

A close-up photograph of a geological hammer resting on a rock surface. The hammer has a blue handle and a metal head. The rock is layered and shows signs of weathering and fracturing. A blue translucent banner is overlaid at the bottom of the image, containing the title text.

Elementos de Mineralogia e Geologia

Elementos de Mineralogia e Geologia

João Pedro Tauscheck Zielinski

© 2018 por Editora e Distribuidora Educacional S.A.
Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida ou transmitida de qualquer modo ou por qualquer outro meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia, gravação ou qualquer outro tipo de sistema de armazenamento e transmissão de informação, sem prévia autorização, por escrito, da Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Presidente

Rodrigo Galindo

Vice-Presidente Acadêmico de Graduação e de Educação Básica

Mário Ghio Júnior

Conselho Acadêmico

Ana Lucia Jankovic Barduchi

Camila Cardoso Rotella

Danielly Nunes Andrade Noé

Grasiele Aparecida Lourenço

Isabel Cristina Chagas Barbin

Lidiane Cristina Vivaldini Olo

Thatiane Cristina dos Santos de Carvalho Ribeiro

Revisão Técnica

Paulo Sérgio Siberti da Silva

Fernando Fagundes Fontana

Editorial

Camila Cardoso Rotella (Diretora)

Lidiane Cristina Vivaldini Olo (Gerente)

Elmir Carvalho da Silva (Coordenador)

Leticia Bento Pieroni (Coordenadora)

Renata Jéssica Galdino (Coordenadora)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Zielinski, João Pedro Tauscheck
Z66e Elementos de mineralogia e geologia / João Pedro
Tauscheck Zielinski. – Londrina : Editora e Distribuidora
Educacional S.A., 2018.
240 p.

ISBN 978-85-522-0733-7

1. Mineralogia. 2. Geologia. I. Zielinski, João Pedro
Tauscheck. II. Título.

CDD 550

Thamiris Mantovani CRB-8/9491

2018
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 Introdução à mineralogia e geologia	7
Seção 1.1 - Planeta Terra: estrutura, propriedades e materiais	9
Seção 1.2 - Mineralogia básica	24
Seção 1.3 - Mineralogia sistemática	40
Unidade 2 Petrologia Básica e Geologia Física	57
Seção 2.1 - Rochas ígneas e metamórficas	59
Seção 2.2 - Rochas sedimentares	77
Seção 2.3 - Tempo geológico e geologia estrutural	93
Unidade 3 Geologia de engenharia e hidrogeologia	111
Seção 3.1 - Noções de geologia de engenharia	113
Seção 3.2 - Hidrologia básica	133
Seção 3.3 - Fundamentos de hidrogeologia	152
Unidade 4 Recursos minerais e energéticos	175
Seção 4.1 - Introdução à geologia econômica	177
Seção 4.2 - Depósitos minerais	197
Seção 4.3 - Recursos energéticos	217

Palavras do autor

Caro aluno, a disciplina de Elementos de Mineralogia e Geologia apresenta-se como um primeiro passo no estudo das ciências geológicas e possui como objetivo o entendimento dos processos dinâmicos que acontecem tanto na superfície quanto no interior da Terra. Com isso, você verá que todos os conteúdos abordados aqui terão relação com alguma situação que você enfrentará na vida profissional ou, ainda mais importante, auxiliarão você a desenvolver bons projetos nas áreas da engenharia que causem intervenção na natureza ou que dela se beneficiem. Assim, esta disciplina foi pensada e dividida em quatro unidades de ensino: 1) Introdução à mineralogia e geologia; 2) Petrologia básica e geologia física; 3) Geologia de engenharia e hidrogeologia; e 4) Recursos minerais e energéticos.

Na Unidade 1, portanto, você estudará sobre a origem da Terra, em que destacaremos os processos que ocasionaram a formação do nosso planeta e como ele evoluiu para uma esfera dividida em camadas tão distintas. Adicionalmente, você também aprenderá como as forças internas da Terra controlam os movimentos tectônicos e qual a consequência prática disso para as áreas do conhecimento em que você atuará no futuro. Finalizando, você estudará sobre a origem, estrutura e classificação dos minerais, e aprenderá quais os métodos para reconhecê-los. Além disso, abordaremos os minerais formadores de rochas e os minerais de minério e industriais.

Na sequência, na Unidade 2, conheceremos mais sobre as rochas, dando destaque para os diferentes tipos, processos genéticos, composição, estruturas e texturas. Complementarmente, estudaremos conceitos de estratigrafia e analisaremos como as estruturas que se formam nas rochas influenciam nos projetos das áreas de engenharia e mineração. Na Unidade 3, conheceremos sobre os processos de formação dos solos e sua classificação, veremos aspectos sobre geologia de engenharia e métodos de investigação do subsolo. Analisaremos sobre o ciclo hidrológico, dando ênfase à classe das águas que se infiltram no solo e alimentam os aquíferos. Dessa forma, também estudaremos o comportamento das águas subterrâneas, a relação com as águas superficiais e sua qualidade química.

Na última unidade, a Unidade 4, estudaremos conceitos utilizados para caracterizar os recursos minerais e entender de que forma esses possíveis bens econômicos se formam e são estudados. Veremos, fundamentalmente, aspectos introdutórios sobre a formação de jazidas minerais, depósitos de carvão, acumulações de óleo e gás, mas também conheceremos fontes energéticas alternativas e os problemas ambientais relacionados à exploração desses recursos minerais e energéticos.

Como você pode perceber, é bastante conteúdo que temos pela frente. Portanto, é importante que você se dedique ao máximo e leve em consideração os materiais sugeridos para estudos complementares. Dessa maneira, você desenvolverá diversas habilidades e estudará conteúdos que o auxiliarão a compreender a importância da mineralogia e da geologia nos processos industriais e nos assuntos da engenharia. Sem mais demora, vamos aos estudos!?

Introdução à mineralogia e geologia

Convite ao estudo

Caro companheiro de aprendizado, primeiramente bem-vindo à disciplina Elementos de Mineralogia e Geologia! Nesta primeira unidade, vamos buscar embasar todo o nosso conhecimento sobre a Terra e nos dedicar a entender como ocorreu a formação do planeta em que vivemos, quais materiais ele nos fornece e, além disso, vamos dar atenção ao seu comportamento dinâmico. Veremos também sobre a formação dos minerais, destacando suas propriedades físicas e químicas, métodos e materiais de reconhecimento. Depois, buscaremos classificá-los de acordo com suas características químicas e analisaremos os minerais formadores de rochas, os minerais de minério e os minerais de importância para a indústria.

Para que você entenda a aplicabilidade desses conteúdos, vamos imaginar a seguinte situação:

Você é um consultor técnico de uma grande empresa de mineração de ferro. Como responsável pelos projetos de exploração da empresa, você está em constante contato com profissionais de diversas áreas e, oportunamente, é encarregado de mostrar algumas etapas de operação da mina onde se extrai o minério. O diretor da empresa, sabendo que você gosta de receber os visitantes e conhece sobre as diversas atividades da empresa, pediu-lhe um favor: receber os estudantes de alguns cursos da área ambiental de uma universidade local e ministrar um breve curso de extensão. Nesse curso, o diretor pediu que você, com o objetivo de realizar junto com os alunos uma **análise dos minerais formadores de rochas e de minérios da mina**, abordasse, juntamente com o geólogo de exploração da empresa, (i) alguns aspectos básicos sobre os materiais geológicos

encontrados na mina; (ii) como se formam os minerais e quais métodos são usados para sua identificação; e, por último, (iii) demonstrasse quais são os principais minerais formadores de rochas e de minérios que existem na mina.

A partir disso, imagine que você começou o seu planejamento com alguns questionamentos na cabeça: quais informações básicas de geologia devo abordar? Quais são os materiais geológicos que existem? Quais os processos responsáveis pela origem dos minerais? Como diagnosticamos os distintos minerais? Quais são as rochas que existem na mina e quais minerais formadores de rochas e minerais de minério exploramos?

Ao final desta unidade, você deverá estruturar uma apostila que deverá conter de maneira organizada todos os principais pontos para elaboração dessa análise junto com os alunos no momento dos encontros presenciais, que ainda estão por vir.

Para que não reste mais dúvidas sobre o assunto e você consiga apresentar o curso de extensão que irá ministrar e elaborar esse material, você deve saber mobilizar conteúdos relativos à geologia, mineralogia básica e mineralogia sistêmica. Para adquirir essa competência, leia com atenção este livro didático e estude a primeira unidade para que possamos continuar nosso processo de aprendizagem compartilhada.

Boa sorte e bons estudos!

Seção 1.1

Planeta Terra: estrutura, propriedades e materiais

Diálogo aberto

Estudante, nesta seção aprenderemos brevemente sobre a gênese dos elementos químicos e de que forma eles evoluíram e se agregaram para formar corpos geológicos maiores, como a Terra. Veremos também como ocorreu a diferenciação das camadas da Terra e quais são elas, fornecendo as principais características de cada uma. Complementando, estudaremos os principais materiais geológicos que possuímos e entenderemos como se comporta a Terra, ou seja, qual sua dinâmica tectônica. Ao vermos isso, também poderemos começar a entender qual a consequência disso para os projetos de engenharia e mineração.

No entanto, antes de começarmos nossos estudos, devemos nos lembrar rapidamente do nosso contexto para aprendizagem, apresentado no “Convite ao estudo” da unidade. Nele, destacamos que você atua como consultor técnico de uma grande mineradora e é responsável pelos projetos de exploração, mas de vez em quando também possui outras tarefas, como ministrar um curto curso de extensão; que é o seu desafio atual. Nesse curso, dado em parceria com outros profissionais, será realizada uma **análise dos minerais formadores de rochas e de minérios em uma mina de exploração de ferro** e, por isso, deve-se, primeiro, abordar aspectos básicos sobre os materiais geológicos encontrados na mina.

Lembramos que essas considerações farão parte da apostila que será disponibilizada aos estudantes durante o curso. Portanto, para desenvolver a primeira etapa do seu trabalho, imagine que você decidiu se unir ao geólogo da empresa para que pudessem fazer o melhor planejamento para o curso. Durante a reunião de vocês, ambos concordaram que antes de mais nada seria interessante abordar alguns conceitos para permitir que o aluno compreenda os materiais geológicos. Nessa fase, foi decidido então que vocês tratariam de alguns temas, e você resolveu se planejar, sendo

eles: qual é a afinidade geoquímica do ferro? Como na empresa exploramos rochas da crosta? Quais são os elementos químicos mais comuns dessa camada? Qual a função da Tectônica de Placas e qual sua implicação para a engenharia e mineração?

E agora, caro aluno, como você abordaria tais pontos? Para que você consiga fazer isso, dando um sentido mais claro ao seu curso e esclarecendo todas as dúvidas dos alunos durante a análise, é importante que você entenda o processo de nucleogênese e acreção planetesimal, diferenciação química da Terra, materiais geológicos formados por meio da junção de elementos químicos e, por último, como ocorre o fenômeno da tectônica e de que forma essa dinâmica pode influenciar o planejamento de projetos de engenharia e mineração. Portanto, não perca tempo, comece já a ler o seu livro didático e se encantar com o conteúdo!

Não pode faltar

Muito embora nos interesse mais conhecer sobre a formação da Terra, considerando toda a diversidade geológica dos materiais que existem, é fundamental, antes de iniciar nossa jornada, voltarmos alguns bilhões de anos antes. Após o Big Bang, todas as partículas cósmicas que estavam concentradas acabaram por expandir-se e, dessa forma, espalharam-se pelo universo. Conforme prótons, nêutrons e elétrons se uniam em um processo denominado nucleogênese, a matéria ia sendo formada. É assim que os elementos primordiais, o hidrogênio (H) e o hélio (He), se formaram. Como eram praticamente os únicos elementos naquele tempo, ambos começaram a unir-se, assim como com outros elementos menos expressivos, e a formar as nebulosas.

Foram essas nuvens interestelares que, ao descreverem uma trajetória elíptica rotacional, condensaram-se no centro da nebulosa, formando um protossol (um núcleo de H e He denso e quente). Ao acontecer esse processo, houve um aumento de temperatura para acima de milhões de graus Celsius, iniciando um processo de fusão nuclear, no qual o H era transformado em He, liberando uma quantidade enorme de energia. No entanto, à medida que esse processo ia ocorrendo no interior da nebulosa, as

partículas acumuladas nas partes mais externas iam se resfriando e condensando. Com a ajuda da atração gravitacional, essas partículas líquidas e sólidas foram se unindo para formar os planetesimais. Foram esses planetesimais que, ao longo de alguns bilhões de anos, colidiram-se uns com os outros para corpos maiores até atingirem um estágio final no qual os corpos maiores foram atraindo os corpos menores para formar os planetas que conhecemos hoje. É dessa forma que, segundo essa teoria, o planeta Terra foi formado.



Assimile

Os planetesimais são corpos sólidos de pequeno tamanho, geralmente de poucos quilômetros de diâmetro, que se originaram pela acreção, via atração gravitacional, de gás e poeira interestelar.

Entretanto, naquela época a Terra era um gigante bloco rochoso, formado por poucos elementos químicos, e ainda mais curioso, era vermelha. A acreção planetesimal e o intenso número de colisões de corpos estelares acabou deixando a Terra extremamente aquecida (Figura 1.1). Por causa da alta velocidade com a qual os planetesimais atingiam a superfície terrestre, havia a transformação de energia cinética em calor. Além disso, os elementos radioativos que existiam (por exemplo, o urânio), emitiam partículas subatômicas, que ao serem absorvidas pela matéria transformam-se em calor, auxiliando a fusão dos materiais.

Assim, a Terra foi se transformando em um complexo de elementos que, aos poucos, proporcionava uma diferenciação química do planeta. Naturalmente, a consequência é que os elementos mais densos, como o níquel (Ni) e o ferro (Fe), foram sendo direcionados para o centro da Terra, enquanto que os elementos mais leves, como o alumínio (Al), silício (Si) e magnésio (Mg), se concentraram na porção mais superficial. Somado a esse fenômeno de diferenciação química, é importante destacar que, ao permanecerem próximo a uma zona de contato com a atmosfera, todo o material próximo à superfície acabou se resfriando, formando uma camada mais rígida que, à medida que avançamos para o interior da Terra, vai se transformando em um material maleável ou até mesmo viscoso.

Figura 1.1 | Imagem que ilustra, de forma representativa, a aparência da Terra primitiva

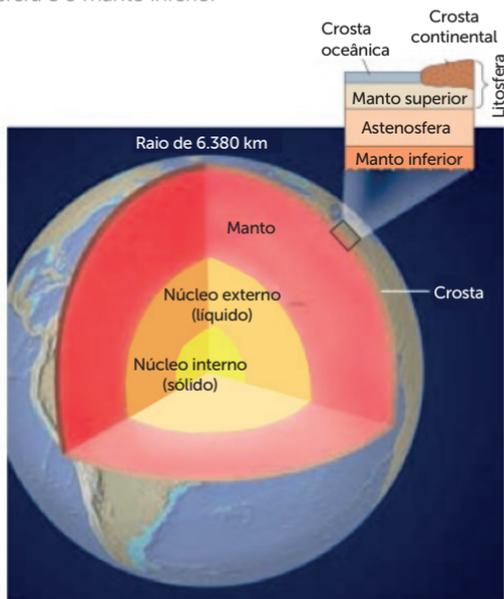


Fonte: <<http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3178524/Life-Earth-began-hiccups-Reproduction-started-slowly-primordial-soup-bang.html>>. Acesso em: 30 ago. 2017.

Por isso, costuma-se dividir a Terra em três camadas, as quais foram identificadas por meio de métodos geofísicos: núcleo, manto e crosta (Figura 1.2). O núcleo possui uma densidade média estimada de **10 – 13 g/cm³**, ocupa 16% do volume total da Terra e é constituído por uma parte interna sólida e uma porção externa líquida. Ambas as partes possuem como elementos principais o Fe e, em menor quantidade, o Ni. A extensão do núcleo está no centro da Terra, ou seja, a 6.380 km de profundidade, até 2.900 km. O manto ocupa 83% do volume total do nosso planeta, é menos denso que o núcleo (entre **3,3 – 5,7 g/cm³**), possui natureza rígida na parte basal (manto inferior), plástica no meio (astenosfera), rígida no topo (manto superior) e é formado, principalmente, por Fe e Mg. O intervalo que o manto ocupa vai dos 2.900 km de profundidade até aproximadamente 90 km.

Por último, temos a crosta terrestre, a camada mais externa, que se divide em dois tipos. A crosta continental é mais espessa, possui entre 20 km e 90 km de espessura, com uma densidade média de **2,7 g/cm³**, sendo constituída fundamentalmente por Si e Al. Já a crosta oceânica é bem mais delgada, possuindo entre 5 km a 10 km de espessura. Normalmente mais densa que a crosta continental, possui em média **3,0 g/cm³** e é constituída por Si e Mg. Cabe ressaltar que o manto superior e a crosta formam o que denominamos de litosfera. A transição entre uma camada terrestre e outra é marcada por duas descontinuidades, descobertas por meio da geofísica. Entre a crosta e o manto, ocorre a descontinuidade de Mohorovicic, ou simplesmente Moho. E entre o manto e o núcleo, acontece a descontinuidade de Gutenberg.

Figura 1.2 | A Terra e suas camadas: crosta, manto e núcleo. A imagem ampliada no canto superior direito da imagem exibe a relação entre a litosfera (manto superior + crosta), a astenosfera e o manto inferior



Fonte: Wicander e Monroe (2009, p. 14).

A afinidade com que um elemento químico possui com outro permitiu que Goldschmidt (1954) propusesse uma classificação que mostra o agrupamento dos elementos em quatro grandes famílias geológicas/geoquímicas: 1ª) os atmófilos, que estão presentes na atmosfera e hidrosfera, entre eles o hidrogênio, oxigênio e nitrogênio; 2ª) os litófilos, preferencialmente encontrados nas rochas, como é o caso do silício, cálcio, potássio, etc.; 3ª) os calcófilos, que possuem afinidade mantélica e ligam-se com o enxofre, por exemplo; e 4ª) os siderófilos, que compreendem uma gama de elementos químicos que se ligam preferencialmente ao ferro, comuns no núcleo da Terra e em meteoritos (Figura 1.3).



Refleta

Qual é a importância de se estudar a afinidade dos elementos químicos? Pensando do ponto de vista econômico, seria interessante saber de onde vem o elemento químico?

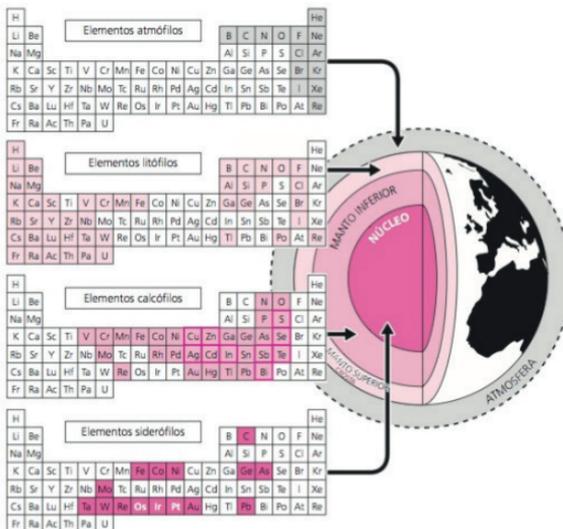
A junção dos elementos químicos com afinidades similares permite que materiais naturais se formem. Embora estudaremos mais adiante sobre isso, é importante destacarmos os principais materiais geológicos que se formam na Terra. O mais fundamental de todos é o mineral (Figura 1.4-A). Formado por meio de distintos processos geológicos, os minerais configuram-se como um sólido cristalino que possui uma composição química definida pelo seu processo genético. Origina-se fundamentalmente pela estabilização química de um ou mais elementos. A importância dos minerais é diversa, sendo utilizados tanto na fabricação de cosméticos, utensílios domésticos e eletrônicos diversos (o ouro é um dos componentes básicos de peças internas dos smartphones e laptops) quanto na construção civil, como é o caso do quartzo (presente nos grãos de areia e como insumo para fabricação de vidros).



Exemplificando

O ouro, por exemplo, é um elemento nativo que também se caracteriza como um mineral. Já o quartzo caracteriza-se como um sólido formado pela ligação entre o silício (Si) e o oxigênio (O), em suas devidas proporções.

Figura 1.3 | Classes geoquímicas/geológicas, segundo a tabela de Mendeleiev, e a afinidade dos elementos químicos conforme a camada terrestre



Fonte: Pomerol et al. (2013, p. 58).

No entanto, é natural que os minerais também possuam propriedades químicas que aproximem um dos outros. Quando isso acontece, temos um agregado natural de minerais e, portanto, passamos a denominá-los de rocha (Figura 1.4-B). Como veremos mais adiante, as rochas possuem natureza ígnea (como o basalto), formadas pela solidificação do magma; sedimentar (como o arenito), gerada pela agregação, compactação e ligamento de minerais e partículas soltas (os sedimentos) e, por último, as metamórficas (como o mármore), originadas pelo processo de transformação sob pressão e temperatura das rochas preexistentes. As rochas podem revelar acontecimentos geológicos passados, mas também podem conter recursos minerais e energéticos (petróleo e gás) ou serem usadas diretamente na construção civil (agregados para construção de estruturas).

Outro material formado pela junção de minerais é o meteorito (Figura 1.4-C). Constituído de matéria sólida proveniente do espaço que atinge a superfície terrestre, acredita-se que a maioria dos meteoritos sejam oriundos de um cinturão de asteroides que existe entre Marte e Júpiter. Existem três classes de meteoritos: os meteoritos rochosos, os meteoritos ferrosos e os meteoritos ferro-rochosos. Dentre eles, os mais comuns são os meteoritos rochosos, cujo representante mais notável é o condrito. Os meteoritos são muito usados pela ciência para o conhecimento da composição geológica de outros planetas, mas também para o cálculo da idade de eventos geológicos e astronômicos.

Outro material de origem natural são os fósseis (Figura 1.4-D). Embora não possuam sua origem ligada à dinâmica interna da Terra, os fósseis são restos ou vestígios de vegetais ou animais que se originam por meio de processos geológicos exógenos e podem ficar preservados praticamente *ad eternum*. Normalmente, os fósseis adquirem um grau de preservação em virtude da ação dos elementos químicos e são usados para desvendar eventos geológicos e biológicos extremamente importantes, como extinções de espécies, episódios de acúmulo de petróleo e gás natural, além de eventos climáticos pretéritos e sobre a própria dinâmica global dos continentes.

Figura 1.4 | Os principais materiais que possuímos na Terra: (A) mineral; (B) rocha; (C) meteorito e (D) fóssil

<p>A – Mineral (aragonita)</p>  <p>Fonte: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aragonite_Mineral_Macro.JPG>. Acesso em: 30 ago. 2017.</p>	<p>B – Rocha ígnea (granito)</p>  <p>Fonte: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Granite_69mw1543.jpg>. Acesso em: 30 ago. 2017.</p>
<p>C – Meteorito (condrito)</p>  <p>Fonte: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NWA869Meteorite.jpg>. Acesso em: 30 ago. 2017.</p>	<p>D – Fóssil (amonite)</p>  <p>Fonte: <https://pixabay.com/p-111498/?no_redirect>. Acesso em: 30 ago. 2017.</p>



Pesquise mais

Se você se interessou em conhecer mais sobre os meteoritos e os fósseis, acesso os links a seguir e complemente o seu estudo.

BRANCO, P. M. **O que são e como se formam os fósseis?** 18 ago. 2014b. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Canal-Escola/O-que-sao-e-como-se-formam-os-fosseis%3F1048.html>>. Acesso em: 29 ago. 2017.

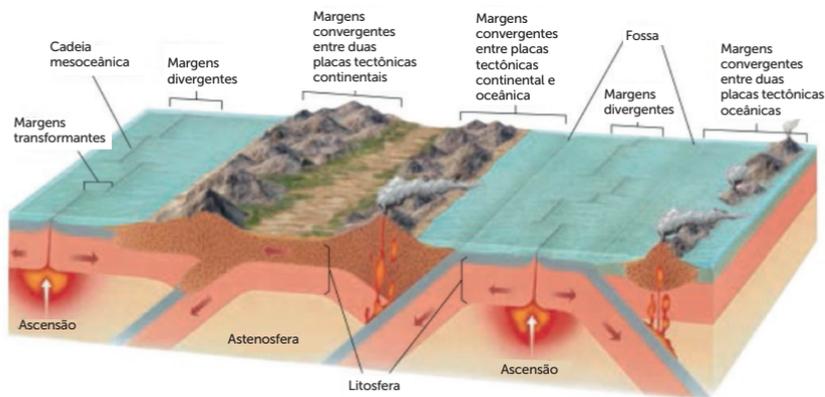
CPRM. **Meteoritos.** [s.d.]. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Canal-Escola/Meteoritos-1090.html>>. Acesso em: 29 ago. 2017.

