe da América do Norte para a América do Sul mastodontes, tigres-dentes-de-sabre, onças, ursos, cavalos, porcos-do-mato, antas, ratos, esquilos, ariranhas, cães e veados. Além disso, há exemplos de mamíferos endêmicos da própria América do Sul, dentre os quais destacam-se as preguiças-gigantes (*Eremotherium laurillardi*), gliptodontes (*Glyptodon*, *Panochthus greslebini*), tatus gigantes (*Pampatherium humboldti*, *Holmesina paulacoutoi*), mastodontes (*Stegomastodon waringi*), toxodon (*Toxodon platensis*, *Trigodonops lopesi*), camelos (*Palaeolama major*), ungulatos (*Xenorhinotherium baiense*), cavalos (*Hippidion principale*, *Equus (Amerhippus) neogaeus*) e tigre-dente-de-sabre sul-americano (*Smilodon populator*).

Os microfósseis, principalmente da planície costeira de São Paulo e do Rio Grande do Sul, são utilizados para interpretações paleoambientais e paleobatimétricas, pois revelam detalhes sobre as alterações do nível do mar e flutuações climáticas.

É no Quaternário também que aparecem os principais fósseis de hominídeos, sendo que no Brasil há estudos que indicam evidências de sociedades primitivas que teriam vivido na Serra da Capivara, Piauí, podendo ser os mais antigos povos da América do Sul. A datação sobre a idade desses fósseis ainda é controversa, de modo que não há concordância com relação ao período temporal de vida desses povos. No entanto, há registros de utensílios utilizados pelos hominídeos entre 15 a 20 mil anos, sugerindo que nesta época já havia ancestrais humanos no Brasil. Alguns pesquisadores, porém, acreditam que o surgimento do homem na América do Sul tenha acontecido muito mais cedo.

Sem medo de errar

Voltando à situação lançada no início da unidade, imagine que foi decidido pelo Conselho do parque que você deverá demonstrar no documento que será encaminhado para os pareceristas da UNESCO quais são os fósseis do paleozoico e do cenozoico que ainda podem ser descobertos no parque. Lembre-se! Você deve

estar atento aos períodos (idade) das rochas encontradas no parque e percorrer sobre: quais são os possíveis fósseis do Devoniano que podem ser encontrados no parque? E sobre o Neógeno, há alguma possível descoberta? Por que não é possível que haja fósseis de dinossauros?

Logo, para que você dê prosseguimento à resolução desse trabalho, é preciso, primeiramente, responder aos questionamentos. Sobre a primeira pergunta, você tem que lembrar que, conforme explicamos nessa seção, o Devoniano marca o período que os vertebrados começam a aparecer no registro fóssil, destacando-se os fósseis de peixes e microfósseis em geral. Os peixes que aparecem em algumas bacias brasileiras são acantódios e possíveis condrictes, além disso, há o aparecimento de vegetais terrestres, como as da classe Horneophytales e Cooksoniales. Esses fósseis já foram descobertos em algumas bacias brasileiras e podem muito bem serem encontradas em outros locais que apresentem rochas dessa idade. Claro que há outros fatores geológicos que devemos levar em consideração, conforme abordamos na seção anterior, mas o indício da descoberta de fósseis dessa idade, já é algo substancial.

Respondendo à segunda questão, primeiro você tem que se lembrar de um fato histórico, a extinção do limite Cretáceo/Paleógeno (mais conhecido como evento K/T). Portanto, você deve mencionar no relatório que os fósseis do Neógeno, idade das rochas que afloram no parque em que você trabalha, serão, provavelmente, de aves, mamíferos e répteis. Os exemplos de répteis já descobertos em outras bacias são o do *Purussaurus brasiliensis*, o maior crocodilomorfo (15 m) encontrado no país, o *Gryposuchus* e os quelônios do gênero *Podocnemis* sp. e *Stupendemys*. Com relação às aves, destaca-se a *Paraphysornis brasiliensis*, a qual chegava a alcançar até 2 m de altura, e não voava. Apesar de ser rara, sua descoberta pode influenciar a busca por novos fósseis de aves do Neógeno.

Finalizando e respondendo à última pergunta, você deve se lembrar de que no parque afloram rochas Devonianas (419,2 a 358,9 Ma) e do Neógeno (23 a 2,58 Ma), rochas anteriores e posteriores à era em que viveram os dinossauros (Mesozoico – 252,1 a 65 Ma). Portanto, devido a esse hiato temporal e, em decorrência do evento K/T, não é possível que haja fósseis de dinossauros no parque, o que desmotivaria a busca por representantes dessa fauna na região.