Proposta no final da década de 1960, a então hipótese da Tectônica de Placas transformou o modo como analisamos a "dança" global dos continentes e, conseqüentemente, a evolução geológica dos materiais terrestres. Atualmente, denominada de teoria da Tectônica

de Placas, a ideia de que dezenas de placas rígidas se movem sobre uma camada dúctil (maleável) enfrentou forte resistência. Muitos não acreditavam que enormes blocos continentais pudessem se mover e gerar cadeias de montanhas e imensos oceanos, agindo de forma significativa na origem e destruição de massas continentais. Para suportar essa teoria, vários dados paleomagnéticos, paleontológicos e topográficos tiveram que ser longamente estudados. No entanto, hoje em dia não há dúvidas; de fato, existem regiões da Terra onde as placas possuem movimentos distintos, alimentado pelo calor e forças gravitacionais.

O movimento horizontal que as placas realizam é governado pelas correntes convectivas que se formam no manto terrestre. Em regiões onde o calor ascende, as placas se afastam uma da outra, abrindo espaço para que o magma extravase na superfície. Dessa forma, temos um limite de placa divergente (Figura 1.5), onde há intenso fluxo de calor e, portanto, fusão das rochas e geração de líquidos hidrotermais, isto é, ricos em elementos químicos de interesse como ouro, cobre, zinco e chumbo, entre outros. São em locais como esse que a crosta oceânica é formada, cadeias mesoceânicas originam-se e vales em rifte se desenvolvem.

Figura 1.5 | Bloco-diagrama ilustrando a dinâmica da Tectônica de Placas, com ascensão do calor mantélico, movimentação horizontal da litosfera sobre a astenosfera e as relações de limite das placas



Fonte: Wicander e Monroe (2009, p. 17).

Contrariamente, em zonas onde as placas se movimentam uma em direção à outra, em direção de colisão, temos um limite de placa

convergente. Esse limite pode ser caracterizado por três distintas configurações: 1) margem convergente entre placa oceânica e placa oceânica; 2) margem convergente entre placa oceânica e placa continental e 3) margem convergente entre placa continental e placa continental. Dessa forma, por causa da diferença de densidade entre as placas, teremos a formação de distintas feições geológicas que podem influenciar a geração de depósitos minerais e até mesmo governar a formação de estruturas nas rochas que afetam projetos de engenharia, como túneis e barragens. O fato é que o movimento convergente gera um intenso esforço, causando o dobramento das rochas (ou fraturando-as), aumentando-se a espessura da camada de rochas.

Em zonas convergentes do tipo continental-continental, não ocorre a formação de uma zona de subdução, fato que acontece quando há uma colisão continental-oceânica ou oceânica-oceânica. Nessas zonas de subdução, a rocha que se funde em profundidade sobe em direção à superfície, trazendo consigo diversos minerais da crosta oceânica ou da crosta continental, ou até mesmo causando a fusão de rochas adjacentes e interagindo quimicamente com elas. Sem esquecer que, quando a placa oceânica descende para profundidades maiores, ela carrega consigo uma grande quantidade de água, que favorece a alteração mineralógica.

Além disso, em países situados em zonas de convergência de placas, como Chile, Peru, Japão e Indonésia, há um grande risco de terremotos. Afinal, os tremores de terra acontecem quando as rochas não conseguem mais suportar o intenso esforço que sofrem e simplesmente se rompem, causando uma enorme liberação de energia e, conseqüentemente, estragos nas estruturas das cidades.

O terceiro e último limite de placas é caracterizado pelo movimento de deslizamento entre uma placa e outra. Nesse caso, as placas em contato podem desenvolver um deslocamento relativo em que a litosfera não é criada, nem destruída. Sendo assim, não há fusão de rochas e formação de magma ou fluidos hidrotermais. Nesses casos de limites transformantes, normalmente há um ajuste de esforços e acomodação das rochas para situações mais estáveis, o que pode gerar terremotos e intensos falhamentos nas rochas. A falha de San Andrés, nos Estados Unidos, é um típico exemplo de limite de placas em regime transformante. Dessa forma, pode-

se dizer que a Tectônica de Placas possui uma função dinâmica fundamental, a de manutenção de uma complexa relação de equilíbrio entre eventos de criação, destruição e acomodação de extensos pacotes rochosos.



Pesquise mais

Para que você consiga ampliar seu conhecimento sobre o assunto, recomendamos a leitura do Capítulo 1 do livro *Fundamentos de Geologia*, de Wicander e Monroe (2009), disponível em sua biblioteca virtual.

WICANDER, R.; MONROE, J. S. Entendendo a Terra: uma introdução à Geologia Física. In: _____. **Fundamentos de Geologia**. Tradução: H. O. Avritcher; revisão técnica M. A. Carneiro. São Paulo: Cengage Learning Edições, 2009. Disponível em: <<https://biblioteca-virtual.com>>. Acesso em: 4 set. 2017.

Sem medo de errar

Antes de resolvermos os questionamentos apresentados no Diálogo aberto, vamos relembrar nossa situação lançada no início desta seção.

Você e o geólogo da empresa reuniram-se para montar a primeira parte do curso a ser ministrado por vocês, se lembra? Os fundamentos dessa parte inicial serão uma importante base para introduzir conteúdos que ajudarão os alunos na análise dos minerais formadores de rochas e de minério e lhe darão subsídios para a construção da apostila do curso. Essa etapa corresponde então à primeira etapa, que é a de entender aspectos básicos sobre os materiais geológicos encontrados na mina e, para isso, os seguintes questionamentos devem ser respondidos: qual é a afinidade geoquímica do ferro? Como na empresa exploramos rochas da crosta? Quais são os elementos químicos mais comuns dessa camada? Qual a função da Tectônica de Placas e qual sua implicação para a engenharia e mineração?

Logo, para responder ao seu primeiro questionamento, você deve se lembrar de que existem quatro classes de afinidade geoquímica (ou geológica) dos elementos químicos: os atmófilos,

os litófilos, os calcófilos e os siderófilos. Sobre isso, vimos que tanto o Fe quanto o Ni são elementos densos e que são os mais abundantes do núcleo terrestre; no entanto, conforme apresentado na Figura 1.3, é possível perceber que o Fe possui diversas afinidades, entre eles os elementos litófilos, calcófilos e siderófilos, e, portanto, possui um caráter misto. Feito isso, você deve partir para responder ao segundo questionamento. Para isso, atente-se para o fato de que a camada mais externa da Terra, a crosta, é formada por uma série de elementos litófilos leves, de baixo número atômico, cujas densidades situam-se entre $2,7 - 3 \text{ gm/cm}^3$. Dentre esses elementos, destacamos que o Si e Al são os mais comuns na crosta continental (camada geológica na qual se enquadra a mina) e Si e Mg na crosta oceânica.

Por último, vimos que a Tectônica de Placas é responsável pela manutenção de um equilíbrio entre a destruição e criação de massas rochosas. Por isso, há lugares onde há distintos movimentos que as placas realizam. Como vimos, em zonas nas quais as placas convergem, há um intenso esforço, que pode ocasionar o fraturamento da rocha ou, em alguns casos, ocasionar a fusão das rochas e, em determinadas situações, promover a geração de depósitos minerais. Em zonas divergentes, há um movimento de separação e, conseqüentemente, de um aumento no fluxo de calor e enriquecimento químico de determinados fluidos por meio do fenômeno de hidrotermalismo, que também pode gerar depósitos minerais. Já em zonas transformantes, há um movimento relativo de deslizamento entre uma placa e outra, fenômeno que pode gerar terremotos e afetar as construções das cidades.

Dessa forma, você conclui a primeira etapa de seu desafio. Lembre-se de começar a se preparar para a produção da sua apostila, que será o material de apoio para a análise proposta no curso. Certamente, ela deixará os alunos preparados para seguir os estudos.

Avançando na prática

A geologia e sua cidade

Descrição da situação-problema

Imagine que você é o mais novo engenheiro da prefeitura de uma cidade de médio porte situada em uma região montanhosa, com

algumas serras. Dentre suas atividades destaca-se o monitoramento das pedreiras e jazidas de areia (extraída do arenito), mármore e basalto municipais que fornecem materiais para as obras públicas. O novo prefeito, em parceria com as secretarias de meio ambiente e urbanismo, implantou um projeto socioambiental que consiste em explorar e disseminar o conhecimento sobre os recursos geológicos da cidade por meio da instalação de placas informativas em parques, locais de afloramento de rochas e praças. Você, que é o responsável pelo monitoramento das áreas de extração mineral da cidade e conhece todos os recursos geológicos que o município pode oferecer, ficou responsável por parte do conteúdo informativo dessas placas. O que e quais são os materiais geológicos? Quais são os tipos de rochas presentes na nossa cidade e como elas se formaram? Como as montanhas que cercam a cidade se formaram? Essas são perguntas que devem ser, portanto, respondidas por você.

Resolução da situação-problema

É muito importante que o cidadão se sinta como parte integrante de seu município; informá-lo sobre os recursos naturais da cidade é uma ótima maneira de contextualizá-lo sobre como o município gere esses recursos naturais. Sobre sua atividade, responda de forma simples e clara às perguntas para que todos os cidadãos possam entender.

Os materiais geológicos encontrados são os minerais, as rochas, os fósseis e meteoritos, materiais esses que se formam por processos naturais, pela interação e afinidade de elementos químicos e que posteriormente podem ser modificados por fatores naturais. Existem três tipos de rochas: as ígneas (como o basalto), as sedimentares (como o arenito) e as metamórficas (como o mármore). As rochas ígneas são formadas pela solidificação e resfriamento de magmas, as sedimentares por agregação, compactação e ligação de partículas sólidas e as metamórficas por acréscimo de temperatura e pressão sobre uma rocha preexistente. As montanhas da cidade são constituídas por causa de esforços convergentes entre placas tectônicas; quando duas placas tectônicas se chocam causa o dobramento nas rochas e geração de falhas e fraturas, aumentando a espessura da camada de rochas, gerando as montanhas. Com essas informações, sua tarefa está concluída e você poderá finalizar a produção da placa informativa.

Faça valer a pena

1. A análise química de rochas e minerais é uma das muitas análises feitas pela indústria mineral. As vantagens são diversas, entre elas está a classificação da rocha, que serve para o estudo do ambiente de formação. Por isso, é sempre importante considerar a química dos minerais e rochas, no caso de projetos de exploração mineral.

Considerando que os elementos podem ser classificados em classes geológicas/geoquímicas distintas, que revelam a afinidade química dos elementos, é correto afirmar que:

- a) Os elementos ouro (Au) e níquel (Ni) são considerados atmófilos.
- b) Os elementos sódio (Na) e potássio (K) são considerados calcófilos.
- c) Os elementos zinco (Zn) e cobre (Cu) são considerados litófilos.
- d) Os elementos cálcio (Ca) e sódio (Na) são considerados litófilos.
- e) Os elementos ferro (Fe) e chumbo (Pb) são considerados atmófilos.

2. A formação da Terra foi um processo complexo. No entanto, após sua origem, nosso planeta continuou evoluindo e, de certa forma, ainda continua. Essa natureza evolutiva causou, entre outras coisas, uma diferenciação química na Terra que a deixou configurada em camadas: a crosta, o manto e o núcleo.

Sobre as camadas da Terra, suas características e divisões, assinale a alternativa correta:

- a) Crosta e manto inferior são separados pela descontinuidade de Mohovicic.
- b) A crosta é formada por materiais dúcteis, ou seja, maleáveis e possui densidade elevada, maior que 5 g/cm^3 .
- c) O núcleo é formado por uma camada rígida externa e um núcleo interno líquido, segundo inferências geofísicas.
- d) O manto inferior juntamente com o manto intermediário formam a litosfera.
- e) Crosta e manto superior são separadas pela descontinuidade de Mohorovicic.

3. A formação de depósitos minerais e também o desenvolvimento de estruturas nas rochas está muitas vezes ligada à Tectônica das Placas. A movimentação contínua das placas faz com que diferentes configurações e ambientes geológicos surjam ao redor do mundo. Por isso é tão importante estudarmos sobre o seu comportamento e sua expressão. Sobre o fenômeno da Tectônica de Placas, analise os itens e aponte a alternativa correta.

- a) Nos limites de placas convergentes é comum o aparecimento de vales em rifte, onde há um intenso fluxo de calor e hidrotermalismo.

- b) Os limites de placas existentes são: divergente, oblíquo e transversal.
- c) Em zonas divergentes, é comum a ocorrência de hidrotermalismo, que pode gerar depósitos de minérios.
- d) Em zonas transcorrentes, como não há choque de placas, não é comum o acontecimento de terremotos.
- e) As placas tectônicas movem-se por meio do fluxo de calor, sendo o núcleo interno o produtor desse calor.

Seção 1.2

Mineralogia básica

Diálogo aberto

Caro aluno, antes de começarmos esta seção, lembre-se de que na anterior estudamos alguns conceitos e informações básicas de geologia e mineralogia. Agora, nesta segunda seção da primeira unidade, começaremos a estudar os minerais. Primeiramente, veremos alguns conceitos básicos sobre ligações químicas, fundamentais para o entendimento da organização da estrutura cristalina dos minerais. Depois, aprenderemos o que são eixos cristalográficos e de que forma o ordenamento interno de qualquer mineral está restrito a sete sistemas cristalográficos. Essa organização cristalográfica é importante, pois ela influencia nas propriedades físicas e químicas dos minerais, as quais nós também estudaremos nesta seção. Além disso, conheceremos os principais processos responsáveis pela origem dos minerais e, por último, abordaremos os principais materiais e métodos diagnósticos utilizados para reconhecê-los.

Mas, antes de começarmos, é imprescindível que relembremos o nosso contexto de aprendizagem, apresentado no Convite ao estudo da unidade. Vimos que você, no papel de um consultor técnico de uma grande mineradora, ministrará um curto curso de extensão para estudantes universitários. Como o escopo final do curso será o de realizar uma **análise dos minerais formadores de rochas e de minérios** em uma mina de exploração de ferro – tendo como material de apoio uma apostila para os alunos referente aos principais pontos das etapas desse estudo –, você estudou, na Seção 1.1, a respeito de aspectos básicos sobre os materiais geológicos encontrados na mina. Lembra?

Seguindo o seu trabalho, suponha que vocês se organizaram para decidir o que será apresentado no segundo encontro sobre “como se formam os minerais e quais métodos são usados para sua identificação”. Para isso, imagine que você sugeriu levar no momento do encontro presencial amostras de mão dos minerais,

para que os cursistas consigam fixar o conteúdo. Em contrapartida, seu companheiro ministrante sugeriu levar modelos simplificados dos sistemas cristalinos dos minerais. Para que vocês se organizassem melhor, foi decidido então seguir o seguinte escopo para a continuidade do curso: quais são os sistemas cristalinos dos minerais, para que possamos montá-los? Considerando as propriedades físicas dos minerais, quais devemos destacar? Quais materiais diagnósticos devemos utilizar na segunda etapa da análise, levando em conta que utilizaremos apenas amostras de mão?

Agora é com você, caro aluno. De que modo você responderia a essas questões? Para ajudar você nesse desafio, veremos de que forma todos os minerais que existem são enquadrados, considerando sua estrutura interna, baseando-nos principalmente no ordenamento dos átomos e no eixo cristalográfico e os respectivos ângulos interaxiais. Além disso, abordaremos as propriedades físicas normalmente analisadas em laboratório, ou em campo, e analisaremos os principais materiais e utensílios empregados para o reconhecimento delas. Assim, estruture seus pensamentos e relacione os conceitos para continuar aprendendo!

Não pode faltar

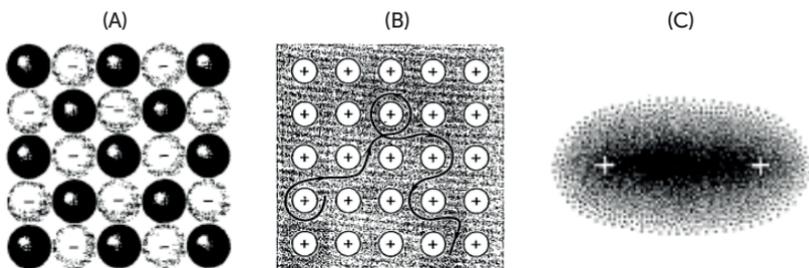
Os minerais são os materiais geológicos básicos de todas as rochas e, inclusive, fornecem elementos e/ou compostos químicos essenciais para a manutenção de nossa vida na Terra. Classicamente, os minerais são definidos como uma substância de ocorrência natural, sólida, cristalina e geralmente inorgânica, que possui uma composição química específica. Para entender o conceito de mineral, no entanto, há um importante fundamento: a ligação química. Afinal, é por meio da união de elementos químicos que toda a estrutura mineral se forma e, conseqüentemente, determina suas propriedades físicas e químicas.

A maneira com que os elementos químicos se combinam é reflexo da interação em nível atômico. Essa relação que se processa é governada pela busca constante do equilíbrio químico que ocorre, principalmente, como resultado da redistribuição dos elétrons, conduzindo-os a uma configuração mais estável, menos energética. Assim, as forças ligantes, ou seja, que unem os átomos nos minerais, são fundamentalmente de natureza elétrica, pois são formadas pela equalização de cargas positivas

e negativas. Para a cristalografia mineral, as ligações mais importantes são as ligações iônicas, metálica, covalente, de van Der Waals e de hidrogênio (também conhecidas como Pontes de Hidrogênio). Dentre essas, destacaremos as três primeiras.

A **ligação iônica** envolve a transferência de elétrons de um átomo para outro, de forma que ambos possuam estabilidade (ou neutralidade eletrostática). É o que acontece, por exemplo, no caso da halita, um mineral que dá origem ao “sal de cozinha”, ou NaCl: o sódio, com carga elétrica positiva (Na^+) se une ao cloro, de carga elétrica negativa (Cl^-), como representado na Figura 1.6-A). Na **ligação metálica** não há transferência de elétrons, mas sim redistribuição e movimentação dos elétrons, de cargas negativas, entre os íons carregados positivamente (cátions). Assim, os elétrons são, na verdade, compartilhados por todos os átomos, porque eles são livres e movem-se com poucas restrições energéticas (Figura 1.6-B). A **ligação covalente** é um caso intermediário entre os dois tipos apresentados anteriormente. Nesse caso, átomos de diferentes elementos compartilham elétrons, adquirindo uma configuração estável (Figura 1.6-C). Um exemplo desse tipo de ligação é o diamante, que compartilha quatro elétrons com os mesmos átomos de carbono. Cabe ressaltar que a ligação metálica é um tipo de ligação covalente, em que um elemento metálico compartilha elétrons com outro metal.

Figura 1.6 | Exemplos de interação atômica das ligações iônica (A), metálica (B) e covalente (C)



Fonte: Klein e Dutrow (2012, p. 80, 83 e 85).

Em termos mineralógicos, a união de diferentes átomos é importante para a formação de uma estrutura cristalina, ou seja, um esqueleto baseado na interação entre vários íons (cátions e ânions).

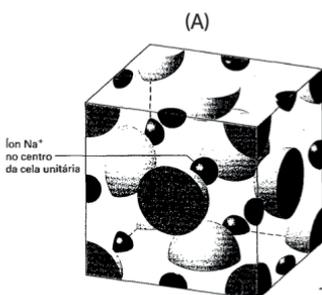
Esse agrupamento dos íons formam um empacotamento que assume um padrão geométrico repetitivo, que pode ser identificado. A menor unidade da estrutura cristalina é a cela unitária. Basicamente, uma cela unitária representa a mínima estrutura de um cristal que melhor enfoque sua relação de simetria, de forma que possua o maior número de ângulos retos possíveis, ou ainda que tenha o maior número de ângulos iguais ou de arestas iguais. De forma análoga, podemos pensar na cela unitária como os elos de uma corrente. A repetição de cada elo forma a corrente, isto é, a estrutura completa.



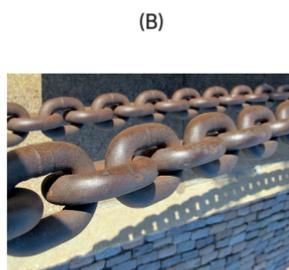
Exemplificando

Para ilustrar o conceito de cela unitária, destacamos aqui duas imagens. Na Figura 1.7-A, é possível observar a cela unitária do mineral halita (NaCl) e, na Figura 1.7-B, exibimos de forma didática a analogia ao conceito de cela unitária discutido acima.

Figura 1.7 | Imagem ilustrando a cela unitária da halita (A) e uma analogia do conceito, exibindo os elos de uma corrente (B)



Fonte: Klein e Dutrow (2012, p. 92).



Fonte: <<http://www.publicdomainpictures.net/pictures/150000/velka/large-chain-links.jpg>>. Acesso em: 15 set. 2017.

Em termos práticos, a cela unitária dita a distância entre os átomos e está associada à forma do empacotamento, fatores que regem a dureza dos minerais. Exemplos disso são o diamante (arranjo cúbico), de dureza 10, e a grafita (arranjo hexagonal), de dureza 1,5, ambos formados por carbono.

A repetição das celas unitárias forma o retículo cristalino, uma estrutura maior que possui sítios (lugares) atômicos que podem ser ocupados por elementos específicos, a depender de suas propriedades químicas (tipo de ligação, tamanho ou raio iônico etc.). O retículo

crystalino, de acordo com o arranjo tridimensional dos átomos, irá assumir uma forma geométrica conhecida, com faces cristalinas e ângulos interfaciais constantes para uma mesma espécie mineral (Lei de Steno). O agrupamento dessas formas geométricas conhecidas em classes similares é baseado, principalmente, no eixo cristalográfico e os respectivos ângulos interaxiais.



Assimile

Os eixos cristalográficos são um conjunto de linhas imaginárias que atravessam um cristal, encontrando-se em seu centro.

O eixo frontal ao observador é chamado de "a", enquanto o eixo vertical é denominado de "c" e o eixo perpendicular a esses dois mencionados é chamado de "b". O ângulo entre "c" e "b" é o alfa (α), enquanto o ângulo entre "a" e "c" é chamado de beta (β) e, por último, o ângulo entre "a" e "b" é denominado de gama (γ). Essas variáveis são, conjuntamente, denominadas parâmetros de rede e, conforme seu tamanho e relação angular, darão origem aos sistemas cristalinos. Esses sistemas cristalinos definem o ordenamento espacial dos átomos e, conseqüentemente, muitas propriedades físicas e químicas dos minerais. De todos os minerais que possuímos na Terra, podemos enquadrá-los em sete sistemas cristalinos: cúbico, tetragonal, ortorrômbico, monoclinico, triclinico, hexagonal e trigonal ou romboédrico (Tabela 1.1).

Tabela 1.1 | Os sete sistemas cristalinos e seus respectivos parâmetros de rede

Sistema cristalino	Relações axiais
Cúbico	$a=b=c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Tetragonal	$a=b \neq c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Ortorrômbico	$a \neq b \neq c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Monoclinico	$a \neq b \neq c$; $\alpha = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ, \gamma = 90^\circ$
Triclinico	$a \neq b \neq c$; $\alpha \neq 90^\circ, \beta \neq 90^\circ, \gamma \neq 90^\circ$
Hexagonal	$a=b \neq c$; $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
Trigonal ou romboédrico	$a=b=c$; $\alpha = \beta = \gamma$

Fonte: adaptada de Tilley (2014, p. 12).



Caso queira aprender mais sobre os sistemas cristalinos, acesse o link a seguir e entenda melhor o assunto.

BRANCO, P. M. **Sistemas Cristalinos**. 18 ago. 2014a. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas--Rede-Ametista/Canal-Escola/Sistemas-Cristalinos-1279.html>>. Acesso em: 15 set. 2017.

A organização da estrutura mineral é importante, em termos práticos, para a identificação das propriedades físicas e químicas dos minerais. De acordo com Klein e Dutrow (2012), podemos analisar as propriedades relacionadas à interação do mineral com a luz, ao comportamento mecânico, à massa, à eletricidade e outros, como magnetismo e radioatividade. Dentre as propriedades relacionadas com a interação luminosa, é importante destacarmos brilho, cor e traço.

O **brilho** refere-se à aparência do mineral quando submetido à incidência de luz. A resposta à luz refletida pode ser de dois tipos: metálico, que é quando o mineral apresenta um grau de refletividade similar a uma superfície metálica polida, como aço; e não metálico, quando a luz incidente é refratada e, portanto, não sofre reflexão luminosa. Há vários termos para nos referirmos ao brilho não metálico, por exemplo, adamantino (similar ao diamante), vítreo (similar ao vidro), perolado (similar a uma pérola), sedoso (similar à seda), entre outros. A **cor** refere-se à tonalidade demonstrada pelo mineral quando a luz reflete ou nele incide. A diferença de cor entre os minerais está ligada à composição química dos minerais, de forma que quando um elemento químico é fundamental à origem do mineral, este mineral pode apresentar uma cor constante e, portanto, ser usada como ferramenta diagnóstica definitiva. O **traço**, por sua vez, é a cor que o mineral deixa sobre uma superfície de porcelana branca. Essa cor refere-se, na verdade, ao pó do mineral que permanece constante, mesmo se duas amostras de um mesmo mineral possuem cores diferentes.

Sobre as propriedades mecânicas, é fundamental analisarmos a clivagem, fratura e dureza. Todas essas propriedades refletem, de alguma forma, a intensidade das forças internas que unem os átomos,

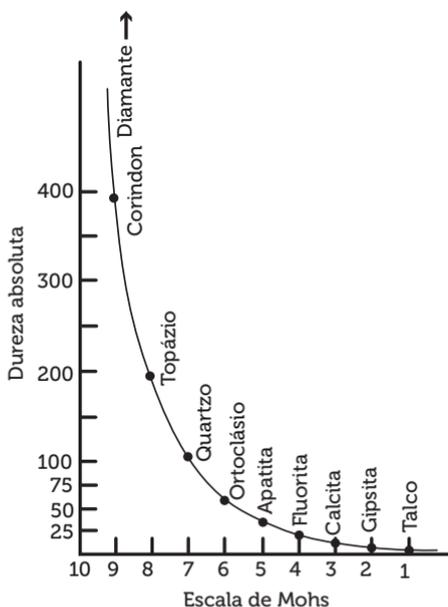
ou seja, a força da ligação atômica. A **clivagem** é caracterizada como a tendência dos minerais de romperem-se em planos paralelos, que ocorre porque diversos minerais possuem zonas de fraqueza. Já a fratura corresponde à tendência do mineral de partir-se em planos irregulares, já que a força das ligações é aproximadamente igual em todas as direções, não havendo zonas de fraqueza. Por último, a **dureza** de um mineral designa sua resistência quando uma face sua é riscada com o auxílio de um utensílio. Fazemos isso utilizando um material de dureza já conhecida, por vezes um mineral conhecido, de forma que podemos comparar quem riscou e/ou quem foi riscado. As escalas de dureza são tão conhecidas que foram classificadas, o que originou a Escala de Dureza de Mohs (Figura 1.8).



Refleta

Se a dureza de um mineral é analisada com referência a um outro material de dureza similar (ou idêntica, em alguns casos), o que acontece se riscarmos minerais de durezas iguais?

Figura 1.8 | Escala de dureza dos minerais segundo Mohs



Fonte: Klein e Dutrow (2012, p. 56).

Com relação à massa, temos que a principal propriedade é a **densidade** (ou massa específica) do mineral. Denotamos a densidade como massa (em gramas) por volume (em centímetros cúbicos), mas a maioria dos minerais comuns ou formadores de rochas possuem densidade similar. Dessa forma, é comum analisarmos a gravidade específica (ou densidade relativa) dos minerais, que representa uma medida padrão do peso do mineral no ar dividido pelo peso de um volume igual de água pura a **4 °C**. Outra propriedade importante para analisarmos é o **hábito cristalino**. O hábito de um mineral é representado pela forma externa que seus cristais individuais ou agregados crescem, o que muitas vezes é reflexo de seu sistema cristalino. Assim, são comumente referidos de acordo com sua forma geométrica similar. Como exemplo, temos minerais com hábito prismático, laminar, acicular, entre outros.



Pesquise mais

Para que você consiga entender melhor as propriedades físicas dos minerais, dando destaque para figuras que ajudam a compreender o conteúdo, recomendamos a leitura do capítulo 3, especialmente o trecho entre as páginas 64 e 68, do livro *Fundamentos de Geologia*, de Wicander e Monroe (2009), disponível em sua biblioteca virtual.

WICANDER, R., MONROE, J. S. Minerais: Os Constituintes Rochosos. In: _____ **Fundamentos de Geologia**. Tradução H. O. Avritcher; revisão técnica M. A. Carneiro. São Paulo: Cengage Learning Edições, 2009. Disponível em: <<https://biblioteca-virtual.com>>. Acesso em: 15 set. 2017.

Embora as propriedades físicas sejam as mais conhecidas dos minerais, é importante sabermos algumas propriedades químicas que ajudam a identificar os minerais ou, igualmente significativo, que caracterizam alguns deles. Talvez a propriedade química mais significativa seja a **solubilidade**. Isso porque certos minerais apresentam uma visível reação com alguns ácidos, dentre eles, o ácido clorídrico. É o caso, por exemplo, da calcita (**CaCO₃**) que ao entrar em contato com o ácido clorídrico em solução libera o gás dióxido de carbono, causando um efeito de efervescência. A **radioatividade** também é outra propriedade química que também pode ser analisada, já que muitos minerais contêm elementos radioativos, como urânio (U) e tório (Th), que sofrem decaimento radioativo, fenômeno que libera energia na forma de partículas alfa e beta além de radiação gama.

Em alguns casos, podemos identificar os minerais também por seu **odor e sabor**. Apesar de não serem propriedades químicas propriamente ditas, é a composição química do mineral que permite diagnosticá-lo por meio de seu cheiro característico ou de sua característica no paladar. Nesses casos, podemos destacar o enxofre (S), que cheira a "ovo podre" ou, no caso dos minerais evaporíticos, a distinção entre a halita (NaCl) – que tem gosto salgado – e a silvita (KCl), que tem gosto salgado e amargo.

De forma complementar às propriedades químicas dos minerais, podemos destacar duas características químicas importantíssimas para a mineralogia: os conceitos de **isoestruturalismo (isomorfismo)** e **polimorfismo**. Os minerais que possuem a mesma estrutura cristalográfica, ou seja, o arranjo tridimensional dos átomos, são substâncias isoestruturais, muito embora os elementos químicos possam ser diferentes. É o caso, por exemplo, da uraninita (UO_2) e da fluorita (CaF_2) que possuem estruturas similares, porém composição química distinta. Diferentemente das substâncias isoestruturais, os minerais polimorfos são caracterizados por possuir a mesma fórmula química, mas diferente estrutura. Nesse sentido, temos o exemplo da calcita (CaCO_3) que se cristaliza no sistema trigonal, enquanto a aragonita (CaCO_3) forma-se no sistema ortorrômbico.

Todas essas propriedades, físicas e químicas, assim como as características estruturais apresentadas anteriormente e a composição química dos minerais, estão relacionadas ao ambiente geológico de formação dos minerais, mas também ao modo que essas substâncias são criadas. O processo básico de formação dos minerais é a cristalização, isto é, o surgimento de um sólido a partir de um líquido (ou gás) de maneira que os átomos constituintes se unam conforme proporções químicas e arranjos cristalinos adequados. Para que isso ocorra, há basicamente três tipos de processos formativos.

1. **Precipitação a partir de uma solução:** neste tipo de processo, os cristais são formados, geralmente, por meio da evaporação do solvente (no caso de aumento de temperatura), ou pela diminuição da temperatura ou ainda pela diminuição de pressão. O exemplo mais clássico é justamente a halita (NaCl), um mineral evaporítico.
2. **Solidificação:** quando determinada substância atinge temperatura abaixo do ponto de fusão (ou, mais raro, pelo acréscimo de pressão). Entretanto, em mineralogia, a cristalização de muitos

minerais acontece pela solidificação do magma, o que muitas vezes acontece em temperaturas até mesmo superiores a 1.000 °C.

3. **Sublimação:** neste caso, a formação dos minerais acontece pelo resfriamento de um determinado gás. Embora menos comum, é um dos processos responsáveis pela formação cristais em torno das fumarolas vulcânicas, zonas ricas em recursos minerais.

Para completar o assunto, vamos analisar de que forma podemos utilizar as propriedades físicas e químicas tratadas aqui para identificar os minerais. Os materiais empregados e os métodos seguidos são diversos, a depender a complexidade estrutural e composicional de um determinado mineral.

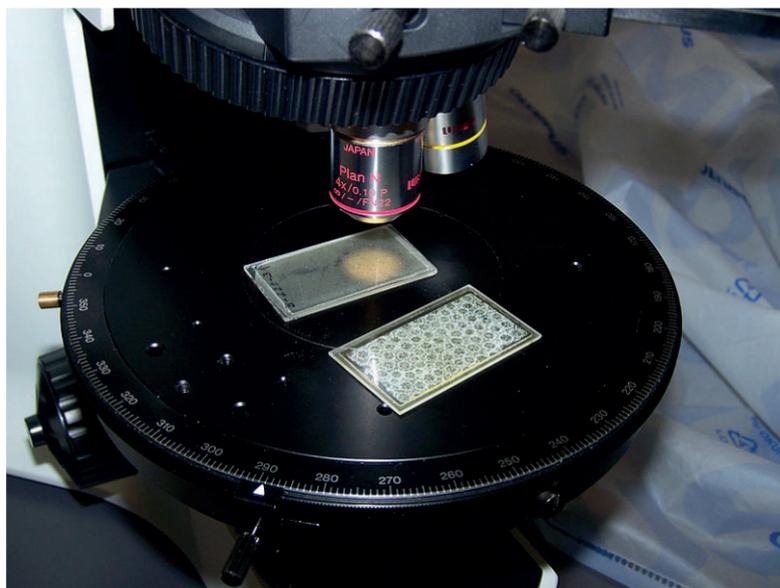
Primeiramente, abordaremos os materiais mais simples empregados fundamentalmente na análise macroscópica dos minerais, ou seja, em amostras de mão. Para isso, praticamente todo e qualquer laboratório de mineralogia possui em seu acervo um kit de identificação de minerais composto por alguns utensílios:

- a) placa de vidro, para identificar os minerais com dureza acima de 6. Em alguns casos, uma amostra de quartzo (dureza 7) também é válida;
- b) moeda de cobre, para diagnosticar minerais com dureza até 3;
- c) canivete, para identificar os minerais com dureza entre 4 e 5;
- d) placa de porcelana, empregada para o reconhecimento da cor do traço do mineral;
- e) lupa de bolso e/ou de mesa, útil para a observação do tipo de clivagem e fratura, além de qualquer outro detalhe invisível a olho nu;
- f) ímã, fundamental para o reconhecimento ou não de magnetismo do mineral; e
- g) ácido clorídrico diluído, para a realização do teste de solubilidade, importante para alguns minerais carbonáticos e fosfáticos.

Além disso, há alguns laboratórios que possuem uma balança de Joly para realizar o cálculo da gravidade específica. No entanto, nem sempre os minerais apresentam-se soltos ou como amostras individuais

e, ainda mais complexo, muitas vezes os minerais encontram-se agregados em uma rocha e em tamanho bem reduzido. Por isso, é comum em mineralogia a utilização do microscópio óptico (de luz polarizada por absorção), para a identificação das propriedades físicas dos minerais de forma pormenorizada. Nesses casos, a rocha que contém os minerais é cortada e colocada em lâminas delgadas, como demonstra a Figura 1.9.

Figura 1.9 | Exemplo de lâminas delgadas de rochas usadas para identificação dos minerais no microscópio petrográfico



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e9/Thin_sections.JPG/800px-Thin_sections.JPG>. Acesso em: 15 set. 2017.

Nos casos de minerais opacos, como a maioria dos minerais de minério, o microscópio óptico de luz polarizada é substituído por um de luz refletida e, neste caso, estuda-se os minerais com base na refletividade da luz que incide neles. Em casos mais complexos ou até mesmo para estudo dos minerais de argila, é empregado um equipamento de difração de raios X, comumente denominado de DRX. Outros equipamentos empregados são o espectrômetro de massa e os microscópicos eletrônicos de varredura.

Relembrando nossa situação-problema, apresentada no início desta seção, vimos que para dar continuidade ao planejamento do curso que será ministrado, você sugeriu levar no momento do encontro presencial amostras de mão dos minerais e seu companheiro também recomendou que fossem levados modelos que representassem os sistemas cristalinos dos minerais. Feito isso, para alinhar o pensamento de vocês, foi decidido seguir o seguinte escopo para o curso e a análise, que também deverá ser realizada pelos alunos no encontro presencial, sendo, portanto: quais são os sistemas cristalinos dos minerais, para que possamos montá-los? Considerando as propriedades físicas dos minerais, quais devemos destacar? Quais os materiais diagnósticos devemos utilizar, na segunda etapa da análise, levando em conta que utilizaremos apenas amostras de mão?

Para que vocês consigam então elaborar os modelos dos sistemas cristalinos, você deve se recordar que todos os minerais se cristalizam de maneira ordenada, ou seja, se formam seguindo um arranjo tridimensional definido. Esse ordenamento dos átomos é definido conforme os eixos cristalográficos (a, b e c) e os ângulos que as faces cristalinas formam umas com as outras ($ab = \gamma$; $ac = \beta$; e $bc = \alpha$), que são denominados, conjuntamente, de parâmetros de rede. Assim, temos sete sistemas cristalinos: 1) sistema cúbico; 2) sistema tetragonal; 3) sistema ortorrômbico; 4) sistema monoclinico; 5) sistema triclinico; 6) sistema hexagonal e 7) sistema trigonal ou romboédrico.

Sobre as propriedades físicas dos minerais, é importante destacar no curso aquelas que podem ser investigadas em amostras de mão, afinal são esses exemplares que vocês levarão ao curso. Por isso, lembre-se que para identificar um mineral é importante reconhecer o seu brilho, que expressa a característica de um mineral em refletir a luz incidente, revelando pistas sobre sua natureza química, sua cor e cor de traço. Lembre-se que a cor do traço se refere ao pó deixado pelo mineral quando riscado na porcelana branca. Além disso, é fundamental analisar a ocorrência ou não de clivagens e/ou forma da fratura, além de analisar a dureza do mineral, comparando-o com outros materiais de dureza conhecida, inclusive podendo-se utilizar de minerais, tentando enquadrá-los conforme a escala de dureza de Mohs. Adicionalmente, identificar o hábito do cristal também auxilia

no diagnóstico do mineral e possibilita correlacionar as propriedades físicas com os sistemas cristalinos dos minerais, casando os conteúdos.

Para finalizar, com o objetivo de analisar todas essas propriedades apresentadas com os alunos, é preciso que você leve uma lupa de bolso ou de mesa, visando identificar mais facilmente o brilho e a ocorrência de clivagem ou, adicionalmente, o tipo de fratura. Além disso, é fundamental que sejam levados uma placa de porcelana branca para observar a cor do traço do mineral e uma placa de vidro, uma moeda e um canivete para comparar as durezas. Se possível, ainda melhor, comparar a dureza com outros minerais, assim eles terão uma melhor noção da dureza.

Realizando todas essas etapas e solucionando a sua segunda tarefa, agora você já sabe reconhecer quais propriedades físicas e químicas dos minerais são importantes. Tudo isso então poderá ser trabalhado no curso, que contemplará a análise dos minerais formadores de rochas e de minérios, cujo escopo será concluído na próxima seção.

Por enquanto, mais uma parte do seu desafio foi concluída. E lembre-se: ao final desta unidade você deverá estruturar uma apostila com todos os principais pontos para a elaboração da análise proposta no “Convite ao estudo”. Portanto, vá se preparando!

Avançando na prática

Mineralogia em campo

Descrição da situação-problema

Para exemplificar como é importante conhecermos quais são as propriedades físicas e químicas dos minerais que auxiliam os diagnósticos desses materiais geológicos, vamos imaginar que você esteja coordenando uma campanha de sondagens que auxiliarão vocês na identificação dos minerais que ocorrem no subsolo de determinada região. Considerando essa situação, é imprescindível que você realize uma breve capacitação da equipe responsável em executar o trabalho em campo. Assim, você decidiu explicar para eles quais ferramentas e utensílios eles deveriam ter para auxiliá-los no serviço. Feito isso, imagine que após algum tempo eles realizaram a perfuração de 10 m e algumas amostras foram coletadas. Nessas

amostras, haviam alguns minerais diferentes e você decidiu explicar como é feita a análise das propriedades, mas, primeiro, lançou o seguinte questionamento:

“Vejam, aqui temos dois minerais brancos, será que algum deles poderia ser uma calcita? Aqui vemos um mineral escuro, com uma aparência oxidada, qual utensílio podemos utilizar para ver se o mineral é magnético ou não? Aqui tem um mineral translúcido que parece um diamante, como podemos testar se realmente é um diamante?”

Agora o seu desafio é responder a essas perguntas.

Resolução da situação-problema

Para que você consiga explicar para a equipe de sondagem como eles devem manusear os utensílios, é importante que você lembre as propriedades e saiba como elas podem ser testadas. Por exemplo, considerando o primeiro questionamento, você deve se recordar que a calcita é um mineral carbonático que apresenta um grau de solubilidade que pode ser testado com a ajuda de um ácido, especificamente o ácido clorídrico diluído (HCl). Por isso, diga ao pessoal que estará em campo que eles podem pingar uma gota de HCl para observar se há “efervescência” na superfície do mineral. Caso ocorra, você já sabe que o mineral provavelmente será uma calcita. Com relação à segunda pergunta, explique que o fenômeno de magnetismo pode ser testado com o auxílio de um ímã, algo bem simples. Por último, considerando que o diamante é um recurso valioso, mas também com uma dureza característica, afinal é o mineral de maior dureza que conhecemos, é possível identificá-lo utilizando uma placa de vidro e, melhor ainda, uma amostra de quartzo, para riscá-lo e ver qual risca qual. Lembre-se! O mineral de maior dureza risca o de menor dureza.

Feito isso, você terá concluído esse novo desafio, capacitando melhor a equipe responsável em executar o trabalho em campo, ensinando quais são as propriedades físicas e químicas dos minerais e explicando os materiais e métodos geralmente utilizados para identificá-los em amostras de mão.

Faça valer a pena

1. Os minerais se organizam em uma estrutura interna conhecida e ordenada. Esse arranjo tridimensional de seus átomos é extensamente estudado pela cristalografia, um ramo específico e também muito complexo. Conhecer os aspectos cristalográficos e cristalquímicos dos minerais também auxilia no desenvolvimento de novos materiais, fundamental nos dias de hoje. Sobre os conceitos básicos de cristalografia, analise os itens a seguir:

I - A menor unidade da estrutura cristalina é a cela unitária.

II - O retículo cristalino constitui-se na menor unidade cristalográfica.

III - A repetição do retículo cristalino, de forma ordenada, dará origem à cela unitária.

IV - Os eixos cristalográficos são linhas reais, ortogonais entre si, facilmente reconhecíveis nos minerais.

V - Para a classificação dos sistemas cristalinos, leva-se em conta as faces cristalinas e os vértices do cristal.

Considerando essas afirmações, assinale a alternativa correta:

- a) Os itens I e II estão corretos, apenas.
- b) Os itens I e III estão corretos, apenas.
- c) Os itens III e IV estão corretos, apenas.
- d) Somente o item I está correto.
- e) Os itens II e IV estão corretos, apenas.

2. A distinção entre um mineral e outro não é, muitas vezes, algo tão simples. Assim, é importante conhecermos em quais propriedades físicas e químicas podemos nos apoiar para identificar um mineral. Essa etapa é muito importante, por exemplo, em estudos prospectivos para o descobrimento de novos depósitos minerais.

Levando em conta as principais propriedades físicas e químicas dos minerais estudadas, avalie as alternativas e marque a resposta correta:

- a) O traço é a marca deixada no mineral quando o raspamos com uma lâmina cortante, como um canivete.
- b) A clivagem de um mineral caracteriza-se como a tendência do mesmo em partir-se em planos preferenciais.
- c) A dureza de um mineral representa seu comportamento quando submetido a um choque mecânico.
- d) O hábito cristalino refere-se ao modo como o mineral é formado.
- e) O brilho designa ao comportamento luminoso de um mineral quando ele refrata a luz incidente.

3. O sistema cristalino dos minerais é, em alguns casos, relativamente dinâmico. Assim como outras propriedades físicas e químicas dos minerais,

o sistema cristalino pode se adaptar às condições físico-químicas do ambiente geológico. Por exemplo, a aragonita é um mineral carbonático metaestável, isto é, em condições adversas, ele se transforma em políformo mais conhecido, a calcita. Nesse processo, apesar da composição se manter, o sistema cristalino acaba mudando de ortorrômbico para trigonal.

Sobre os sistemas cristalinos e seus parâmetros de rede, assinale a alternativa correta:

- a) No sistema cúbico, o comprimento dos eixos cristalográficos "a", "b" e "c" são iguais, e os ângulos interfaciais seguem a notação $\alpha = \beta < \gamma$.
- b) No sistema tetragonal, o comprimento dos eixos cristalográficos "a", "b" e "c" são iguais, e os ângulos interfaciais seguem as anotações $\alpha = \beta = 90^\circ$ e $\gamma \neq 90^\circ$.
- c) No sistema triclinico, o comprimento dos eixos cristalográficos "a" e "b" são iguais e "c" é diferente dos dois, e os ângulos interfaciais seguem a notação $\alpha = \beta = 90^\circ$ e $\gamma \neq 90^\circ$.
- d) No sistema ortorrômbico, o comprimento dos eixos cristalográficos "a", "b" e "c" são iguais, e os ângulos interfaciais seguem as anotações $\alpha \neq \beta \neq \gamma = 90^\circ$.
- e) No sistema cúbico, o comprimento dos eixos cristalográficos "a", "b" e "c" é igual, e os ângulos interfaciais seguem a notação $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$.

Seção 1.3

Mineralogia sistemática

Diálogo aberto

Caro aluno, antes de avançarmos, lembre-se de que nas seções anteriores vimos alguns conceitos básicos de geologia e mineralogia, alguns aspectos fundamentais de cristalografia e propriedades físicas e químicas dos minerais. Agora, nesta última seção da primeira unidade estudaremos como os minerais são classificados, especialmente com base em sua composição química, destacando todos os grupos de minerais oriundos dessa sistematização. Depois, daremos ênfase aos silicatos, o grupo mineral mais importante que possuímos. Veremos quais suas classes, tipos de arranjos cristalinos e principais exemplos. Na sequência, iniciaremos nosso estudo sobre os minerais de minério, mostrando os três principais grupos de minerais de valor econômico, aqueles que são fonte de elementos químicos essenciais para a sociedade. Para fechar a seção, apresentaremos alguns minerais industriais e agrominerais que são utilizados como insumo na indústria e agricultura. Com isso, você estará apto para mobilizar conteúdos relativos à geologia e mineralogia básica, assim como mineralogia sistêmica.

Para darmos continuidade, no entanto, devemos lembrar o nosso contexto de aprendizagem, apresentado no “Convite ao estudo” da unidade, no qual você, como consultor técnico de uma grande mineradora, é responsável por ministrar um curto curso de extensão, cujo objetivo principal será o de realizar a ***análise dos minerais formadores de rochas e de minérios que existem em uma mina de ferro*** e, para isso, fornecerá aos alunos, adicionalmente, como material de apoio, uma apostila referente às etapas desse estudo.

O material de apoio para as duas primeiras etapas dessa análise já foi proposto e englobará os aspectos básicos sobre os materiais geológicos encontrados na mina, como se formam os minerais e quais métodos são usados para sua identificação.