Os dinos vão às compras

Descrição da situação-problema

O interesse pelos dinossauros atrai não somente crianças, mas também adolescentes e adultos. Um dos motivos que explica esse fenômeno de público é que costumamos imaginar como seria nossa vida se tivéssemos que conviver com criaturas tão grandes, algumas ferozes, e emblemáticas. Por isso, é corriqueiro a exposição de fósseis de dinossauros em museus ou em shopping centers, afinal, este último é um lugar que agrega muitas pessoas, de variadas idades e interesses.

Sabendo disso, imagine-se numa situação em que você ficou responsável pela organização de uma exposição de dinossauros em um shopping de sua cidade. Nessa exposição itinerante, você decidiu organizar a exposição de réplicas, reconstituições e também estruturou a montagem de retrovisores com óculos 3D para que as pessoas pudessem ver os dinossauros reconstruídos de forma digital, numa apresentação totalmente interativa e cativante. Assim, para que essa exposição fosse um sucesso, você decidiu montar também painéis informativos, que ficariam distribuídos ao redor da exposição, que destacariam algumas informações importantes. Nesse momento, algumas dúvidas começaram a importuná-lo: qual seria um exemplo de uma unidade geológica que possui fósseis de dinossauros? Qual seria um bom exemplo de fóssil de dinossauro do Triássico? Qual outra formação geológica, no Brasil, possui vestígios de dinossauros?

Agora é com você. Esclareça essas dúvidas para que a exposição seja um sucesso!

Resolução da situação-problema

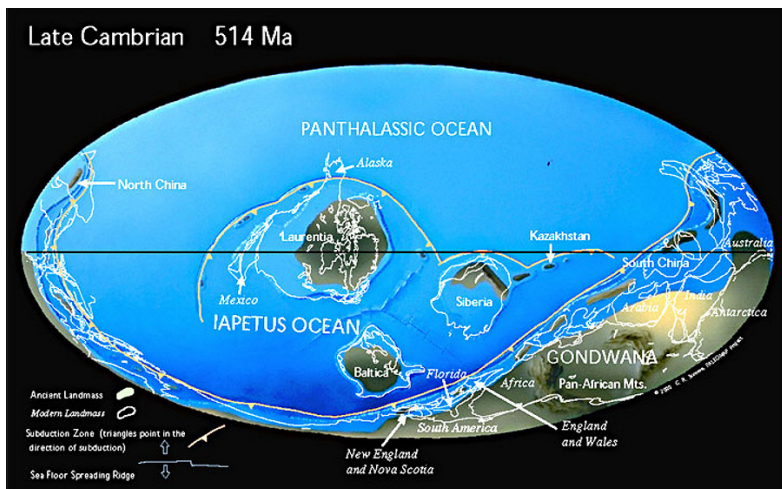
Primeiro, existem algumas formações no Brasil que possuem fósseis de dinossauros, mas talvez a mais notável seja a Fm. Santa Marina, do Triássico da Bacia do Paraná. Conforme demonstra o livro didático, ela é uma das formações geológicas mais ricas em fósseis no Brasil, e portanto, seria uma boa candidata para ilustrar onde são achados os dinossauros no país. Respondendo ao seu segundo

questionamento, é inclusive na Fm. Santa Maria que se encontra um dos bons exemplos de dinossauros brasileiros, o *Staurikosaurus pricei*. Esse animal viveu há 250 milhões de anos e, segundo os especialistas, é provavelmente um dos primeiros dinossauros a existirem em todo o planeta, o que deixa sua descoberta ainda mais nobre.

Finalmente, a título de curiosidade, você pode destacar que na Fm. Botucatu (Triássico, Jurássico e início do Cretáceo), em São Paulo, já foram documentados casos de possíveis urólitos, ou urinas fossilizadas de dinossauros, fato que pode despertar a atenção do público devido à inusitada evidência constatada.

Faça valer a pena!

1. Christopher Scotese revolucionou o mundo da paleogeografia ao coordenar o projeto denominado de “Paleomap Project”. Com sua habilidade e sapiência, ele conseguiu juntar dados geológicos e paleontológicos para montar o cenário paleoambiental de praticamente todos os períodos geológicos de forma detalhada. Essa imagem a seguir, do Cambriano Superior (tardio), é um exemplo de seu trabalho.



Fonte: <<http://www.scotese.com/newpage12.htm>>. Acesso em: 6 dez. 2016.