Dando continuidade ao seu trabalho, visando qualificar os alunos para que consigam finalizar a análise dos minerais na mina de ferro,

Imagine agora que você e o geólogo da empresa decidiram que levarão o mapa geológico da mina a fim de apresentar os minerais que são extraídos dela. No mapa geológico, é mostrado que as principais rochas da mina eram granitos e ortognaisses, os quais se apresentavam intensamente fraturados e, em algumas partes, essas fraturas eram preenchidas por quartzo e minerais hidrotermais. Próximo às rochas graníticas, havia rochas denominadas de itabirito, além de intrusões básicas, como diques de basalto e diabásio.

Tendo em conta isso, vocês decidiram explorar: quais os principais minerais formadores de rochas que ocorrem nos granitos e ortognaisses? A quais grupos de silicatos esses minerais pertencem? Quais minerais de minério são extraídos do itabirito? Agora a bola está com você, caro aluno. Reflita: de que forma você responderia essas questões?

Para que você não fique só nessa jornada, apresentaremos praticamente todos os minerais formadores de rochas que ocorrem na grande maioria das rochas ígneas, metamórficas e sedimentares. Ademais, aprenderemos quais são os grupos de silicatos que existem, seus tipos de estruturas e quais os exemplares mais recorrentes nas rochas. Por último, analisaremos quais são os principais minerais de minério de onde é extraída boa porcentagem dos elementos de valor econômico. Para isso, leia o livro didático e extraia quanto conteúdo desejar!

Não pode faltar

Assim como muitas ciências mais conhecidas, a mineralogia também emprega métodos de classificação para facilitar o processo de reconhecimento de novos minerais ou estudo dos minerais já reconhecidos pela Associação Mineralógica Internacional (em inglês, International Mineralogical Association – IMA). A sistematização dos minerais em grupos tem permitido agrupá-los em determinados conjuntos com características similares. Sobre isso, vários autores têm discutido, ao longo dos anos, qual seria o método mais apropriado. Atualmente, os mineralogistas adotam a composição química dos minerais para classificá-los. O argumento principal é que, dessa maneira, congrega-se minerais que possuem o mesmo radical aniônico, e estes, por sua vez, possuem propriedades físicas

e morfológicas semelhantes entre si, se compararmos com grupos de minerais de mesmo cátion. Para exemplificar, vamos citar o caso da siderita (FeCO_3), que tem mais afinidade química com a calcita (CaCO_3), ou até mesmo com a magnesita (MgCO_3) do que com a pirita (FeS_2) ou com a hematita (Fe_2O_3), conforme exposto por Teixeira et al. (2003). Além disso, minerais com mesmo radical aniônico possuem a tendência de serem formados por processos físico-químicos similares e ocorrem, muitas vezes, associados uns aos outros na natureza.

Com o avanço dos estudos cristaloquímicos, no entanto, percebeu-se que somente a composição química dos minerais não seria suficiente para classificá-los. Por isso, com base na estrutura interna dos minerais, muitas classes minerais possuem subclasses, baseadas na estruturação interna dos átomos. Os silicatos são um exemplo disso, já que dentro desse grande grupo existem os minerais formados por cadeias de tetraedros de sílica (SiO_4), outros por folhas de SiO_4 , entre outros casos que veremos adiante.

Todos os 5.273 minerais atualmente reconhecidos pela IMA (até julho de 2017) se enquadram em 12 grandes grupos, conforme mostra o Quadro 1.1.

Quadro 1.1 | Grupos de minerais, baseado na composição química do radical aniônico

Elementos Nativos: ouro (Au) e enxofre (S).	Nitratos: salitre (KNO_3) e gehardita ($\text{Cu}_2\text{NO}_3(\text{OH})_3$).
Sulfetos: galena (PbS) e pirita (FeS_2).	Boratos: bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 8(\text{H}_2\text{O})$).
Sulfossais: tetraedrita ($\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$) e enargita (Cu_3AsS_4).	Sulfatos e cromatos: barita (BaSO_4) e gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).
Óxidos e hidróxidos: hematita (Fe_2O_3), cassiterita (SnO_2) e gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$).	Fosfatos, arseniats e vanadatos: apatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{OH},\text{Cl})$).
Haloides: halita (NaCl) e fluorita (CaF_2);	Tungstos e molibdatos: scheelita (CaWO_4) e volframita ($(\text{Fe},\text{Mn})\text{WO}_4$); e
Carbonatos: dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ e malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})$).	Silicatos: quartzo (SiO_2), entre outros.

Fonte: Press et al. (2006, p. 86).



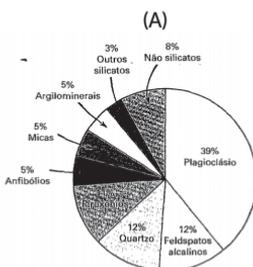
Para saber mais sobre os grupos minerais, recomendamos que você acesse a página do Museu de Minerais e Rochas "Heinz Ebert", da Unesp Rio Claro disponível no link a seguir:

MACHADO, F. B. et al. **Enciclopédia Multimídia de Minerais [on-line]**. ISBN: 85-89082-11-3. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/grm.html>>. Acesso em: 24 set. 2017.

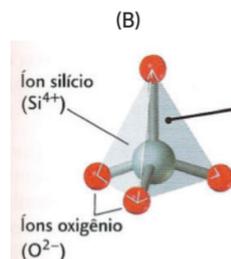
Além da classificação química dos minerais, é também usual, porém menos corriqueiro, agrupar os minerais conforme sua gênese e tipo de ocorrência. Esse tipo de sistematização tem sido mais usado na área de Geologia Econômica, pois a categorização dos minerais conforme o processo genético ajuda a entender possíveis minerais associados com rochas de naturezas similares ou distintas, dependendo do processo geológico que deu origem a elas. Nesses casos, os minerais podem ser classificados em magmáticos, metamórficos, sublimados, pneumatolíticos e os que se formam a partir de soluções.

Dentre as classes de minerais, a mais importante é a dos silicatos, que compreende aproximadamente 27% dos minerais conhecidos (KLEIN; DUTROW, 2012). Juntos, todos os silicatos compõem, em volume, mais de 90% da crosta terrestre (Figura 1.10-A). Os silicatos são formados pela combinação do silício com o oxigênio em uma estrutura tetraédrica na proporção de um átomo de silício para quatro átomos de oxigênio, formando um arranjo tridimensional piramidal (Figura 1.10-B).

Figura 1.10 | Proporção dos minerais silicatados considerando todo o volume da crosta terrestre (A) e estrutura básica dos silicatos, o tetraedro de sílica (B)



Fonte: Klein e Dutrow (2012, p. 464).

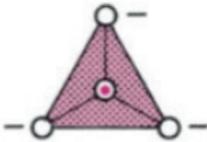


Fonte: Press et al. (2006, p. 85).

Como o átomo de silício tem carga positiva de 4 (Si^{4+}) e cada átomo de oxigênio possui uma carga negativa de 2 (O^{2-}), resultando em um radical de carga negativa de 4 [$(\text{SiO}_4)^{4-}$], ele não ocorre na natureza de forma livre, isolada. Assim, é necessário que esse radical se combine com íons positivamente carregados ou que compartilhe seus átomos de oxigênio com outro tetraedro de sílica. Dessa forma, temos seis diferentes estruturas para os silicatos, conforme ilustra a Figura 1.11: A – **nesossilicatos**; B – **sorossilicatos**; C – **ciclossilicatos**; D – **inossilicatos de cadeia simples e inossilicatos de cadeia dupla**; E – **filossilicatos**; e F – **tectossilicatos**.

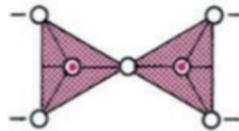
Figura 1.11 | As seis subclasses dos minerais silicatados, considerando a ligação dos tetraedros de sílica e seu arranjo espacial

(A)



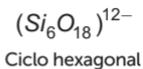
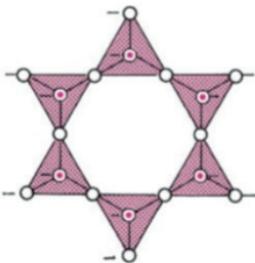
Fonte: Pomerol et al. (2013, p. 520).

(B)



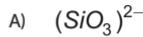
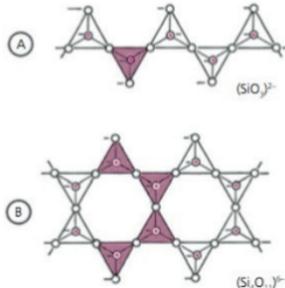
Fonte: Pomerol et al. (2013, p. 520).

(C)

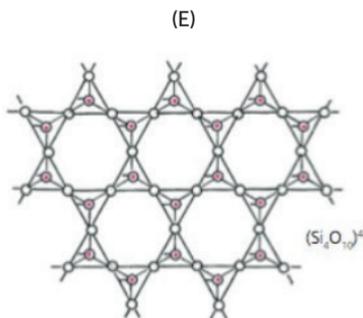


Fonte: Pomerol et al. (2013, p. 522).

(D)



Fonte: Pomerol et al. (2013, p. 524).



Fonte: Pomeroy et al. (2013, p. 525).



Fonte: Klein e Dutrow (2012, p. 466).

Nos nesossilicatos, os tetraedros de sílica são isolados e o íon que os une é formado por um cátion que pode ser Fe^{2+} ou Mg^{2+} , dando origem, respectivamente, aos minerais faiailita (Fe_2SiO_4) e forsterita (Mg_2SiO_4), ambos membros extremos da série da olivina, mineral que se forma em rochas ígneas de alta temperatura. Outros representantes desse grupo são a granada, zircão, esfeno e a cianita. Os sorossilicatos são caracterizados pela união de dois tetraedros que compartilham um oxigênio em comum. Embora existam mais de 70 minerais nessa subclasse, praticamente todos de rara ocorrência, seu exemplo mais comum é o epidoto (que possui 4 minerais isoestruturais).

Os ciclossilicatos, que formam um anel de 3, 4 ou 6 tetraedros, compartilhando os átomos de oxigênio, formam uma cadeia fechada. Os minerais exemplares são as turmalinas, o berilo e a cordierita. Os inossilicatos formam cadeias em que cada tetraedro compartilha dois vértices, no caso dos inossilicatos de cadeia simples, ou três vértices, no caso dos inossilicatos de cadeia dupla. No caso inossilicatos de cadeia simples, os exemplos mais comuns são os minerais que pertencem ao grupo dos piroxênios que, em função de sua simetria, classificam-se em ortopiroxênios (quando cristalizados no sistema ortorrômbico) ou clinopiroxênios (quando formados em sistema monoclinico). Como exemplos de ortopiroxênios há os minerais enstatita e hiperstênio, já no grupo dos clinopiroxênios temos a augita e o diopsídio. Caso tenha dúvidas sobre os sistemas cristalinos, volte na Seção 1.2 para relembra-los.

Considerando os inossilicatos de cadeia dupla, há um outro grupo de minerais que são os anfibólios. Esses se diferenciam dos piroxênios por possuírem em sua composição o radical OH, ou seja, são minerais hidratados. Seguindo a mesma lógica dos piroxênios, os anfibólios também se dividem em ortoanfibólios e clinofanfibólios, embora essa nomenclatura seja menos empregada nesse caso. O exemplo mais notável é a hornblenda, mineral frequente em rochas ígneas e metamórficas. Os filossilicatos são formados por camadas de tetraedros unidos em três de seus vértices, constituindo uma rede plana com malha hexagonal. A conexão entre cada camada dessa organização é estabelecida por cátions, formando uma ligação relativamente fraca. Por isso, esses minerais possuem uma clivagem característica e um hábito foliado ou lamelar. Pertencem a esse grupo as micas (muscovita e biotita), comum em rochas graníticas, cloritas e serpentinas, comum em rochas metamórficas, e argilominerais (ou minerais argilosos), como é o caso da caulinita, esmectita, illita etc.

Por último, os tectosilicatos configuram-se pela união dos quatro vértices num arranjo tridimensional complexo, fazendo com que a estrutura fique fortemente unida e estável. Nesse grupo aparecem os minerais da família da sílica (quartzo, calcidônia, opala etc.), feldspatos (plagioclásios e K-feldspatos), feldspatoides e zeólitas. Aqui é importante citar os feldspatos, que aparecem em muitas rochas da crosta. Nesses minerais, o alumínio pode aparecer substituindo parcialmente a sílica. Dentre os minerais de feldspato potássico (K-feldspato) temos a sanidina e o microclínio, enquanto nos plagioclásios é comum a ocorrência de minerais da série albita-anortita. Tanto o quartzo quanto os feldspatos (K-feldspato e plagioclásio) são os principais constituintes dos granitos e ortognaisses (gnaisse proveniente do metamorfismo de rocha granítica).

Figura 1.12 | Alguns minerais do grupo dos silicatos



Fonte: Wicander e Monroe (2009, p. 64).

Todos esses silicatos são minerais formadores de rocha, ou seja, compreendem a porcentagem mais abundante das principais rochas da Terra. No entanto, outra parcela importante é constituída pelos minerais que possuem valor econômico, os denominados minerais de minério. Dentre eles, destacam-se os óxidos (e hidróxidos), sulfetos e elementos nativos. Os óxidos são minerais consideravelmente duros, densos, refratários e normalmente constituem minerais acessórios em rochas ígneas e metamórficas, mas também como grãos em sedimentos. Os hidróxidos, por sua vez, tendem a possuir dureza e densidade inferiores aos óxidos e, geneticamente, estão relacionados a fenômenos de alteração secundária ou intempéricos.



Assimile

O termo mineral de minério é utilizado para designar os minerais que, em virtude do seu valor de mercado e concentração natural, podem ser extraídos com lucro, isto é, é um termo mais econômico do que geológico.

Os óxidos podem ser óxido simples ou óxido múltiplo. Os simples são aqueles em que um metal se une ao oxigênio, seguindo as seguintes fórmulas genéricas: FeS_2 , XO e X_2O_3 . Já os óxidos múltiplos possuem dois ou mais metais não equivalentes associados, possuindo uma fórmula genérica do tipo XY_2O_4 . Dentre esses óxidos, há vários que são fonte de elementos químicos fundamentais para a indústria mineral, entre eles: 1) Ferro – hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4), minerais base do itabirito, e goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$); 2) Cromo – cromita (FeCr_2O_4); 3) Manganês – pirolusita (MnO_2) e manganita ($\text{MnO}(\text{OH})$); 4) Estanho – cassiterita (SnO_2); 5) Urânio – uraninita (UO_2); e 6) Zinco – zincita ($(\text{Zn,Mn})\text{O}$) e franklinita ($(\text{Zn,Mn,Fe})_2\text{O}_4$).



Exemplificando

Para que você consiga visualizar alguns óxidos, a Figura 1.13 mostra alguns exemplos de minerais de minérios apresentados anteriormente.

Figura 1.13 | Imagens representativas de alguns minerais de óxidos que são fonte de elementos de importância econômica: 1) hematita; 2) cromita; 3) pirrolusita; 4) cassiterita; 5) uraninita; e 6) zircina

(1)



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/19/WLA_hmns_Hematite.jpg>. Acesso em: 25 set. 2017.

(2)



Fonte: <<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b1/Chromite.jpg/640px-Chromite.jpg>>. Acesso em: 25 set. 2017.

(3)



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/19/WLA_hmns_Hematite.jpg>. Acesso em: 25 set. 2017.

(4)



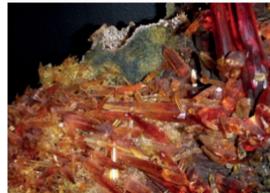
Fonte: <<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b1/Chromite.jpg/640px-Chromite.jpg>>. Acesso em: 25 set. 2017.

(5)



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/19/WLA_hmns_Hematite.jpg>. Acesso em: 25 set. 2017.

(6)



Fonte: <<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b1/Chromite.jpg/640px-Chromite.jpg>>. Acesso em: 25 set. 2017.

Os sulfetos são outra classe de minerais de minério em que o íon enxofre (S^{2-}) se une com um metal. Sua origem está associada à cristalização dos magmas com ácido sulfídrico (H_2S) na fase fluída,

dando origem aos denominados magmas sulfetados. Outro possível processo genético está relacionado à desgaseificação dos magmas em profundidade e no fundo oceânico.

Os principais minerais de minério sulfetados são a galena (**PbS**, fonte de chumbo), esfalerita (**ZnS**, fonte de zinco), calcopirita (**CuFeS₂**, fonte de cobre), molibdenita (**MoS₂**, fonte de molibdênio), arsenopirita (**FeAsS**, fonte de arsênio e normalmente associado à prata e ouro em depósitos minerais orogênicos – formados em eventos de formação de montanhas), entre outros minerais.

Além de serem encontrados na forma de minerais, alguns elementos de importância econômica são explorados em sua forma nativa (estado natural, ou seja, não agregado com outro). Ao total são 20 elementos que ocorrem no estado nativo na Terra, excluindo-se os gases livres da atmosfera. Os metais do grupo do ouro (ouro, prata, cobre e chumbo), da platina (platina, paládio, irídio e ósmio) e o ferro são os principais metais. Entre os semimetais, destacam-se o arsênio e bismuto (Bi), e entre os não metais, os principais são enxofre e o carbono, na forma de diamante e do grafite.

Ainda sob o ponto de vista de aproveitamento mineral, ressalta-se a existência dos minerais industriais e dos agrominerais. Dentro desse conjunto, é importante destacar os carbonatos, sulfatos e fosfatos. Os carbonatos representam uma classe de minerais formados pela união de alguns cátions com o complexo aniônico **CO₃²⁻**, radical que forma a base para os minerais. Nesse caso, os carbonatos são anidros (sem água em sua estrutura) e os três principais grupos são: a) minerais do grupo da calcita – calcita (**CaCO₃**), magnesita (**MgCO₃**), siderita (**FeCO₃**) etc.; b) minerais do grupo da dolomita – dolomita (**CaMg(CO₃)₂**) e ankerita (**CaFe(CO₃)₂**); e c) minerais do grupo da aragonita – aragonita (**CaCO₃**), cerussita (**PbCO₃**) etc. Dentre os carbonatos hidratados, destacam-se os minerais de cobre, malaquita (**Cu₂CO₃(OH)**) e azurita (**Cu(CO₃)₂(OH)₂**).



Refleta

Agora que você viu a fórmula química dos carbonatos, qual você acha que é a diferença entre o calcário calcítico e o calcário dolomítico, muito empregados para correção do solo?

Outro grupo importante são os sulfatos, que se formam pela junção entre o enxofre e o oxigênio, elementos básicos que constituem o radical aniônico SO_4^{2-} . Os sulfatos também se dividem em anidros e hidratados. Os principais minerais sulfatados anidros são a barita (BaSO_4) e a anidrita (CaSO_4), enquanto o principal mineral hidratado de sulfato é a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), única matéria-prima para o gesso. Por último, temos os minerais fosfáticos, que se formam pela união do íon P^{5+} com o oxigênio, resultando no radical aniônico PO_4^{3-} . Nessa classe, os minerais mais importantes são a apatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})$), mineral presente em rochas ígneas e metamórficas, e usualmente aproveitado para fabricação de fertilizantes; e a monazita ($(\text{Ce},\text{La},\text{Nd},\text{Th})\text{PO}_4$), um mineral que ocorre como acessório em rochas graníticas e gnaisses, sendo muito visado porque em sua composição existem elementos terras raras, como o cério (Ce) e o neodímio (Nd), e elementos radioativos, caso do tório (Th).

Sem medo de errar

Relembrando nossa situação-problema apresentada no início desta seção, para finalmente completar o planejamento do curso a ser ministrado, no qual será realizada uma análise completa dos minerais formadores de rochas e de minérios que existem na mina da empresa, você e o geólogo da empresa, com base no mapa geológico da mina, resolveram que explorarão os seguintes tópicos: quais os principais minerais formadores de rochas que ocorrem nos granitos e ortognaisses? A quais grupos de silicatos esses minerais pertencem? Quais minerais de minério são extraídos do itabirito?

Para resolver esses questionamentos, você deve se lembrar de que, conforme foi explicado ao longo do livro didático, os silicatos são os principais minerais formadores de rochas, isto é, eles respondem pela maior porcentagem dos minerais que ocorrem nelas. Considerando os granitos, os minerais principais são o quartzo, os minerais dos grupos dos K-feldspatos (ou feldspatos potássicos) e dos plagioclásios, além dos minerais do grupo da mica, como a biotita e a muscovita. Os ortognaisses, que são rochas metamórficas, apresentam uma mineralogia praticamente idêntica, composta também pelo quartzo e minerais do grupo dos feldspatos, tanto o potássico quanto o plagioclásio.

Respondendo à segunda dúvida, vimos que tanto o quartzo quanto os feldspatos pertencem aos tectossilicatos, um grupo de minerais formados pela união dos quatro vértices do tetraédrico de sílica, seguindo um arranjo tridimensional complexo. Dessa forma, sua estrutura permanece fortemente unida e estável. Já a biotita e a muscovita são representantes do grupo dos filossilicatos, que são formados por camadas de tetraedros unidos em três de seus vértices, constituindo uma rede plana com malha hexagonal. É na conexão entre cada camada dessa organização que cátions se unem à estrutura mineral, deixando a ligação relativamente fraca, dando origem à clivagem característica e ao hábito foliado ou lamelar. Sobre sua última indagação, aprendemos que no itabirito se encontram os minerais hematita (Fe_2O_3) e magnetita (Fe_3O_4), que são dois minerais de minério do grupo dos óxidos. É esses minerais que contêm o ferro extraído em algumas minas do Brasil.

Ao chegar nesta etapa, você está pronto para cumprir todos os passos para finalizar o seu desafio, que é estruturar uma apostila a ser utilizada pelos alunos do curso e que contenha todos os pontos necessários para realização da ***análise dos minerais formadores de rochas e de minérios da mina***.

Lembre-se, você deve apresentar primeiramente pontos básicos de geologia e mineralogia, para embasar os alunos do curso. No segundo passo, você deve apresentar como se formam os minerais e quais métodos são usados para sua identificação. No último, você deve ressaltar os minerais formadores de rochas e minerais de minério que ocorrem na mina de ferro em que você trabalha.

Avançando na prática

Avaliando novos minerais

Descrição da situação-problema

Imagine uma nova situação: o diretor da empresa de mineração em que você trabalha decidiu convocar uma reunião para definir possíveis minerais a serem explorados pela empresa, visando manter o estoque de minérios para venda ao mercado externo. Para essa reunião, você ficou responsável de apresentar possíveis minerais de minério a serem extraídos, dando destaque para seu principal elemento químico para

aproveitamento. Como na época o preço do ouro estava começando a mostrar sinais de recuperação, o diretor da empresa também sugeriu que você considerasse o elemento como possível alvo. Além disso, com a expansão da alta tecnologia, a indústria pode requerer muitos elementos terras raras, por isso você pensou em abordar esses minerais. Preparando sua apresentação para a mesa diretora da empresa, você se deparou com alguns empecilhos teóricos que fizeram você pensar: o ouro é um elemento nativo, mas há algum mineral que ocorre associado a ele e que pode nos auxiliar na sua prospecção? Considerando a geologia da mina em que trabalhamos, formada por granitos e gnaisses, há algum mineral fonte de terras raras que pode ser encontrado nessas rochas?

Resolução da situação-problema

Visando embasar sua apresentação e informar os diretores da empresa sobre os possíveis novos minerais a serem prospectados, é fundamental que você lembre algumas coisas que tratamos aqui no livro didático. Por exemplo, para resolver a primeira questão, você deve se lembrar de que, apesar de o ouro ser um elemento nativo, a ocorrência de minérios na natureza nunca se dá de forma isolada e sem relação com a geologia. Por isso, os minerais de minério, normalmente, ocorrem associados a outros minerais de importância econômica ou, em muitos casos, com minerais formadores de rochas, sem muito valor econômico agregado. Como citamos no livro didático, há um mineral de sulfeto que em muitas ocasiões está relacionado ao ouro, a arsenopirita (FeAsS), que também se associa à prata (Ag). Sobre seu outro questionamento, abordamos o caso do mineral monazita ($(\text{Ce,La,Nd,Th})\text{PO}_4$), um fosfato que carrega em sua estrutura uma gama de elementos que têm sido muito demandados pela indústria tecnológica, caso do cério (Ce) e do neodímio (Nd). Neste mesmo mineral, destaca-se também a ocorrência, em menor proporção, de tório (Th), um elemento radioativo empregado na indústria nuclear.

A partir disso, você possui as informações necessárias para melhor embasar sua apresentação para a mesa diretoria da empresa e, dessa forma, tentar convencê-los sobre os novos alvos para prospecção.

Faça valer a pena

1. A Associação Mineralógica Internacional (IMA) é a entidade responsável pela análise e reconhecimento de todos os minerais que existem na Terra. Atualmente, 5.273 minerais estão cadastrados no banco de dados da instituição, sendo que, desse total, 70 minerais foram descobertos no Brasil.

Considerando que todos os 5.273 minerais podem ser agrupados em 12 grupos, de acordo com sua composição química, julgue as alternativas a seguir e assinale a verdadeira:

- a) Galena e enargita são minerais do grupo dos sulfossais.
- b) Hematita e gibbsita são minerais do grupo dos elementos nativos.
- c) Apatita e bórax são minerais do grupo dos fosfatos.
- d) Calcita e dolomita são minerais do grupo dos carbonatos.
- e) Salitre e pirita são minerais do grupo dos sulfetos.

2. Os silicatos compreendem cerca de 95% do volume de todos os minerais que constituem as rochas da crosta terrestre. Por isso, os silicatos são denominados minerais formadores de rochas, já que compõem a base constituinte delas. Dessa forma, é fundamental conhecer os minerais silicatados para classificar as rochas e entender os processos dinâmicos que originam os depósitos minerais.

Sobre os minerais silicatados, analise os itens a seguir e marque a alternativa verdadeira:

- a) Os minerais do grupo dos nesossilicatos são formados por tetraedros de sílica isolados, e o íon que os une é formado por um cátion, que pode ser Fe^{2+} ou Mg^{2+} .
- b) Os sorossilicatos são caracterizados pela união de tetraedros de sílica isolados e o íon que os une é formado por um cátion, que pode ser Fe^{2+} ou Mg^{2+} .
- c) Os inossilicatos formam cadeias em que cada tetraedro compartilha dois vértices com o tetraedro de sílica adjacente.
- d) Os tectossilicatos configuram-se pela união de 3, 4 ou 6 tetraedros de sílica que formam um anel, compartilhando os átomos de oxigênio, configurando uma cadeia fechada.
- e) Os filossilicatos configuram-se pela união dos quatro vértices em um arranjo tridimensional complexo, fazendo com que a estrutura fique fortemente unida e estável.

3. Em setembro de 2017, o presidente Michel Temer decretou a extinção da Reserva Nacional do Cobre e Associados (RENCA), uma gigantesca área que possui vários minerais de valor econômico, abrindo-a para a exploração comercial. Depois de intenso debate, o decreto acabou sendo revogado,

mas as discussões sobre exploração mineral circularam na mídia. Embora não sejam os únicos minerais de minério da área, a RENCA também contém sulfetos, óxidos e hidróxidos, três dos principais minérios.

Levando em conta os óxidos, hidróxidos e sulfetos, avalie os itens a seguir e assinale a alternativa correta:

- a) O principal óxido fonte de manganês é a molibdenita.
- b) A cassiterita é o principal mineral de sulfeto alvo para extração de estanho.
- c) Um dos minerais de sulfetos de onde se extrai o ferro é a calcopirita.
- d) A galena, um mineral de sulfeto, é uma importante fonte de chumbo.
- e) A esfalerita é um hidróxido muito utilizado para extração de zinco.

Referências

- BRANCO, P. M. **Sistemas Cristalinos**. 18 ago. 2014a. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Canal-Escola/Sistemas-Cristalinos-1279.html>>. Acesso em: 15 set. 2017.
- _____. **O que são e como se formam os fósseis?** 18 ago. 2014b. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Canal-Escola/O-que-sao-e-como-se-formam-os-fosseis%3F-1048.html>>. Acesso em: 29 ago. 2017.
- CPRM. **Meteoritos**. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Canal-Escola/Meteoritos-1090.html>>. Acesso em: 29 ago. 2017.
- GOLDSCHMIDT, V. M. **Geochemistry**. Oxford: Clarendon Press, Oxford, 1954.
- KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de ciência dos minerais**, 23. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.
- MACHADO, F. B. et al. **Enciclopédia multimídia de minerais [on-line]**. ISBN: 85-89082-11-3. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/grm.html>>. Acesso em: 24 set. 2017.
- POMEROL, C. et al. **Princípios de geologia: técnicas, modelos e teorias**. 14. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- PRESS, F. et al. **Para entender a Terra**. Tradução de R. Menegat. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- TEIXEIRA, W. et al. (Org.). **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.
- TILLEY, R. J. D. **Cristalografia, cristais e estruturas cristalinas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.
- WICANDER, R.; MONROE, J. S. **Fundamentos de Geologia**. Tradução H. O. Avritcher; revisão técnica M. A. Carneiro. São Paulo: Cengage Learning Edições, 2009.

Petrologia Básica e Geologia Física

Convite ao estudo

Caro aluno, na unidade anterior aprendemos, entre outras coisas, sobre os minerais formadores de rochas e os minerais de minério, e até vimos muito brevemente que existem três tipos de rochas na Terra, as ígneas, as sedimentares e as metamórficas. Nesta segunda unidade de estudo, vamos primeiramente estudar alguns assuntos fundamentais para o entendimento da origem, composição e características das rochas ígneas e metamórficas. Depois, veremos os principais aspectos ligados à origem, transporte e deposição dos sedimentos, os tipos de ambientes de sedimentação e, por último, as rochas formadas pela consolidação dos sedimentos, processo que ocorre nas bacias sedimentares. Para finalizar, conheceremos os conceitos estratigráficos básicos usados para entender a configuração das rochas em camadas, como é feita a datação relativa e absoluta das rochas e como os eventos tectônicos podem causar deformações nas rochas. O intuito é o de que você saiba qual é a importância de todos esses conteúdos para a engenharia e mineração.

Seguindo a linha de pensamento que você já conhece, vamos contextualizar uma situação para que você aprenda o conteúdo desta unidade mais facilmente: imagine que o governo do seu estado fechou um contrato para o estudo de viabilidade de implantação de uma Usina Hidrelétrica (UHE), e a empresa que você trabalha ficou encarregada de desenvolver as atividades. No entanto, como a região de estudo é bastante montanhosa e possui uma geologia complexa, você sabe que será necessário fazer trabalhos de campo e, muito provavelmente, executar algumas sondagens. No relatório preliminar feito por outro profissional, havia sido informado que, na área, há rochas graníticas, basaltos e riólitos, na forma de distintos corpos plutônicos, além de

gnaiesses e xistos. Como se não bastasse, ainda há arenitos, argilitos e calcários. No relatório, também informa que, por meio de imagens de satélite, é possível visualizar que há diversas estruturas geológicas, entre elas algumas falhas e dobras. Como você trabalha no departamento de projetos e estará diretamente envolvido na supervisão da etapa de mapeamento geológico dos locais de interesse, o qual deverá produzir um parecer definitivo sobre o local da implantação da UHE, você dividiu os trabalhos em três etapas: i) conhecimento das características das rochas ígneas e metamórficas que ocorrem na área de estudo; ii) estudo das rochas sedimentares diagnosticadas preliminarmente, destacando sua composição e características; e iii) relato das estruturas geológicas de importância para o projeto de implantação da UHE. Esse seu parecer deverá ser entregue ao diretor de execução de obras, que irá levar adiante o projeto, e comunicará o governo sobre o local onde será implantada a UHE.

Afinal, qual é a diferença entre as rochas graníticas e os basaltos e riólitos? Como diferenciamos essas rochas ígneas em campo e nas sondagens? Quais são as rochas metamórficas existentes e quais suas principais estruturas e texturas? Como diagnosticamos as rochas sedimentares? Quais são as características estratigráficas e estruturais principais? Por que é tão importante conhecermos as estruturas geológicas que existem na área de um projeto de engenharia ou na área de instalação de uma UHE?

Para que você consiga dar seu parecer, realizando o estudo de viabilidade de implantação de uma UHE, com base no mapeamento geológico, você deve saber mobilizar conteúdos relativos à petrologia básica e à geologia física. Leia com atenção este livro didático e estude a segunda unidade para que possamos continuar nosso processo de aprendizagem compartilhada.

Boa sorte e bons estudos!

Seção 2.1

Rochas ígneas e metamórficas

Diálogo aberto

Olá, aluno! Nesta seção, veremos quais são as rochas ligadas à dinâmica interna da Terra, abordando a sua origem, composição e características. Primeiro trataremos das rochas ígneas plutônicas ou intrusivas, que são as rochas que se formam em subsuperfície, ou seja, em profundidade. Depois veremos brevemente sobre o vulcanismo, o fenômeno que origina as rochas vulcânicas ou extrusivas. Complementando o conteúdo, aprenderemos sobre os fatores condicionantes e tipos de metamorfismo, o processo responsável pela transformação de rochas pré-existentes, e, para finalizar, apresentaremos alguns aspectos mineralógicos, texturais e estruturais das rochas metamórficas.

Mas, antes de começarmos o assunto, que tal lembrarmos rapidamente do desafio lançado no *Convite ao Estudo* da unidade?

Nele, colocamos uma situação em que você deverá apresentar um parecer, realizando o estudo de viabilidade de implantação de uma UHE, com base no mapeamento geológico. Para desenvolver esse trabalho, você decidiu dividir as tarefas em etapas e o seu desafio atual é **conhecer as características das rochas ígneas e metamórficas que ocorrem na área de estudo**. Para desenvolver essa primeira etapa, portanto, imagine que você decidiu que uma equipe de trabalho deveria ir a campo para coletar amostras e, se necessário, avaliar a necessidade de realização de furos de sondagem para reconhecimento do material do subsolo. Antes de enviar o time a campo, entretanto, você decidiu que era fundamental que houvesse uma capacitação técnica para o reconhecimento das rochas descritas no relatório preliminar, pois muitos técnicos foram contratados para essa atividade. Nesse momento, você decidiu então que alguns assuntos eram mais importantes de serem tratados, como: qual a principal diferença textural relativa ao grau de visibilidade entre um granito e o riólito? Qual a diferença entre os dois tipos mais comuns de corpos plutônicos? Quais os principais tipos de estruturas metamórficas e quais rochas possuem essas estruturas?

Agora é com você, caro aluno! Como você poderia tratar desses assuntos? Lembre-se de que para isso iremos lhe ajudar, mostrando que por causa da diferença entre os ambientes e condições de formação das rochas ígneas plutônicas e vulcânicas, os minerais exibem particularidades distintas relativas principalmente ao seus tamanhos e formas. Além disso, mostraremos que os dois tipos principais de corpos plutônicos estão relacionados à sua interação com as rochas encaixantes, isto é, as rochas que hospedam a intrusão. Para completar, veremos que as estruturas metamórficas representam características de distribuição e tipos de minerais, sua orientação ou não, e ainda aspectos relativos à sua alternância composicional. Por isso, aproveite o livro didático e comece a ler sobre esse assunto tão interessante.

Não pode faltar

Nesta seção, veremos primeiramente as rochas relacionadas à dinâmica endógena do planeta, dando ênfase especialmente às rochas plutônicas (ou intrusivas), rochas ígneas vulcânicas (ou extrusivas) e rochas metamórficas.



Assimile

Endógeno é um termo muito utilizado em geologia para referir-se aos processos que ocorrem no interior do planeta Terra, tais como formação do magma, metamorfismo, dobramento das rochas e assim por diante.

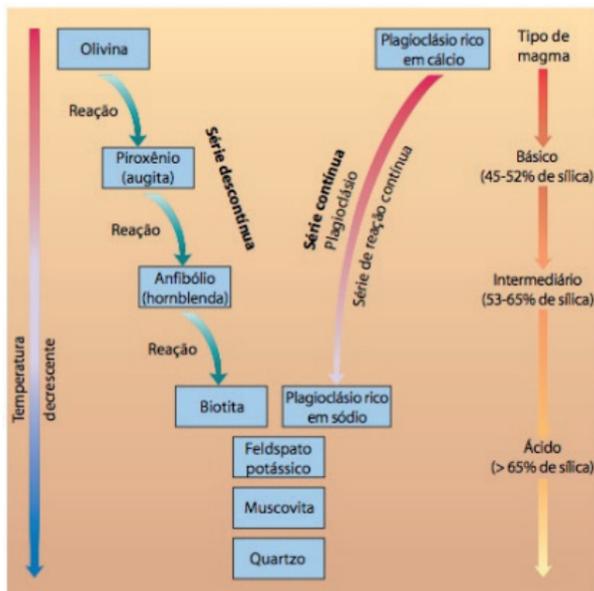
Como podemos perceber, portanto, as rochas ígneas dividem-se em dois tipos: a) as rochas ígneas que se formam em profundidade na crosta, as quais são denominadas de rochas ígneas plutônicas ou intrusivas; e b) as rochas ígneas que, apesar de possuírem como fonte principal o magma, se formam pela sua solidificação em superfície e, portanto, referimo-nos às rochas como ígneas vulcânicas ou extrusivas. Em ambos os casos, o material que dá origem à rocha é o magma, um material rochoso em fusão que se origina, em profundidade, na crosta ou no manto. Esse material pode conter, dependendo da temperatura e pressão, proporções variáveis de elementos voláteis, como gases, minerais já cristalizados (ou até

mesmo pedaços de rocha - xenólito) e um material fluido. Quando este magma extravasa na superfície, passamos a chamá-lo de lava.

Mas por meio de quais processos o magma se origina? São três os processos responsáveis pela geração de magma: aumento de temperatura; alívio de pressão ou adição de voláteis. Esses processos são responsáveis pela fusão parcial de uma rocha pré-existente (protólito) e tais podem coexistir. Normalmente, no entanto, é a combinação desses fatores que faz com que o magma se origine e, por diferença de densidade, ascenda à superfície ou porções próximas a ela. Essa ascensão ocorre por meio de falhas e fraturas, que são caminhos preferenciais, mas muitas vezes o magma estaciona em uma determinada porção e, mesmo por milhares de anos, alimenta eventos eruptivos. Nesse caso, o "bolsão" de magma dá origem a uma estrutura particular, a câmara magmática.

Apesar de parecer um material simples, o magma pode possuir diferenças significativas, principalmente em termos químicos e, conseqüentemente, mineralógicos. Magmas que se originam pela fusão de rochas da crosta são ricos em sílica e contêm uma proporção de alumínio, cálcio, sódio, ferro, magnésio, potássio e outros elementos menores. Magmas que se formam pela fusão das rochas do manto superior, no entanto, contêm menos sílica, e possuem mais ferro e magnésio. O conteúdo de sílica, portanto, é utilizado para diferenciar os tipos de magma: i) magma ácido (riolítico), que possui mais de 66% em peso de sílica; ii) magma intermediário (andesítico), que possui entre 52% e 66% em peso de sílica; iii) magma básico (basáltico), que possui em 45% e 52% em peso de sílica; e iv) magma ultrabásico, que possui menos de 45% em peso de sílica. A cristalização dos minerais que compõem esses magmas segue uma ordem segundo a série de reação de Bowen (Figura 2.1).

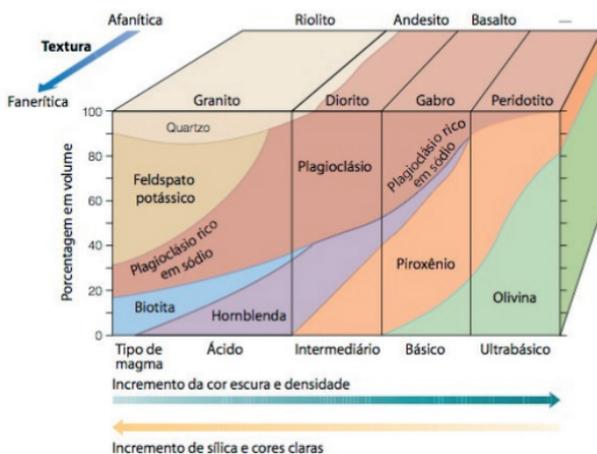
Figura 2.1 | Esquema representativo da sequência de cristalização dos minerais (Série de Bowen)



Fonte: Wicander e Monroe (2009, p. 78).

Cada um desses tipos de magma pode gerar uma gama de rochas, dependendo das condições de formação. Dentre os principais parâmetros utilizados para a definição, além do teor de sílica, usamos o índice de cor (M), a composição mineralógica, a textura e estrutura da rocha. O índice de cor é estimado levando em conta a proporção de minerais félsicos (minerais claros e leves: quartzo, feldspato potássico, plagioclásio etc.) e máficos (minerais escuros e densos: micas, anfibólios, piroxênios, minerais opacos e acessórios), sendo a porcentagem de minerais máficos na constituição volumétrica da rocha o parâmetro utilizado. Para isso, as rochas dividem-se, principalmente, em: a) leucocrática ($35\% > M > 5\%$); b) mesocrática ($65\% > M > 35\%$); e c) melanocrática ($90\% > M > 65\%$). A composição mineralógica está ligada à química do magma que deu origem à rocha, conforme pode ser visto na Figura 2.2.

Figura 2.2 | Diagrama ilustrativo dos tipos de texturas (grau de visibilidade) e composição mineralógica de algumas rochas ígneas mais comuns



Fonte: Wicander e Monroe (2009, p. 87).

Por exemplo, no caso de rochas plutônicas, uma câmara magmática pode gerar um granito, que é composto essencialmente de minerais félsicos (quartzo e feldspatos) ou um gabro, que é composto por minerais máficos e félsicos (plagioclásio, hornblenda, piroxênio e olivina), a depender da composição química do magma. A textura da rocha está relacionada com a dimensão absoluta e relativa dos minerais, bem como seus hábitos e formas. No caso das rochas plutônicas, como os minerais se formam em subsuperfície e possuem mais tempo para cristalização, a textura é constituída por minerais maiores, visíveis a olho nu (fanerítica). Já a estrutura corresponde às feições globais da rocha sem considerar a natureza mineralógica, mas está relacionada às suas condições de formação. Um exemplo é a formação de estruturas ligadas à movimentação do magma, como a estrutura fluidal, bandada ou xenolítica.

A manifestação morfológica das rochas plutônicas acontece na forma de corpos intrusivos, os chamados plútons, que são definidos de acordo com sua geometria tridimensional e sua relação com a rocha encaixante (rocha que aloja uma intrusão de rocha ígnea). Dentre os mais comuns, e que vamos tratar aqui, podemos destacar os diques e soleiras (*sills*). O dique é um corpo geralmente tabular discordante, ou seja, ele atravessa uma sequência de camadas de

rochas ortogonalmente. Já a soleira é um corpo concordante, isto é, apresenta-se de forma paralela às camadas das rochas.



Pesquise mais

Para que você compreenda os termos aqui descritos e enriqueça seu entendimento sobre as rochas plutônicas, é imprescindível que você leia o Capítulo 4 de Wicander e Monroe (2009) e acesse o Atlas de Rochas on-line, aba "Rochas Magmáticas", disponibilizado pela UNESP-Rio Claro.

WICANDER, R.; MONROE, J. S. **Fundamentos de Geologia**. Tradução H. O. Avritcher; revisão técnica M. A. Carneiro. São Paulo: Cengage Learning Edições, 2009. Disponível em: <<https://biblioteca-virtual.com>>. Acesso em: 29 set. 2017.

MACHADO, F. B. et al. **Atlas de Rochas**. [on-line]. ISBN: 85-89082-12-1. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/museudpm/rochas/>>. Acesso em: 29 set. 2017.

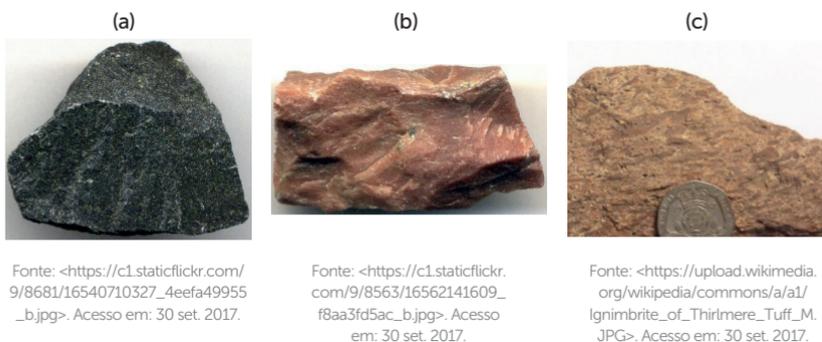
Diferentemente das rochas plutônicas, as rochas vulcânicas representam a expressão de um fenômeno vulcânico. De um modo geral, um vulcão é estruturado em três partes básicas: 1º) câmara magmática, de onde provém o magma; 2º) conduto vulcânico, o "canal" por onde o magma proveniente da câmara magmática é trazido à superfície; e 3º) cratera, de onde o magma é expelido e passa ser denominado lava. No entanto, a lava pode ser expelida por fissuras ou falhas geológicas, constituindo o que chamamos de vulcanismo fissural, fenômeno que não gera vulcões.

O vulcanismo produz uma série de produtos, e as rochas que se formam a partir desse fenômeno tendem a possuir uma textura afanítica, isto é, os seus minerais não são visíveis a olho nu por causa do rápido resfriamento do magma ao extravasar, não dando tempo para a completa cristalização dos constituintes mineralógicos. Um exemplo disso é o basalto (Figura 2.3A), uma rocha vulcânica de composição básica, que se assemelha, mineralogicamente, ao gabro, ou seja, é constituído por plagioclásio sódico (albita), hornblenda, olivina e minerais do grupo dos piroxênios. O basalto é a rocha vulcânica que se origina, principalmente, do derrame de lavas básicas, que são menos viscosas em virtude da menor quantidade de sílica, o que proporciona certa fluidez ao material, permitindo seu espalhamento

para grandes distâncias. Quando originárias de magmas félsicos, com alto teor de SiO_2 , as lavas são denominadas ácidas ou riolíticas (dando origem à rocha riólito, quando consolidada), que por serem mais viscosas apresentam dificuldade de deslocamento e, dessa forma, possuem abrangência mais restrita e produzem explosões vulcânicas de gases, poeira e cinzas vulcânicas. Os riólitos (Figura 2.3B) são os correspondentes vulcânicos do granito, porém com textura afanítica.

As rochas vulcânicas também podem ser formadas pela consolidação de fragmentos vulcânicos expelidos pelo evento eruptivo, como poeiras/cinzas vulcânicas (partículas menores que 2mm), *lapilli* (6,4 cm a 2mm), bombas (fragmentos plásticos > 6,4cm) e blocos (fragmentos rígidos > 6,4cm), as quais dão origem, respectivamente, às seguintes rochas: tufo, lapilito, aglomerado vulcânico e brecha piroclástica, rochas vulcânicas piroclásticas (um subgrupo de rocha vulcânica). Outro produto da ação vulcânica são os materiais piroclásticos, constituídos por partículas soltas ou mistura de cinzas vulcânicas, bombas, blocos e gases, produzidos durante violentas erupções de gases. Esses materiais são transportados, muitas vezes, a altas temperaturas e conforme resfriam vão dando origem à rocha denominada de ignimbrito (Figura 2.3C).

Figura 2.3 | Exemplo de algumas rochas vulcânicas: (A) basalto; (B) riólito e (C) ignimbrito



A expulsão de gases e vapores pelo vulcanismo também pode gerar produtos característicos deste tipo de atividade ou até mesmo produzir algum efeito benéfico. O exemplo disso são as fumarolas submarinas que emitem gases, como o ácido sulfídrico (H_2S) ou dióxido de enxofre (SO_2) que eventualmente se associam a elementos como cobre, chumbo, zinco, ouro etc., gerando depósitos minerais de interesse

econômico. Mesmo o vapor d'água, que é emitido diretamente pelo vulcanismo ou como produto da interação do calor do vulcanismo com a água subterrânea, pode ser aproveitado para a geração de energia geotermal.

Outro fenômeno majoritariamente relacionado à atividade endógena da Terra é o metamorfismo. Como o próprio nome indica (do grego *meta*, "mudança", e *morfo*, "formato"), as rochas metamórficas são provenientes da transformação de outras rochas pré-existentes, sejam elas ígneas, sedimentares (que veremos mais adiante) e até mesmo as próprias metamórficas. Cabe ressaltar que essa mudança composicional e textural das rochas acontece em estado sólido, sob condições específicas e controladas por, basicamente, três fatores. O primeiro é o **calor**, responsável pelo aumento da velocidade das reações químicas que acarretam na transformação composicional da rocha. Esse fator é causado, por exemplo, pela intrusão de um corpo ígneo ou pela subdução de uma placa tectônica em regiões convergentes. Em ambos os casos, quanto mais próximo ao corpo transmissor de calor, maior a transformação que a rocha sofre.