Sobre o mapa paleogeográfico acima e o período que ele representa, principalmente no Brasil, assinale a alternativa correta:

- a) O período Cambriano é marcado pela plena diversificação das espécies, e isso está bem representado no Brasil.
- b) O Cambriano é um período com pouca ocorrência de fósseis marinhos, tanto no Brasil como no mundo.
- c) A posição geográfica do Brasil na época do Cambriano influenciou a pouca ocorrência de fósseis em território brasileiro.
- d) As mudanças climáticas, tectônicas e biológicas não foram significativas no período Cambriano.
- e) As únicas ocorrências fósseis desse período no Brasil são de trilobitas.

2. O Mesozoico (251 a 65 Ma) é considerado uma das mais ricas eras, devido à abundância fossilífera. Além disso, é conhecida como a era em que os dinossauros viveram, por isso, sua fama se espalhou inclusive entre o público leigo. No Brasil, esse cenário não é diferente, aliás, aqui no país, anualmente, são encontrados inúmeros fósseis dessa era, que servem para pesquisas de ponta em todo o mundo.

Sobre a era mesozoica do Brasil, e todos os seus períodos, é possível afirmar que:

- a) A Fm. Rita Maria e Fm. Botucatu são dois exemplos de unidades geológicas com ocorrência de restos e vestígios de dinossauros.
- b) O dinossauro *Staurikosaurus pricei*, um dos mais antigos dinossauros do mundo, foi descoberto na Fm. Santa Maria, da Bacia do Paraná.
- c) Os urólitos de dinossauros, descobertos na Fm. Santa Maria, representam fezes fossilizadas.
- d) Os mesossaurídeos, como o *Stereosternum tumidum*, são exemplos de dinossauros que habitavam o território brasileiro nessa era.
- e) A Flora de *Ediacara* é um dos exemplos de floras que existiram na era Mesozoica.

3. As condições paleogeográficas e paleoclimáticas dos períodos Carbonífero e Permiano do Brasil são diferentes das que existiam na Europa e na América do Norte, razão pela qual os fósseis também são distintos.

Sobre esses dois períodos e suas características, assinale a opção verdadeira:

- a) Esses períodos marcam o desaparecimento dos vertebrados fósseis tanto no Brasil quanto no resto do mundo.
- b) Os peixes, que são comuns no Paleozoico Inferior, sofrem uma extinção durante o Carbonífero.
- c) Enquanto na Europa e América do Norte o frio era intenso, no Gondwana o calor predominava.
- d) Os depósitos de carvão mineral datam, no Brasil, do Carbonífero, assim como o resto do mundo.
- e) O surgimento das samambaias (*Pecopteris* sp.) e os primeiros répteis (*Stereosternum tumidum*) datam do Permiano.

Referências

- BIZZU, L. A. et al. **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**: texto, mapas e SIG. Brasília: CPRM, 2003.
- CARVALHO, I. S. et al. A mesozoic bird from Gondwana preserving feathers. **Nature Communications**, n. 6, 2 jun. 2015.
- CODY et al. The great american biotic interchange revisited. **Ecography**, v. 33, p. 326-332, abr. 2010.
- CROIZAT, L. **Manual of phytogeography**. The Hague: W. Junk. 1952.
- . **Panbiogeography**. Caracas: Croizat, 1964. 3. v.
- . **Space, time, form**: the biological synthesis. Caracas: Croizat, 1964.
- FERNANDES, M. A.; FERNANDES, L. B. R.; SOUTO, P. R. F. Occurrence of urolites related to dinosaurs in the Lower Cretaceous of the Botucatu Formation, Paraná Basin, São Paulo state, Brazil. **Revista Brasileira de Paleontologia**, v. 7, n. 2, p. 263-268, 2004.
- FONSECA, V. M. M. **Brachiopoda (Stropheodontoidea, Chonetidae, Delthyridiidae) do Devoniano Médio das Bacias do Amazonas e Parnaíba**. 2001. Tese (Doutorado)-Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.
- GALLO, V.; FIGUEIREDO, F. J. Paleobiogeografia. In: CARVALHO, I. de S. (Org.). **Paleontologia: conceitos e métodos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 1. v. p. 351-370.
- GAMA JR., J. M. **Braquiópodes da Formação Pimenteiras (Devoniano Médio/Superior), na região Sudoeste da Bacia do Parnaíba, Estado do Tocantins, Brasil**. Dissertação (Mestrado)-Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. Brasília, 2008.
- KELLNER, A. W. A. Do campo ao laboratório: a viagem de um fóssil. In: SOARES, M. B. (Org.). **A paleontologia na sala de aula**. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Paleontologia, 2015.

Anotações

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

Anotações

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.