O segundo fator é a **pressão** pois, à medida que as rochas ficam soterradas, aumenta-se a pressão litostática atuante, isto é, a pressão resultante do peso das rochas sobrepostas. Um dos resultados disso é a compactação que os minerais sofrem, o que pode ocasionar a recristalização do mineral, modificando sua estrutura. Em zonas tectônicas submetidas a intensos esforços, as rochas também podem sofrer pressão diferencial, distorcendo os minerais da rocha e até mesmo formando novas texturas e estruturas. O terceiro fator é a **presença de fluidos**, que por possuírem íons em solução que se mobilizam mais rapidamente, aceleram as reações químicas responsáveis pela formação de novos minerais. Esses fluidos quimicamente ativos têm origem em três fontes principais: 1) a água presente nos poros da rocha, importante no caso das rochas sedimentares; 2) os fluidos que se encontram no magma; e 3) os fluidos gerados pela desidratação de minerais que carregam água em sua estrutura, como é o caso da gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Esses três fatores agem em diversas situações, manifestados em diferentes tipos de metamorfismo. Embora haja diversos tipos de metamorfismo, como o metamorfismo de soterramento, hidrotermal, de fundo oceânico e de impacto, há três tipos que se destacam pelo

número de ocorrência e importância geológica. O **metamorfismo de contato**, é quando um corpo ígneo, sob altas temperaturas, modifica a rocha encaixante. Nesse tipo de metamorfismo, a intensidade da transformação da rocha é governada pela temperatura da intrusão (magmas básicos são mais quentes que ácidos) e magnitude do corpo intrusivo (corpos maiores fornecem calor por períodos mais prolongados), conteúdo do fluido magmático (presença de compostos voláteis ou fluidos quimicamente ativos) e composição da rocha encaixante (calcários, dolomitos e folhelhos são mais suscetíveis). Em campo, essa zona onde se manifesta o metamorfismo é denominada da auréola metamórfica, que demarca a extensão normalmente concêntrica da transformação das rochas.

O **metamorfismo dinâmico** está relacionado à atividade geológica que ocorre em zonas de falhas, isto é, em porções onde a rocha está sujeita às pressões diferenciais. Nessas áreas sob intensa deformação, os minerais tendem a reduzir de tamanho e formar texturas bandadas ou até mesmo laminações. Em superfície, a rocha metamórfica originada é denominada de cataclasito, uma denominação genérica para uma rocha que possui minerais fragmentados ou até mesmo pulverizados. Em profundidade, passam a ser denominadas de milonitos e os minerais apresentam-se estirados. Já o **metamorfismo regional** acontece em uma grande área, sendo causado pela alta temperatura aliado à alta pressão, situação mais comum em zonas de placas convergentes. Nesse tipo de metamorfismo a tendência de gradação metamórfica é prevista pela ocorrência de determinados minerais-índices, que revelam as condições metamórficas de baixo, médio e alto grau.

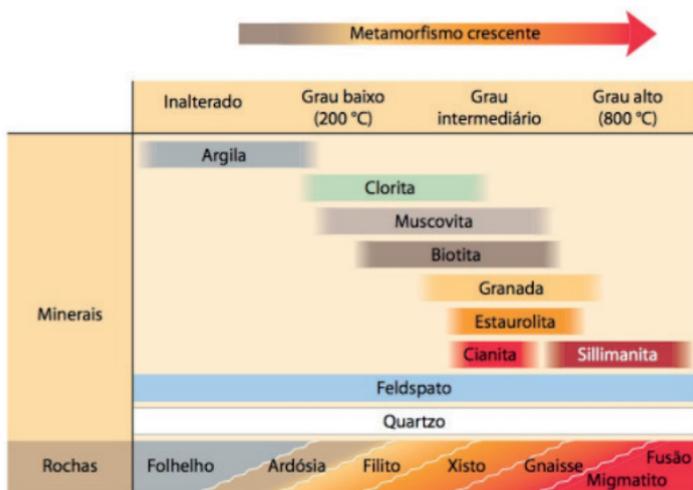


Refleta

Por que é importante identificarmos os minerais mais próximos e os mais distantes das auréolas de metamorfismo?

A Figura 2.4 ilustra o intervalo de ocorrência de determinados minerais-índices considerando a transformação de uma rocha sedimentar (folhelho).

Figura 2.4 | Sequência de aparecimento de alguns minerais-índices e seu respectivo grau metamórfico, levando em consideração o metamorfismo de uma rocha sedimentar de granulometria fina (folhelho)



Fonte: Wicander e Monroe (2009, p. 174).

Em todos os tipos de metamorfismo, a composição mineralógica da rocha resultante da ação do fenômeno de transformação será influenciada pela natureza do protólito, um termo utilizado para designar a rocha mãe, ou seja, a rocha que deu origem a nova rocha metamórfica. Além disso, é importante levar em conta as condições metamórficas sob a qual foi gerada. Rochas compostas por somente um mineral (monominerálicas), como um arenito quartzoso (formado majoritariamente por quartzo) e calcário calcítico (constituído por calcita), por exemplo, darão origem, respectivamente, ao quartzito e ao mármore.

Já as rochas de origem sedimentar – assunto a ser visto na próxima seção – formadas por grãos finos, denominadas de rochas pelíticas, possuem em sua composição uma grande quantidade de argilominerais e outros filossilicatos aluminosos que, ao sofrerem metamorfismo, originam a pirofilita, clorita, granada, estaurolita, andaluzita, cianita, sillimanita e cordierita. Em rochas metabásicas (proveniente da transformação de rochas básicas), cloritas, zeólitas, anfíbios e granadas caracterizam as condições de baixo a médio grau metamórficos, sendo que em condições de metamorfismo de alto grau, eles dão lugar aos piroxênios.

Com relação à textura das rochas metamórficas, é possível distinguir alguns tipos de texturas. As rochas com minerais placoides apresentam superfícies paralelas, planas ou ondulares, formadas pelo alinhamento dos minerais, como as micas (biotita, muscovita e clorita), que geralmente se distribuem perpendicularmente à direção de esforço que causou a deformação. Nesse caso, temos o desenvolvimento da textura lepidoblástica. Um exemplo de rochas que desenvolvem esse tipo de estrutura são a ardósia, o filito ou o xisto. Nas rochas formadas por minerais granulares e prismáticos, os minerais crescem no estado sólido (blastese) e deformam-se por causa dos esforços que a rocha sofre, gerando texturas do tipo granoblástica, formada por minerais granulares sem orientação (como nos mármore, granulito etc.), e nematoblástica, que está relacionada à orientação dos minerais prismáticos presentes na rocha, como piroxênios e anfibólios (como no anfibolito). Em alguns casos, há minerais maiores que se destacam dos outros e aparentam estar “imersos” na trama dos minerais, dando origem à textura porfiroblástica. Em muitos casos, é comum utilizar alguns termos conjuntamente (grano-lepidoblástica, por exemplo), pois algumas rochas, de fato, apresentam texturas complexas.



Exemplificando

A identificação das texturas metamórficas é fundamental na interpretação da história de deformação da rocha. Por exemplo, ao sabermos que os minerais placoides se orientam perpendicularmente à direção de esforço que causou a deformação, podemos prever, em campo, de onde vinha o esforço principal.

Além das texturas, as rochas metamórficas podem exibir estruturas características. Dentre elas, destacam-se: a) foliação, estrutura planar formada pelo arranjo paralelo dos minerais, que pode ser xistosa, quando formada pela orientação de minerais placoides, como mica, clorita e talco, ou denominada de clivagem ardosiana, quando definida pela orientação de minerais micáceos finos; b) estrutura gnáissica ou bandamento gnáissico, formada pela orientação dos cristais de quartzo e feldspato divididos em bandas claras (leucossoma) e escuras (melanossoma); e c) estrutura maciça, sem o desenvolvimento de qualquer tipo de orientação dos cristais.

Figura 2.5 | Figuras representativas de rochas exibindo algumas estruturas metamórficas mais comuns: (A) foliação de uma rocha denominada muscovita-xisto; (B) estrutura gnáissica em um gnaiss; e (C) estrutura maciça de um quartzito

(a)



Fonte: <https://c1.staticflickr.com/1/322/32233454531_e23e3fd009_b.jpg>. Acesso em: 30 set. 2017.

(b)



Fonte: <https://c1.staticflickr.com/9/8725/16310656713_b53b8772e7_b.jpg>. Acesso em: 30 set. 2017.

(c)



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/be/Quartzite_2_.jpg>. Acesso em: 30 set. 2017.

Sem medo de errar

Antes de apresentarmos a solução dos questionamentos lançados inicialmente na seção, é importante relembrarmos a nossa primeira situação hipotética para que você consiga concluí-la com sucesso e dar prosseguimento ao seu trabalho.

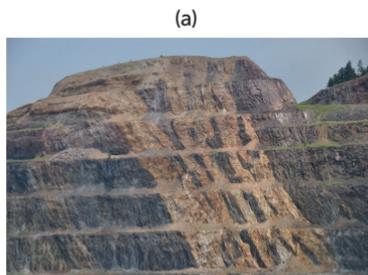
Como propomos, você deve apresentar um parecer, realizando o estudo de viabilidade de implantação de uma UHE, com base no mapeamento geológico. Mas, para isso, decidiu dividir esse projeto em etapas. Na atual, você decidiu que uma equipe de trabalho deveria ir a campo para coletar amostras e, se necessário, avaliar a necessidade de realização de furos de sondagem para reconhecimento do material do subsolo. Antes de enviar o time a campo, entretanto, você decidiu que era fundamental que houvesse uma capacitação técnica, pois muitos técnicos foram contratados para essa atividade. Nesse momento, os seguintes pontos deverão ser abordados: qual a principal diferença textural relativa ao grau de visibilidade entre um granito e o riólito? Qual a diferença entre os dois tipos mais comuns de corpos plutônicos? Quais os principais tipos de estruturas metamórficas e quais rochas possuem essas estruturas?

Para que você consiga resolver esse seu primeiro ponto, você deve se atentar, inicialmente, à natureza de formação das duas rochas. Ambas são rochas ígneas, mas seu ambiente de origem

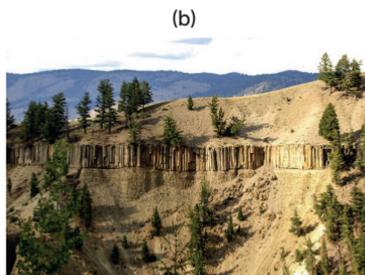
é totalmente distinto. O granito é uma rocha ígnea plutônica, ou seja, se forma em porções mais profundas na crosta. Dessa forma, os minerais possuem mais tempo para desenvolver-se, pois a cristalização acontece de forma mais lenta e, dessa forma, os cristais ficam visíveis a olho nu quando a rocha está consolidada. O riólito, por sua vez, é uma rocha ígnea vulcânica, isto é, seu ambiente geológico de formação é superficial, originada pela cristalização do magma na superfície terrestre. Por isso, como a diferença entre a situação de origem do magma e as condições atmosféricas são completamente distintas e os cristais em formação resfriam-se muito rápido (no caso das rochas vulcânicas), os minerais não possuem muito tempo para consolidarem-se e, desse modo, a rocha permanece com cristais diminutos, comumente invisíveis a olho nu. Por isso, a principal diferença textural entre essas duas rochas, com relação ao grau de visibilidade dos minerais, é o tamanho dos minerais, visíveis nos granitos e indistinguíveis nos riólitos.

Os corpos plutônicos, que se caracterizam pela manifestação morfológica da intrusão de rochas ígneas em outras rochas, possuem algumas feições diferentes, definidas principalmente pela sua geometria e sua relação com a rocha encaixante. No entanto, no livro didático, destacamos os dois tipos mais comuns, isto é, os diques e as soleiras (*sills*). Lembre-se de que os diques são corpos plutônicos normalmente tabulares que aparecem de forma discordante com relação às outras rochas. Portanto, sua expressão em campo é marcada pelo corte transversal de uma sequência de rochas, como na Figura 2.6A. As soleiras, entretanto, são corpos plutônicos, também geralmente tabulares que intrudem uma sequência de rochas seguindo seu acamamento, isto é, paralelo às camadas das rochas (Figura 2.6B). Assim, sua diferença é bem notável e deve ser vista corretamente em campo.

Figura 2.6 | Exemplos dos dois tipos mais comuns de corpos plutônicos: A) dique de riólito cortando rochas metamórficas e B) soleira basáltica, exibindo feições de disjunção colunar



Fonte: <https://c1.staticflickr.com/9/8226/8358789287_804ace93ac_b.jpg>. Acesso em: 1 out. 2017.



Fonte: <<https://pixabay.com/en/erosion-yellowstone-national-park-226655/>>. Acesso em: 1 out. 2017.

Por último, respondendo ao seu terceiro questionamento, vimos que as rochas metamórficas possuem três tipos fundamentais de estrutura: 1) algumas rochas exibem uma foliação metamórfica por causa do alinhamento dos minerais. Nessa estrutura, o arranjo de minerais paralelos forma uma superfície plana em que os minerais se distribuem em virtude da ação dos esforços que causaram a deformação. Neste caso, quando a foliação é formada pela orientação de minerais placoides, como mica, clorita e talco, pode-se chamá-la de xistosidade, ou quando é definida pela orientação de minerais micáceos finos, denominamos de clivagem ardosiária. Um exemplo de rocha que possui esse tipo de foliação é o xisto, uma rocha encontrada na região onde está sendo desenvolvido o seu estudo. 2) Outras rochas possuem um bandamento formado pela orientação dos cristais de quartzo e feldspato divididos em bandas claras (leucossoma) e escuras (melanossoma), o que é muito comum em gnaisses, outro exemplo de rocha que existe em sua região de estudo; e 3) outras rochas não exibem nenhuma estruturação reconhecível e tampouco característica. Embora não existam na sua região de estudo, é importante conhecê-las. Muitas vezes por causa da própria composição monominerálica ou sem minerais filossilicáticos, essas rochas desenvolvem apenas uma estrutura maciça, como ocorre no quartzito.

Resolvendo esses questionamentos importantes para elaboração do parecer, e explicando esses pontos para a equipe que fará o reconhecimento dessas rochas em campo, você terá melhorado

a capacitação dos técnicos e, conseqüentemente, finalizado seu primeiro desafio.

Acrescente essas informações no documento que gerará o parecer!

Avançando na prática

Rochas ígneas e metamórficas e sua utilidade na construção civil

Descrição da situação-problema

Você trabalha em uma empresa de pavimentação de rodovias que está envolvida na construção de uma estrada que ligará duas importantes cidades, antes conectadas apenas por estradas de chão, em uma região constituída por rochas ígneas e metamórficas. Para fazer essa obra, o pessoal do departamento de planejamento precisa de alguns materiais para desenvolver as camadas asfálticas. A exigência deles era que o material fosse resistente e durável e, para isso, orientaram que os materiais deveriam ter alto teor de sílica, pois esse parâmetro era um bom indicador de resistência do material. Além disso, os técnicos lhe orientaram que seria necessário realizar a fabricação de cimento para a obra, de forma que seria preciso pesquisar sobre a ocorrência de calcário na região, o que facilitaria a logística da produção. Como não havia bons mapas geológicos da região, você teve que começar a elaborar um cronograma para trabalho de campo, visando localizar possíveis locais para exploração desses recursos que lhe foram solicitados. No entanto, você teve algumas dúvidas: quais rochas ricas em teor de sílica devo prospectar para que nossa demanda por material resistente seja atendida? Qual rocha também pode ser fonte de cálcio caso não haja calcário na região?

Resolução da situação-problema

Para que você resolva esse novo desafio, lembre-se do que apresentamos aqui no livro didático. O seu primeiro desafio é encontrar rochas que possuam teor de sílica elevado, pois esse parâmetro também indica boa resistência do material a esforços mecânicos. Destacamos que, considerando as rochas ígneas, o teor de sílica também é um bom índice separador de rochas. Por isso, rochas provenientes de magmas ácidos, como o granito e o riólito, possuem mais de 66% em peso de sílica, já rochas oriundas de magmas intermediários, como o andesito

e o diorito, possuem entre 52% e 66% em peso de sílica. Logo, essas rochas podem lhe dar bons materiais, embora sejam necessários mais testes para avaliá-las. De qualquer forma, essa informação já é um bom instrumento prospectivo que deve ser levado em conta.

Sua outra dúvida refere-se à necessidade de encontrar outra rocha fonte de cálcio na região onde será construída a estrada. Como você anteviu, é possível que na região não haja rochas calcárias, afinal o metamorfismo pode ter causado sua transformação. Por isso, você teve de reordenar seu planejamento. Para isso, como vimos no livro didático, você deve ficar atento pois o calcário pode sofrer com fenômenos de intrusão ígnea (metamorfismo de contato), como também sofrer com a deformação regional (causada pelo metamorfismo regional). Assim, esse processo de transformação pode originar outra rocha, o mármore, que também se mantém como fonte de cálcio, pois sua composição química não é alterada durante o metamorfismo, apenas seus cristais são reorganizados.

Feito isso, você terá solucionado suas dúvidas e poderá seguir para campo para localizar as possíveis jazidas para obtenção do material e ajudar na construção da estrada.

Faça valer a pena

1. As rochas ígneas, plutônicas e vulcânicas são exemplos da consolidação de um conjunto de minerais que tiveram origem na fusão das rochas. A respeito desse grupo de rochas tão importantes, avalie as afirmações a seguir.

I – Magmas ácidos (graníticos) possuem um teor de sílica maior que 66%.

II – A olivina, um dos principais minerais constituintes das rochas ígneas básicas, é o último mineral a se cristalizar.

III – Os minerais quartzo, feldspato potássico e plagioclásio, muito comuns em rochas graníticas, são também conhecidos como minerais félsicos.

IV – Os minerais dos grupos das micas, anfibólios e piroxênios, presentes em muitas rochas graníticas, são também denominados de minerais félsicos.

Considerando as asserções acima, é correto apenas o que se afirma em:

- a) I e II, apenas.
- b) I apenas.
- c) II e IV, apenas.
- d) I e III, apenas.
- e) I e IV, apenas.

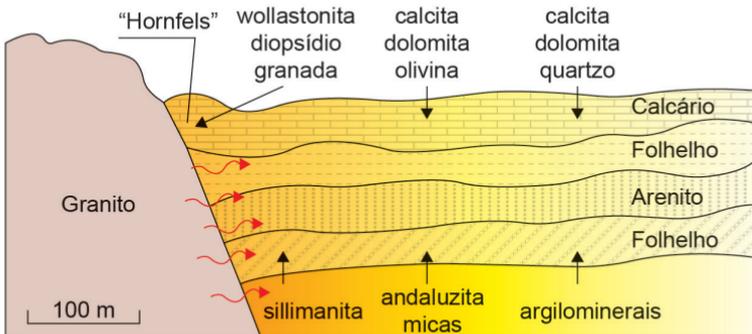
2. O granito e riólito são duas rochas distintas, porém com algumas particularidades em comum. Enquanto o granito é uma rocha _____, o riólito é uma rocha _____. Por isso, o granito possui uma textura _____, quanto ao grau de visibilidade dos minerais, ao passo que o riólito é _____. No entanto, ambos possuem como minerais principais, o _____, o _____, o _____ e a _____.

Considerando o texto acima, que trata sobre duas rochas ígneas de composição similar, analise os itens abaixo e assinale a única alternativa que completa as sentenças corretamente.

- a) vulcânica, plutônica, fanerítica, afanítica, quartzo, piroxênio, k-feldspato e olivina.
- b) plutônica, vulcânica, fanerítica, afanítica, quartzo, k-feldspato, albita e biotita.
- c) plutônica, vulcânica, afanítica, fanerítica, quartzo, k-feldspato, albita e biotita.
- d) vulcânica, plutônica, fanerítica, afanítica, quartzo, piroxênio, k-feldspato e albita.
- e) plutônica, vulcânica, fanerítica, afanítica, quartzo, k-feldspato, albita e olivina.

3. O metamorfismo de contato desenvolve-se nas rochas encaixantes ao redor de intrusões magmáticas, formando auréolas de metamorfismo de contato. As principais transformações metamórficas geradas nessas auréolas devem-se ao calor do magma, ocorrendo sem deformação acentuada (TEIXEIRA et al., 2003). Essa descrição representa a definição de metamorfismo de contato, que também aparece representado na Figura 2.7.

Figura 2.7 | Esquema representativo do metamorfismo de contato e minerais-índices



Fonte: Teixeira et al. (2003, p. 389).

Sobre os fatores que influenciam o metamorfismo de contato, assinale a afirmação correta.

- a) Granada e sillimanita são dois minerais-índices de metamorfismo de grau intermediário.
- b) O metamorfismo de contato é influenciado pela temperatura da intrusão, de forma que magmas ácidos são mais quentes que básicos.
- c) A magnitude da intrusão governa, indiretamente, outro fator importante, a duração de propagação do calor.
- d) A composição da rocha encaixante interfere na geração de novas rochas, neste caso arenitos e dolomitos são mais suscetíveis ao metamorfismo.
- e) A presença ou ausência de fluidos nas rochas pouco interfere no metamorfismo de contato.

Seção 2.2

Rochas sedimentares

Diálogo aberto

Caro aluno, antes de avançarmos para nossa próxima seção de estudo, vamos relembrar o que estudamos na seção anterior. Nela aprendemos sobre os fenômenos internos que governam a criação de rochas e minerais em contextos magmáticos e metamórficos, processos responsáveis pela origem das rochas ígneas e metamórficas. Nesta segunda seção, estudaremos os processos da dinâmica externa do planeta. Para isso, veremos primeiramente como os minerais e rochas consolidadas podem servir de fonte para os sedimentos, partículas naturais que são formadas por meio do intemperismo das rochas e posteriormente transportadas e depositadas em diferentes ambientes de sedimentação. Uma vez consolidados, esses sedimentos darão origem às rochas sedimentares e, por isso, também conheceremos quais são os componentes principais das rochas, sua classificação e diagênese. Por último, veremos brevemente como as bacias sedimentares se formam e quais são os principais tipos.

Para dar continuidade ao nosso processo de aprendizagem, vamos relembrar brevemente nosso contexto hipotético, apresentado no início da unidade. A empresa em que você trabalha executará a instalação de uma Usina Hidrelétrica (UHE). Para isso, nesse momento, você, que atua no departamento de projetos, está diretamente envolvido na supervisão da etapa de mapeamento geológico para a seleção dos locais de interesse para implantação da obra. Ao final, você dará um parecer definitivo sobre o local da implantação dessa UHE. Na Seção 2.1, você realizou a capacitação de alguns técnicos de campo para análise e diagnóstico das características fundamentais das rochas ígneas e metamórficas encontradas na região.

Dando sequência ao seu trabalho, imagine agora que a equipe de campo identificou que seria necessário realizar algumas sondagens, afinal, a região possuía poucos afloramentos rochosos e os principais pontos para observação das características das rochas estavam obstruídos pela densa vegetação e pelo difícil caminho de acesso.

Como a segunda etapa consistia no **estudo das rochas sedimentares diagnosticadas preliminarmente**, você resolveu destacar alguns aspectos principais para os técnicos da sua equipe de trabalho observarem, sendo eles: qual a composição principal das rochas sedimentares que existem nessa região? Existe alguma diferença de estabilidade físico-química entre essas rochas que poderia causar preocupação para o desenvolvimento do projeto? Considerando a característica geomorfológica da área, quais os principais processos sedimentológicos da região de estudo?

E agora, como você trataria dessas questões? Pare lhe ajudar, vamos ensinar que existem rochas sedimentares de diferentes naturezas, entre as principais as siliciclásticas e as bioquímicas (em alguns casos, puramente químicas). Além disso, veremos que a estabilidade mineralógica de algumas rochas está relacionada ao processo de intemperismo físico ou químico atuante e, por último, exploraremos os principais processos sedimentológicos, desde sua área fonte até a porção onde os sedimentos se depositam. Portanto, não perca tempo e comece logo sua leitura.

Bons estudos!

Não pode faltar

Diferentemente das rochas ígneas e metamórficas, as rochas sedimentares estão relacionadas à dinâmica externa da Terra, embora muitos sedimentos tenham origem de rochas endógenas. O estudo do ciclo sedimentar pode ser dividido em três processos principais: 1) **produção de sedimentos** (as partículas fundamentais da sedimentologia, a ciência que estuda os sedimentos); 2) as condições de **transporte dos sedimentos**; e 3) **depósito e acumulação das partículas** em seus locais de destino final. São esses três processos fundamentais que influenciarão, em grande parte, o modo de ocorrência e as características do produto final, as rochas sedimentares.

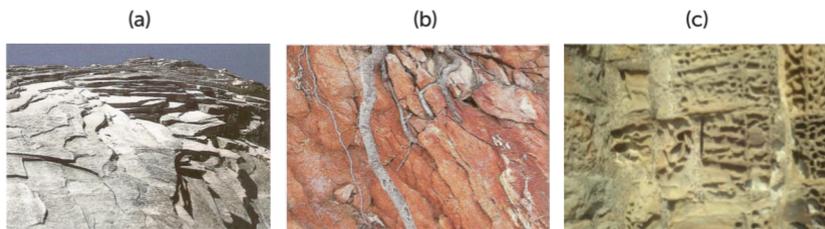
Portanto, a análise sedimentológica de qualquer partícula começa, na verdade, enquanto ela ainda se encontra dentro de um material parental, isto é, de uma rocha pré-existente. Assim que esta rocha se encontra exposta às condições atmosféricas, ela começa a deteriorar-se, ficando suscetível ao ataque dos agentes intempéricos (água, vento,

temperatura, ação biológica etc.). Definimos o **intemperismo** como um conjunto de modificações, tanto físicas quanto químicas, que as rochas sofrem ao aflorarem na superfície terrestre, causando seu enfraquecimento. Existem dois tipos fundamentais de intemperismo, o físico e o químico.

Os processos de intemperismo físico estão relacionados a todas as ações que deixam a rocha friável, ou seja, facilmente degradável, porém sem envolver alteração composicional, somente modificação do estado físico do material. Dentre os tipos de intemperismo físico, podemos citar alguns: 1) alívio de pressão: processo que ocorre quando grandes massas rochosas que estavam antes em profundidade e, portanto, sob alta pressão, são exumadas à superfície (baixa pressão atuante); ou quando uma rocha ou solo sobrejacente a uma rocha é erodido, deixando sob menor pressão que antes estava; 2) variação de temperatura (termoclastia): fenômeno que causa a expansão dos minerais em períodos quentes e contração dos minerais em intervalos frios, fato que leva a rocha a fraturar-se (Figura 2.8A); e 3) penetração de raízes: raízes de plantas forçam sua passagem pelas fraturas das rochas em busca de nutrientes, expandindo as aberturas já existentes ou causando a abertura de novas (Figura 2.8B).

Alternativamente, o intemperismo químico refere-se a uma série de reações químicas que os minerais aturam em virtude, principalmente, da percolação de água. Destacaremos duas reações: i) dissolução, que ocorre 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 (Figura 2.8C); e ii) hidrólise, reação que acontece quando a água enriquece-se com CO_2 dissolvido para formar o ácido carbônico, tornando a água ácida, quebrando a estrutura do mineral e liberando elementos que se recombina para formar os argilominerais (como a caulinita). Ambos processos são igualmente significativos nas áreas de engenharia e mineração, pois a dissolução de minerais pode causar o aparecimento de dolinas e cavernas, enquanto a hidrólise é um processo fundamental na origem de depósitos de argila, principalmente a caulinita, um argilomineral fonte de caulim, muito utilizado na indústria.

Figura 2.8 | Exemplos de intemperismo físico e químico: A) esfoliação de rocha granítica gerada pela termoclastia; B) penetração das raízes na rocha, enfraquecendo-a; e C) dissolução de rocha calcária por meio da percolação de água



Fonte: Press et al. (2006, p. 183)

Fonte: Press et al. (2006, p. 182).

Fonte: Wicander e Monroe (2009, p. 126); Press et al. (2006, p. 182)



Exemplificando

Para ter uma noção de como a termoclastia pode afetar estruturas e causar impacto nos projetos de engenharia, assista ao vídeo abaixo e reflita sobre o risco desse fenômeno.

CONDOREARTH.Twain Harte Dam Rock Stress Release 8/6/2014 5:00PM (Tradução livre: Liberação do esforço na rocha, Barragem Twain Harte às 17:00). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=DNdpqeJEPoY>>. Acesso em: 3 out. 2017.

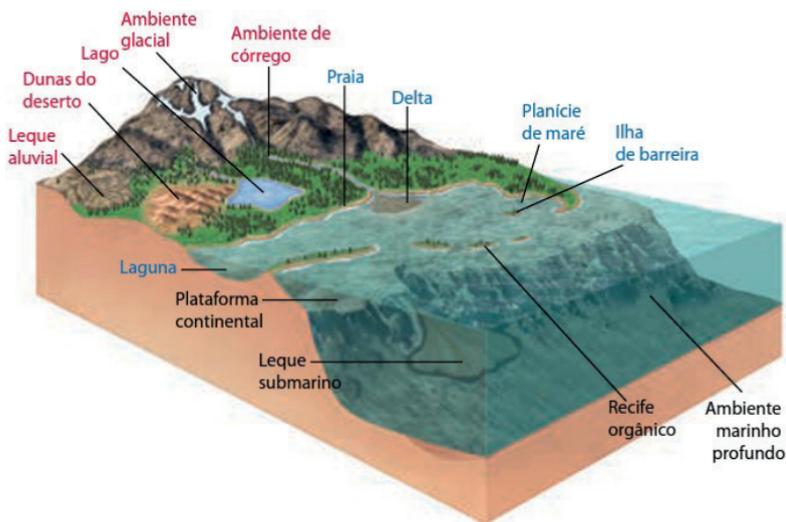
Uma vez enfraquecida a rocha, os materiais passam a ser remobilizados de seu local de origem, sofrendo **erosão**. Tão logo saem de seu sítio original, os sedimentos passam pelo segundo processo fundamental, o **transporte**. Esta etapa refere-se ao carregamento das partículas a maiores distâncias. Nesse caso, as partículas podem mover-se como uma unidade, como no caso de deslizamentos de rocha/solo, fluxos de lama (*mud-flow*), fluxo de detritos (*debris-flow*) ou como grãos soltos, como acontece com os grãos de areia na praia ou os sedimentos no rio. Nesse último caso, é possível perceber alguns tipos particulares de mecanismos de deslocamento dos sedimentos: i) os sedimentos finos (como argilas e silte) fluem em suspensão, sustentados pelo fluido; e ii) os sedimentos grosseiros (como areia e cascalho) deslocam-se por saltação, arrasto e rolamento.

Em ambos os casos, o transporte é cessado quando o fluido que movimenta os sedimentos não possui mais energia suficiente e as partículas decantam. Essa deposição depende, também, do diâmetro e

da densidade do sedimento. Partículas grandes e densas sedimentam antes das partículas pequenas e leves. Dessa forma, o cascalho – sedimentos grossos, com diâmetro entre 4 e 75 mm – deposita-se primeiro, enquanto a argila – sedimentos finos, com diâmetro menor que 0,0039 mm – só se assenta quando o fluido perde todo o seu vigor.

O acúmulo desses sedimentos ocorre em uma região geográfica que possui características físicas, químicas e biológicas bem definidas que os distinguem de outros ambientes. Nesses locais, conhecidos como ambientes de sedimentação (Figura 2.9), também depositam sedimentos na forma de íons ou fragmentos orgânicos rígidos, conhecidos conjuntamente como “sedimentos bioquímicos”. No caso dos íons, a sedimentação ocorre por meio de mudanças impostas nas condições ambientais (por exemplo, a evaporação da água de uma lagoa salina conduz à precipitação de halita), enquanto que os restos de partes orgânicas duras dos organismos se acumulam após a morte do animal, gerando um agregado de partículas.

Figura 2.9 | Ambientes de sedimentação mais comuns



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

Para entendermos melhor os distintos ambientes de sedimentação (Figura 2.9), vamos dividi-los em continental, transicional (costeiro) e marinho. No ambiente continental, dominam os ambientes de

sedimentação nos quais a ação da água e do vento é predominante. Neste caso, o ambiente fluvial é o principal responsável pelo transporte dos sedimentos, mas o balanço erosão/transporte/deposição é bastante complexo. Considerando apenas o processo deposicional, duas regiões do ambiente fluvial destacam-se: a) o canal fluvial, porção na qual os sedimentos mais grosseiros (areia e cascalho) ficam acumulados; e b) a planície de inundação, região externa ao canal que somente é atingida quando o nível de água extravasa a calha do rio e onde há uma intercalação de sedimentos finos e grosseiros.



Refleta

Pensando na dinâmica do ambiente fluvial, quais seriam os impactos dos fenômenos hidrológicos na deposição dos sedimentos para a construção civil e mineração de agregados?

Os leques aluviais, ou cones de dejeção, representam um ambiente formado por partículas de tamanhos variados – sendo, portanto, formado por sedimentos mal selecionados – e texturalmente imaturos, isto é, sofreram pouco transporte. Neste caso, é comum encontrar leques aluviais situados próximos à região do sopé de áreas montanhosas.

Já os lagos, que são corpos hídricos representantes dos ambientes lacustres, destacam-se, normalmente, pela sedimentação de partículas finas. No entanto, dependendo da configuração topográfica e hidrológica, essas regiões podem apresentar comunicação com outros corpos de água (por exemplo, mares e rios) que, por ventura, podem carregar sedimentos mais grosseiros para o lago. Igualmente importante é a influência que as condições climáticas podem ter no caso de ambiente áridos. Como nessas situações a taxa de evaporação de água é elevada, os sais acabam se acumulando em soluções hiperconcentradas, o que muitas vezes induz à precipitação de sedimentos químicos nesses lagos. Outros ambientes comuns em situações continentais são o deserto e o glacial, onde os principais agentes sedimentológicos são o vento e o gelo, respectivamente.

Passando para a região costeira, temos dois ambientes importantes. Os ambientes deltaicos, que são reconhecidos pela formação de um arranjo de canais distributários na foz dos rios, possuem como característica o avanço em direção ao mar. Já os ambientes estuarinos

possuem, em uma visão em planta, um formato em funil e, como nesta região a água do mar avança em direção ao continente (por causa da ação das correntes e da maré), há maior salinidade e também maior concentração dos sedimentos trazidos do mar. A principal diferença entre deltas e estuários está no fato de que os deltas entregam água e sedimentos provenientes do continente para o mar, enquanto os estuários fazem justamente o contrário, redistribuindo o sedimento marinho para porções continentais. Ainda na zona transicional, outro ambiente importante é a praia. Nessa porção, os sedimentos são retrabalhados e remobilizados pela ação das ondas, acabando depositados paralelamente à linha de costa e perpendicularmente à direção de atuação das ondas. Por causa da alta energia dessas ondas, há um predomínio de sedimentos arenosos, geralmente bem selecionados e arredondados (alta maturidade textural).

Adentrando no mar, reconhecemos o ambiente marinho que pode ser dividido em três tipos de acordo com a profundidade da lâmina de água e característica topográfica local. Assim, temos: 1) plataforma continental, que corresponde às partes submersas mais rasas e formada por suaves pendentes; 2) talude continental, que equivale à porção formada pela quebra abrupta do relevo submarino, geralmente situada em uma zona mais profunda; e 3) planície abissal, uma zona de topografia suave localizada em águas profundas a ultraprofundas. Na região da plataforma continental há um predomínio de sedimentos grosseiros e de depósitos carbonáticos (como recifes de corais), que se desenvolvem em virtude das boas condições de luminosidade e disponibilidade de nutrientes.

Porém, conforme avançamos em direção às partes mais profundas, os sedimentos mais finos vão perdendo gradualmente sua energia e, conseqüentemente, quanto mais profunda fica a lâmina de água, mais fino se torna o sedimento. Entretanto, durante eventos catastróficos (que possuem alta energia), como tempestades, os sedimentos grosseiros podem atingir até mesmo as zonas oceânicas mais profundas, formando leques submarinos. Além disso, muitos rios com alta vazão e forte fluxo de água também costumam levar sedimentos para zonas oceânicas profundas. Em alguns casos também, o transporte de sedimentos grosseiros para regiões profundas está relacionado à desestabilização do talude continental, fato que causa até mesmo o transporte de sedimentos em massa.

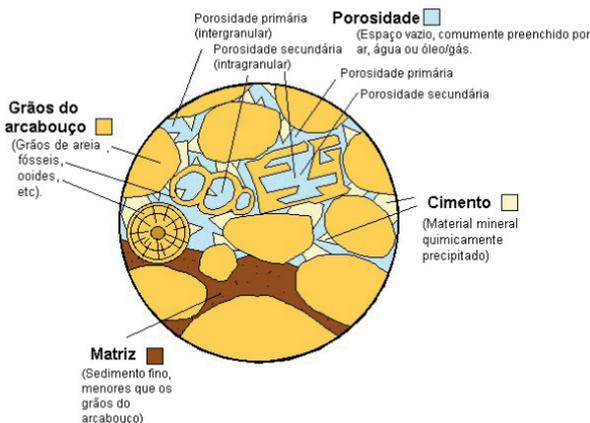


O estudo dos ambientes de sedimentação é algo bastante complexo, por isso, caso queira se aprofundar um pouco mais, sugerimos que você leia os capítulos 14, 15, 16 e 17 de Popp (2010).

POPP, José Henrique. **Geologia Geral**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. Disponível em: <<https://biblioteca-virtual.com>>. Acesso em: 6 out. 2017.

Uma vez acumulados nesses ambientes, no entanto, os sedimentos ainda se encontram inconsolidados, isso porque ainda não há nada que “ligue” uma partícula à outra. O processo responsável pela consolidação é denominado litificação, que compreende, basicamente, à compactação do sedimento e à cimentação dos constituintes. Assim, todas as rochas sedimentares possuem quatro componentes principais (Figura 2.10), alguns primários (gerados no momento da deposição das partículas) e outros secundários (formados pelo processo de litificação). Dentre os componentes primários (deposicionais), destacam-se os grãos do arcabouço (que se referem à fração granulométrica principal), matriz (material fino que ocorre entre os grãos do arcabouço) e os poros (espaço vazio entre os grãos e a matriz). Já entre os componentes secundários, citamos o cimento (solução cristalizada que liga os grãos do arcabouço e a matriz) e a porosidade secundária (formada pela dissolução química entre os minerais e o cimento).

Figura 2.10 | Principais elementos constituintes das rochas sedimentares



Fonte: <<http://www.gly.uga.edu/railsback/1121SedRockComps.jpeg>>. Acesso em: 7 out. 2017.

Com base nesses componentes, principalmente analisando a característica granulométrica dos grãos do arcabouço, as rochas sedimentares são classificadas de acordo com a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 | Representação da granulometria dos sedimentos e respectiva rocha sedimentar gerada a partir de sua consolidação.

Granulometria	Sedimento	Rocha Sedimentar
<256 mm	Matacão	Conglomerado
64-256mm	Calhau	
2-64mm	Seixo	
0,062-2mm	Areia	Arenito
0,0039-0,062 mm	Silte	Siltito
<0,0039 mm	Argila	Argilito Folhelho (apresenta planos de físsilidade paralelo)

Fonte: Press et al. (2006, p. 208).

Os conglomerados são formados, principalmente, em regiões próximas à área fonte dos sedimentos e estão relacionados a eventos de alta energia. Já o arenito se forma em condições mais diversas, como em desertos, rios e zonas litorâneas. Possuem como característica um maior retrabalhamento dos grãos e maturidade textural. Dentre os arenitos, importante destacar o quartzo arenito (ou arenito quartzoso), que é formado quase que exclusivamente por quartzo, decorrente do intenso intemperismo e transporte. Já o arenito feldspático (arcósio) é formado majoritariamente por quartzo, mas contém 25% de feldspatos e alguns fragmentos de rocha.

O siltito e o argilito são rochas características de zonas distais, isto é, de regiões muito longe de sua área fonte de sedimentos. Em algumas dessas rochas também é comum o aparecimento de minerais carbonáticos (ex. calcita) como cimento e, por causa da natureza fina a extremamente fina dos sedimentos e grau de energia do ambiente deposicional, é comum a ocorrência de matéria orgânica. É essa matéria orgânica que posteriormente dará origem ao gás, óleo ou carvão, assuntos que veremos posteriormente.

As rochas químicas e bioquímicas também podem ser classificadas pela sua granulometria, mas nesse caso é menos usual. Normalmente sua nomenclatura está relacionada à condição química do ambiente

deposicional e composição mineralógica principal. O calcário é formado principalmente pela calcita, o sílex é uma rocha formada puramente por minerais de sílica (opala, calcedônia e quartzo), ao passo que o dolomito é constituído fundamentalmente por dolomita e as rochas evaporíticas por sais, como no caso da halita, anidrita e gipsita.

Em todos esses casos, tanto as rochas siliciclásticas quanto as químicas e bioquímicas sofrem transformação após a sedimentação. Essa modificação ocorre em condições abaixo do limite do metamorfismo, ou seja, normalmente se processam abaixo dos **200°C** e sob baixas pressões, em profundidades normalmente menores que 10 a 9 km. A essa alteração que as rochas sofrem damos o nome de diagênese, processo que pode causar a dissolução, recristalização, cimentação e compactação dos componentes das rochas sedimentares. Assim, em decorrência desse fenômeno pós-deposicional, os sedimentos depositados inicialmente são alterados, tanto do ponto de vista mineralógico quanto textural. Quando nos referimos somente à litificação, estamos tratando do processo responsável pela consolidação dos sedimentos em rochas, o que ocorre em virtude da compactação e cimentação.



Assimile

A diagênese é um conjunto de processos superficiais e subsuperficiais, de natureza física e química, que atuam nos sedimentos, desde sua deposição até sua consolidação. A litificação, por sua vez, é normalmente restrita à compactação e cimentação, dois processos diagenéticos que causam o endurecimento dos sedimentos, transformando-os em rochas.

A consolidação final das rochas e formação de extensos pacotes de rochas sedimentares ocorrem nas denominadas bacias sedimentares. Essas áreas são depressões na crosta terrestre onde houve, ao longo de milhões de anos, acúmulo de sedimentos, mesmo que a intervalos não contínuos de sedimentação. O processo de desenvolvimento dessas bacias está vinculado, principalmente, à subsidência tectônica e soterramento dos sedimentos superpostos. A origem das bacias está relacionada com a Tectônica de Placas, de modo que a formação dessas depressões ocorre, geralmente, em

zonas divergentes onde, com o movimento de separação relativo entre as placas, regiões topograficamente mais baixas são criadas.

Nesse caso, há o desenvolvimento de duas fases de subsidência: 1ª) ocorre a subsidência mecânica, que começa a partir do estiramento da litosfera e a geração de blocos altos e baixos (os chamados *grabens* e *horsts*); 2ª) acontece a subsidência térmica, que se desenvolve após o estiramento e afinamento da litosfera, fato que causa um maior fluxo de calor em direção à superfície. Nessa situação, há ascensão de material magmático, o qual pode extravasar para a superfície terrestre. Com o tempo, tanto a litosfera quanto a astenosfera começam a esfriar, ganhando volume e aumentando sua densidade, causando um novo aprofundamento. Ainda existe um terceiro mecanismo de subsidência, relacionado à compensação isostática. Esse fenômeno é causado pela imposição de uma sobrecarga litosférica por meio da consolidação de cadeias de montanhas, por exemplo. Em virtude de sua maior densidade e volume, as montanhas arqueiam uma região próxima, fato que causa a formação de depressões na sua periferia. Naturalmente, a formação de bacias sedimentares está fundamentada nesses fenômenos que podem ocorrer de forma isolada ou conjuntamente, dependendo do contexto geológico-tectônico em que estão inseridos.

Em zonas divergentes, ocorre a formação de bacias do tipo rifte, como a Bacia do Recôncavo (Bahia, Brasil) e bacias oceânicas, caso da Zona intraoceânica do Oceano Atlântico. Em regiões de limites convergentes, ocorrem bacias do tipo Trás-Arco (*Backarc*), como o Mar do Japão, Bacias Ante-Arco (*Forearc*), como os Andes Centrais. Nos regimes transformantes é comum o aparecimento de bacias do tipo *pull-apart*, como é o caso do Mar Morto, no Oriente Médio. Por último, citamos o aparecimento de bacias sedimentares em regiões intraplaca, ou seja, aquelas que se desenvolvem ou estão atualmente encaixadas em porções de terra longe dos limites de placas. Essas bacias são as mais comuns do território brasileiro, destacando-se entre elas: a) Bacia do Paraná e Parnaíba como Bacias Intracratônicas (entre os crátons – zonas tectônicas estáveis há milhões/bilhões de anos); e b) Bacia de Campos, Santos e Espírito Santo como Bacias de Margem Passiva.

Sem medo de errar

Para que você se situe na resolução do seu desafio, vamos lembrá-lo brevemente. Para apresentar o seu parecer definitivo sobre o local de implantação da UHE, vocês estão supervisionando a etapa de mapeamento geológico de uma área de estudo, que está sendo desenvolvido em três etapas. Você já realizou a primeira etapa, agora deverá dar sequência ao projeto e resolver sua segunda tarefa. Nela, mencionamos que a equipe de campo identificou que seria necessário realizar algumas sondagens, pois haviam poucos afloramentos rochosos, os locais tinham uma densa vegetação e os caminhos eram de difícil acesso. Nesse momento, como essa etapa consistia no estudo das rochas sedimentares diagnosticadas preliminarmente, você resolveu destacar alguns aspectos principais para os técnicos de sua equipe de trabalho observarem, que são: qual a composição principal das rochas sedimentares que existem nessa região? Existe alguma diferença de estabilidade físico-química entre essas rochas que poderia causar preocupação para o desenvolvimento do projeto? Considerando a característica geomorfológica da área, quais os principais processos sedimentológicos da região de estudo?

Para que você consiga destacar esse primeiro ponto a ser observado pelos técnicos, você deve primeiro reconhecer as rochas sedimentares descritas na região. Lembre-se de que no documento inicial foi descrito que no local de estudo existiam, além de outras rochas já estudadas na seção anterior, arenitos, argilitos e calcários. Essas três rochas, apesar de corresponderem a rochas sedimentares, possuem uma natureza composicional bastante distinta. Como vimos no livro didático, os arenitos são rochas siliciclásticas compostas por sedimentos do tamanho areia. Aqui demos ênfase aos arenitos formados quase que exclusivamente por quartzo (quartzo arenitos), e o arenito feldspático (arcósio), que é formado majoritariamente por quartzo, mas contém 25% de feldspatos e alguns fragmentos de rocha. Sobre o argilito, vimos que ele é formado por partículas do tamanho argila, que correspondem mineralogicamente aos argilominerais. Com relação ao calcário, uma rocha (bio)química, aprendemos que ela é formada principalmente pela calcita.

Sobre a estabilidade das rochas, vimos que um dos fenômenos do intemperismo químico está relacionado à dissolução de alguns componentes mineralógicos por causa da ação de águas com baixo

pH. É o caso das rochas calcárias, que podem apresentar feições de dissolução e, portanto, causar preocupação no projeto de implantação da UHE em questão.

Finalmente, com relação ao terceiro questionamento, destacamos que a área de estudo se encontra em uma região montanhosa. Nesse local os fenômenos mais comuns estão ligados ao intemperismo, erosão e transporte dos sedimentos. A deposição não é um processo majoritário, visto que tende a ocorrer em depressões.

Solucionando esses pontos você terá destacado alguns aspectos importantes sobre as rochas sedimentares e, consequentemente, terá finalizado sua segunda tarefa, deixando-o mais apto para concluir seu parecer, que será finalizado na próxima seção.

Avançando na prática

Geologia sedimentar e o diagnóstico de riscos naturais

Descrição da situação-problema

Imagine que você atue como consultor técnico de uma grande empresa que possui a concessão de algumas rodovias no país. Uma das políticas da empresa é trabalhar com planos de prevenção de acidentes naturais. Sobre isso, você está agora encarregado de desenvolver ações para a implementação de um plano de prevenção de acidentes de um longo trecho de uma importante e movimentada rodovia. Só que para colocar as ações em prática, você deve primeiro realizar um diagnóstico da atual situação, correto? Pensando nisso, você resolveu separar o diagnóstico em diferentes áreas, como: a) diagnóstico da flora e fauna; b) diagnóstico do meio socioeconômico; e c) diagnóstico do meio físico/geológico. Sobre esse último item, você resolveu avaliar as condições das rochas e dos solos do trecho e teve algumas dúvidas: quais tipos de alteração (intemperismo) as rochas podem sofrer? Qual o impacto imediato dessa alteração? Quais tipos de movimentos as rochas, sedimentos e solos sofrem?

Resolução da situação-problema

Para ajudá-lo a guiar-se nesse novo projeto, lembre-se de todos os assuntos que apresentamos nesta seção e também utilize o seu raciocínio lógico. Primeiro, para que você resolva sua primeira dúvida, lembre os tipos de alterações que as rochas sofrem ao

serem expostas às condições atmosféricas. Nesse caso, destacamos que existe o intemperismo físico, que deixa a rocha friável, ou seja, facilmente degradável. Dentre esses, destacamos os processos de alívio de pressão, penetração de raízes e variação de temperatura, cada qual com características particulares. Mencionamos também o papel do intemperismo químico, causado principalmente pela percolação de água. Sobre isso, demos ênfase ao fenômeno de dissolução, que ocorre principalmente em rochas com minerais carbonáticos, e a hidrólise, que pode causar o desenvolvimento de argilominerais a partir de outros minerais presentes na rocha.

O impacto imediato dessa alteração é a desestabilização da rocha e a propensão dela em gerar sedimentos/partículas. As rochas quando friáveis e desestruturadas podem ser mobilizadas de seu local de origem e essa situação pode causar acidentes. O mesmo acontece com os sedimentos, que possuem uma natureza inconsolidada e, por causa disso, permitem um maior fluxo de água, um lubrificante natural, que causa a perda de atrito e desestabilização de encostas.

Concluindo, vimos que as partículas podem mover-se como uma unidade, como no caso de deslizamentos de rocha/solo, fluxos de lama (*mud-flow*), fluxo de detritos (*debris-flow*), ou como grãos soltos por meio dos mecanismos de suspensão, saltação, arrasto e rolamento.

Faça valer a pena

1. Os processos relacionados à dinâmica superficial da Terra são importantes fenômenos que atuam no enfraquecimento das rochas, geração de sedimentos e, até mesmo, na gênese do solo. Sobre isso, analise os itens a seguir e avalie as afirmações corretamente:

I – A produção de sedimentos, seu transporte, deposição e acúmulo são os processos principais do ciclo sedimentar.

II – O intemperismo representa uma série de modificações, tanto físicas quanto químicas, que as rochas sofrem quando submetidas às condições atmosféricas, fenômenos que causam seu enfraquecimento.

III – O alívio de pressão de rochas subjacentes, a tectoclastia e a penetração de raízes são exemplos de intemperismo químico.

IV – A hidrólise, como o próprio nome indica, é um fenômeno químico que causa a quebra dos minerais pela ação da água e leva, posteriormente, à sua dissolução, fato muito comum nas rochas carbonáticas.

Considerando as alternativas acima, é correto o que se diz apenas em:

- a) I.
- b) I e III.
- c) II e IV.
- d) I, II e IV.
- e) I e II.

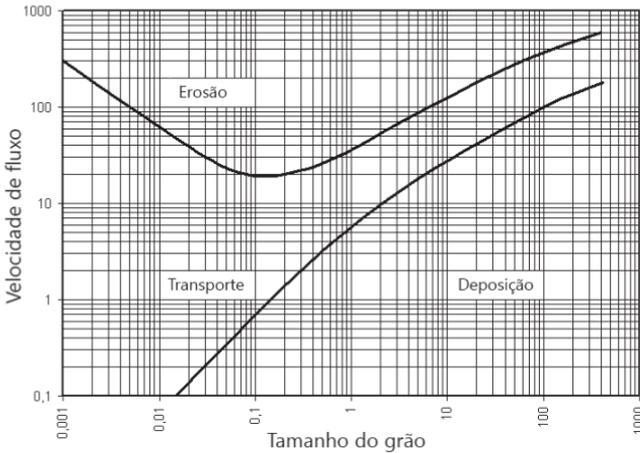
2. As rochas sedimentares são compostas por elementos _____ e _____. Dentre os _____ ou _____, temos os grãos do arcabouço, a _____ e os _____. Entre os _____ ou _____, destacamos a existência do _____ e dos _____, estes normalmente gerados durante a _____.

Considerando os principais componentes das rochas sedimentares, especialmente as rochas siliciclásticas, assinale a alternativa que complementa a frase corretamente.

- a) simples, compostos, simples, deposicionais, porosidade, minerais, compostos, diagenéticos, sedimento, poros secundários, deposição.
- b) simples, complexos, simples, pós-deposicionais, matriz, poros primários, complexos, pré-deposicionais, cimento, poros primários, morfogênese.
- c) primários, compostos, primários, pré-deposicionais, matriz, poros primários, compostos, deposicionais, mineral primário, secundário, metagênese.
- d) primários, secundários, primários, deposicionais, matriz, poros primários, secundários, pós-deposicionais, cimento, poros secundários, diagênese.
- e) primários, secundários, primários, pré-deposicionais, minerais, poros primários, secundários, deposicionais, cimento, poros secundários, diagênese.

3. A curva de Hjulström (Figura 2.11) foi concebida pelo pesquisador sueco Henning Filip Hjulström (1902-1982) e continua sendo muito utilizada para estudos sedimentológicos. Nesse gráfico, o pesquisador estabeleceu a relação entre a velocidade de fluxo de um fluido e o tamanho de partícula sedimentar, variáveis básicas que definem se um sedimento será erodido, transportado ou depositado.

Figura 2.11 | Gráfico de Hjulström, mostrando a relação entre velocidade do fluido e tamanho de grão



Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hjulstr%C3%B6m_curve#/media/File:Hjulstr%C3%B6ms_diagram_en.PNG>. Acesso em: 7 out. 2017.

Sobre a curva de Hjulström e a característica granulométrica dos sedimentos siliciclásticos, é possível afirmar:

- Os sedimentos do tamanho areia necessitam de velocidades de fluxo acima de 60 cm/s para serem erodidos.
- Os sedimentos do tamanho seixo necessitam de, no mínimo, fluidos com velocidade igual a 60 cm/s para serem erodidos.
- Os sedimentos do tamanho argila, por serem menores, necessitam de menor velocidade de fluxo para serem erodidas.
- Uma areia grossa (~2 mm), será depositada em velocidades de fluxo maiores que 10 cm/s.
- Qualquer partícula do tamanho silte será transportada quando o fluido tiver velocidade de 0,3 cm/s.

Seção 2.3

Tempo geológico e geologia estrutural

Diálogo aberto

Olá, aluno! Antes de começarmos o assunto desta seção, vamos relembrar brevemente o que já vimos nas seções anteriores.

Na primeira seção desta unidade, apresentamos as rochas do ciclo endógeno da Terra (ígneas e metamórficas), seus processos formativos e principais características. Na segunda seção, passamos a aprender sobre as rochas sedimentares, destacando desde a formação do sedimento até a consolidação deste em rochas. Agora, nesta última seção da unidade, aprenderemos alguns conceitos estratigráficos utilizados para interpretar a história geológica das rochas. Além disso, também veremos o que é geocronologia relativa e no que ela se baseia e também como funciona o cálculo da idade das rochas em termos absolutos (numérico). Por último, veremos algumas estruturas geológicas que deformam as rochas, alterando sua forma e posicionamento no registro geológico, e qual é a importância dessas estruturas para projetos de engenharia e mineração.

Ainda, antes de começarmos o assunto, vamos aproveitar esse espaço para lembrá-lo do desafio que foi lançado no início da unidade. Nele colocamos a situação em que você deverá apresentar um parecer definitivo, realizando o estudo de viabilidade de implantação de uma UHE, com base no mapeamento geológico. Para desenvolver esse trabalho, você decidiu dividir as tarefas em etapas, se recorda?

Primeiro, você descreveu as características das rochas ígneas e metamórficas que ocorrem na área de estudo. Depois, destacou alguns aspectos básicos do processo de formação dos sedimentos e também das rochas sedimentares da área. Agora, para finalizar o estudo e dar seu parecer definitivo, você deve **relatar as estruturas geológicas de importância para o projeto de implantação da UHE** que são observadas na área.

Imagine então que pela imagem de satélite e até mesmo nos trabalhos de campo, foram vistas algumas dobras anticlinais e falhas normais. Além disso, haviam outras descontinuidades nas rochas, principalmente na região de contato entre os granitos com os arenitos, argilitos e calcários. Para elaborar esta última etapa do serviço, referente às estruturas geológicas, você deve apresentar: quais são os parâmetros utilizados para identificar e diferenciar as dobras? Por que é necessário diagnosticar a existência de falhas na área de implantação da UHE? Como é o nome do contato entre as diferentes rochas e por que é importante considerá-las no seu serviço?

Lançados os questionamentos, agora o desafio é com você! Resolva essas dúvidas para que o trabalho seja concluído e você consiga dar seu parecer. A área é adequada para implantação da UHE? São necessários mais estudos?

Para ajudá-lo, vamos mostrar que as estruturas geológicas (principalmente as dobras, falhas e fraturas) possuem alguns elementos geométricos importantes e que são utilizados para sua identificação e diferenciação. Além disso, vamos abordar o que são falhas e qual a importância de diagnosticá-las em campo, pensando na implantação de estruturas e obras civis. Adicionalmente, veremos outros tipos de descontinuidades nas rochas relacionados a eventos erosionais ou não deposicionais e discutiremos brevemente sua implicação. Bons estudos!

Não pode faltar

Nas seções anteriores, estudamos sobre os três grupos de rochas: ígneas, metamórficas e sedimentares. Embora tenhamos aprendido bastante sobre suas principais características, ainda nos falta entender a relação espaço-temporal delas. Para isso que é dedicada a estratigrafia, ou seja, o estudo dos estratos rochosos e suas relações espaciais e temporais.



Assimile

A estratigrafia dedica-se ao estudo da gênese, da sucessão espaço-tempo, extensão areal e vertical das camadas de rochas de uma região, com o

objetivo de determinar os eventos, processos e os ambientes geológicos que levaram à formação das rochas.

A aplicação prática da estratigrafia é a sistematização, em unidades estratigráficas, das rochas, destacando sua abrangência tanto lateral quanto vertical. Dessa forma, é possível estabelecer correlações entre diferentes regiões com história geológica similar. Embora inicialmente proposta para entender as rochas sedimentares, a estratigrafia moderna dedica-se ao conjunto completo da obra, ou seja, engloba também as rochas ígneas e metamórficas.

A base para o entendimento da estratigrafia está apoiada em uma série de conceitos estratigráficos, desenvolvidos a partir do século XVII. O mentor dos conceitos foi Nicolas Steno (1638-1686), que difundiu os primeiros três princípios básicos da estratigrafia: 1) **Princípio da Superposição de Camadas**, que estabelece que em qualquer sucessão de estratos (rochas) sedimentares, desde que não perturbadas tectonicamente, a rocha mais antiga está situada abaixo das rochas sucessivamente mais novas, as quais estão localizadas acima (Figura 2.12A); 2) **Princípio da Horizontalidade Original**, difunde a ideia de que, como os sedimentos transportados se assentam por gravidade, a maior parte das camadas são horizontais. Assim, uma sequência de rochas inclinadas deveria ter sofrido algum evento tectônico que causou seu basculamento (Figura 2.12B); 3) **Princípio da Continuidade Lateral**, que menciona que toda camada de sedimento se distribuiu lateralmente em todas as direções até afinar-se em direção à margem da bacia deposicional (Figura 2.12C).

Figura 2.12 | Princípios estratigráficos estabelecidos por Steno (1638-1686): A) Princípio da Superposição de Camadas; B) Princípio da Horizontalidade Original; e C) Princípio da Continuidade Lateral.

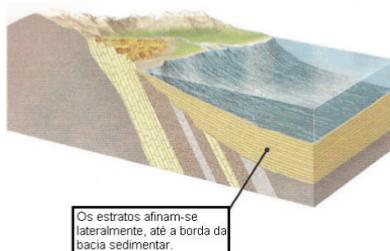


(b)



Fonte: Soares (2015, p. 109).

(c)



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

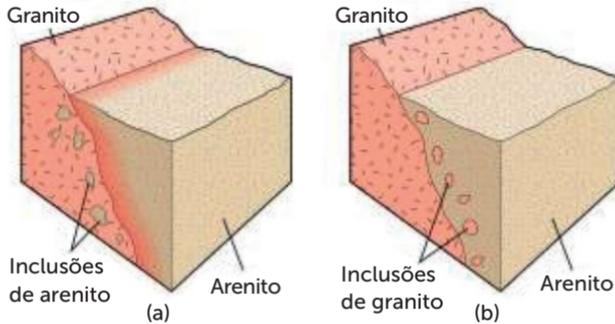
Mais tarde, no século XVIII, outros princípios estratigráficos foram introduzidos por James Hutton (1726-1797) e William Smith (1769-1839): a) **Princípio das Relações Transversais** (também conhecido como **Relações de Corte ou Intersecção**), que postula que uma rocha ígnea intrusiva que corta outra rocha (ou camada de rochas) deve ser mais nova que a camada que está sendo cortada (o conceito também é válido para o caso de falhas geológicas); b) **Princípio das Inclusões**, que estabelece que uma rocha que contenha fragmentos de outra rocha deve ser mais jovem do que a rocha que deu origem a estes fragmentos; e c) **Princípio da Sucessão Faunística** (ou **Sucessão Fossilífera**), que fundamenta que um conjunto de fósseis se sucedem no tempo, um após o outro, em ordem regular e previsível (WICANDER; MONROE, 2009).



Exemplificando

Utilizando o Princípio das Inclusões, vamos interpretar a Figura 2.13 e analisar a diferença de ambas as situações. Na Figura 2.13A, o arenito aparece como rocha inclusa no granito. Sendo assim, o arenito já existia antes da origem do granito. Além disso, a imagem mostra que o granito acabou alterando a zona de contato com o arenito (região em vermelho no contato entre as rochas), o que demonstra que o granito estava em alta temperatura. Já a Figura 2.13B mostra inclusões de granito no arenito, demonstrando que o granito é posterior ao arenito. Nesse caso, não há alteração por causa da intrusão do granito, que já estava consolidado quando o arenito surgiu.

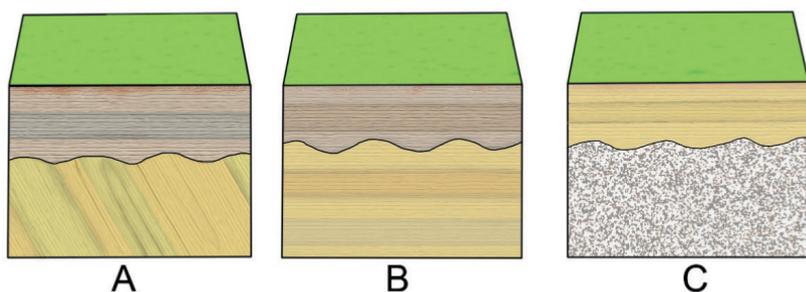
Figura 2.13 | Princípio das Inclusões mostrando a relação entre um granito e um arenito



Fonte: Wicander e Monroe (2009, p. 394).

Esses princípios são aplicados em intervalos de rocha onde não há nenhuma lacuna deposicional, isto é, a formação delas aconteceu continuamente no tempo. No entanto, alguns planos que dividem as rochas podem representar um hiato de milhões de anos! A esses planos de descontinuidade temporal damos o nome de **discordâncias**, que são superfícies de não deposição ou erosão que separam os estratos mais novos dos mais antigos. Logo, essas superfícies representam uma quebra no registro geológico. Existem três tipos básicos de discordâncias identificados nas rochas: I) **Desconformidade** – que é uma superfície de erosão ou não deposição paralela à divisão entre rochas mais antigas e mais novas. No caso de superfícies erosionais, o limite é, muitas vezes, bem marcado e irregular (Figura 2.14B); II) **Discordância angular** – representa uma superfície erosional que corta rochas inclinadas ou dobradas sobre as quais foram depositadas rochas mais jovens e em ângulos diferentes das rochas abaixo (Figura 2.14A); e III) **Não conformidade**, que se configura como uma superfície erosional que separa rochas ígneas/metamórficas das rochas sedimentares logo acima (Figura 2.14C). Essas **discordâncias**, do ponto de vista mecânico e hidrodinâmico, também podem se comportar como fraturas, causando as mesmas preocupações que as falhas, dobras e fraturas podem condicionar nas estruturas, como descrito a seguir no texto.

Figura 2.14 | Principais tipos de discordâncias: A) discordância angular; B) desconformidade; e C) não conformidade



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a2/Block_diagrams_stratigraphic_relations.jpg>. Acesso em: 12 out. 2017.



Pesquise mais

Caso tenha ficado com dúvidas sobre o processo de formação das discontinuidades, sugerimos a leitura das páginas 394 a 398 do Capítulo 17 de Wicander e Monroe (2009).

WICANDER, R.; MONROE, J. S. **Fundamentos de Geologia**. Tradução H. O. Avritcher; revisão técnica M. A. Carneiro. São Paulo: Cengage Learning Edições, 2009. Disponível em: <<https://biblioteca-virtual.com>>. Acesso em: 12 out. 2017.

Esses princípios mencionados anteriormente são fundamentais para a datação de eventos geológicos. É com base neles que conseguimos ter uma estimativa da idade das rochas, de eventos tectônicos, magmáticos e metamórficos, entre outros, o que nos permite estabelecer um contexto cronológico de acontecimentos naturais. Nesses casos de datação relativa, os fósseis são imprescindíveis. Se aprofundando ainda mais no princípio da sucessão faunística, é importante destacar que Smith também percebeu que as mesmas sucessões de rochas sedimentares afloravam em distintas regiões e que cada camada de rocha continha determinados fósseis (SOARES, 2015). Além disso, também notou que os fósseis ocorriam em uma ordem específica, sendo os mais antigos posicionados nas camadas de baixo. A partir disso, ele também estabeleceu o princípio da **Correlação Fóssil**, demonstrando que rochas com conteúdo fossilífero similar podiam ser correlacionadas geograficamente.

Para se fazer uma boa correlação fóssil, no entanto, é importante

que o fóssil possua um curto intervalo de existência (surgiu e se extinguiu rapidamente), uma grande abrangência geográfica, sejam facilmente identificáveis, possuam alta taxa de dispersão e sejam abundantes. Dessa maneira, esses fósseis, denominados de fósseis-guia, podem ser utilizados para a correlação de camadas de rochas. Além dos fósseis, é comum a utilização de camadas-guia para datar os eventos. Essas camadas são caracteristicamente distinguíveis de outras, fato que as tornam excelentes ferramentas de datação relativa. Como exemplos, podemos citar camadas de carvão e de cinzas vulcânicas.

Embora a datação relativa possa até dar uma boa estimativa temporal, ela não é tão precisa em algumas aplicações (datação de eventos deposicionais curtos) ou em alguns tipos de rochas (como nas metamórficas e ígneas). Por isso, é comum também empregar métodos de datação absoluta, ou seja, em termos numéricos. Isso é possível por meio da utilização de isótopos instáveis (como os elementos radioativos urânio, tório e chumbo), que estão presentes em alguns minerais, como a apatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{OH},\text{Cl})$) e o zircão (ZrSiO_4), que é muito resistente a temperaturas elevadas e contém U em quantidade suficiente para ser utilizada no processo de datação.

Para o cálculo da idade, nós nos baseamos no fenômeno de decaimento radioativo, que é um processo no qual um núcleo instável de algum elemento químico (elemento-pai) decai espontaneamente, após certo período de tempo, para um novo elemento que possua um núcleo atômico estável (elemento-filho). O tempo nesse caso é estimado em meias-vidas, que representam o tempo necessário para que metade da quantidade original de átomos instáveis presentes no elemento-pai se transforme em átomos estáveis do elemento-filho (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 | Alguns dos principais isótopos utilizados em Geologia para datação absoluta das rochas

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

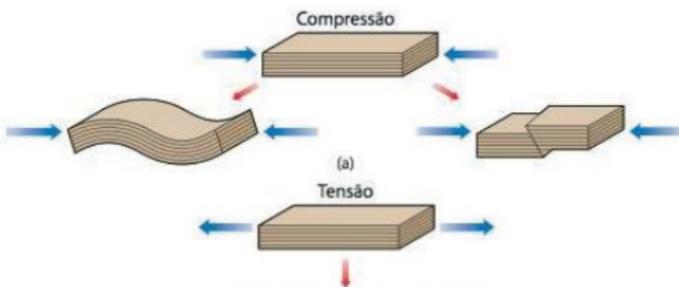
Urânio 235 (^{235}U)	Chumbo 207 (^{207}Pb)	0,704
---------------------------------	----------------------------------	-------

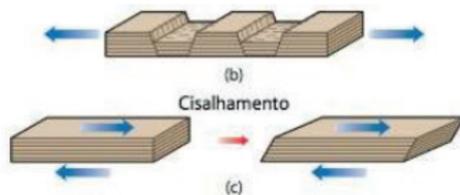
Fonte: adaptada de Teixeira et al. (2003, p. 322).

Importante destacar que esses elementos químicos estão contidos nos minerais, como se fossem “impurezas” do tempo de formação. Logo quando mencionamos a idade da rocha, estamos nos referindo à época em que o elemento-filho ficou aprisionado no sistema, isto é, no momento do resfriamento da rocha. A temperatura que define a interrupção do fenômeno de decaimento radioativo é denominada temperatura de bloqueio, a qual é específica para cada mineral. No caso dos minerais mencionados acima, a apatita possui temperatura de bloqueio entre 450 e 500 graus Celsius, enquanto que o zircão é superior a 1.000°C . Outro elemento usado para datação é o carbono 14 (^{14}C) – decai para o nitrogênio 14 (^{14}N) –, que é aplicado para datação de eventos mais recentes (< 70 mil anos) e em diferentes materiais, como madeira, conchas marinhas, água subterrânea, gelo etc.

Embora estimar a idades dos eventos geológicos possa parecer suficiente para contar a história geológica de uma região, é necessário considerar as transformações que as rochas sofrem. Neste caso, as rochas são deformadas, principalmente, por ações resultantes do tectonismo. De um modo geral, a pressão impressa às rochas pode se manifestar de três formas principais: a) compressão das rochas, quando as rochas se encurtam na direção do esforço aplicado; b) tensão (extensão), quando as rochas tendem a estirar-se paralelamente à direção do esforço; e c) cisalhamento, quando as forças agem paralelamente sobre as rochas, mas em direções opostas e em faces distintas (Figura 2.15).

Figura 2.15 | Tipos de esforços atuantes nas rochas



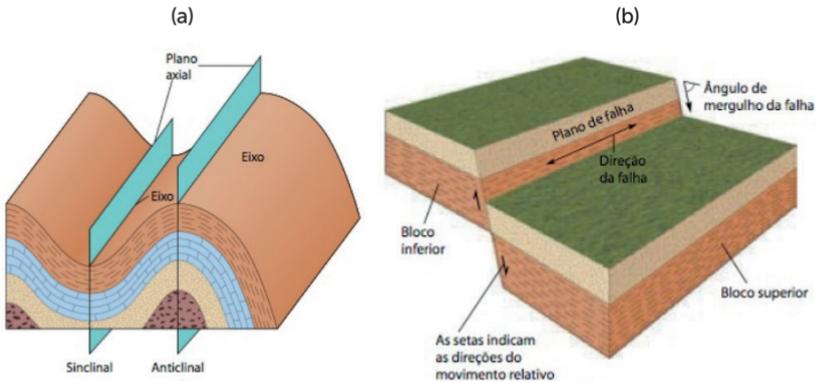


Fonte: Wicander e Monroe (2009, p. 216).

No entanto, o comportamento reológico das rochas, isto é, se elas se romperão ou apenas se deformarão, é influenciado, fundamentalmente, pela temperatura e pressão a que estão submetidas. Rochas situadas em porções mais profundas da crosta – maior pressão e temperatura – possuem um comportamento mais plástico (dúctil), logo formam dobras. Rochas que estão mais próximas à superfície terrestre – menor pressão e temperatura – possuem um comportamento mais frágil (rúptil), e com isso formam falhas ou fraturas. As falhas diferenciam-se das fraturas pois, ao contrário destas, nas falhas há um movimento relativo dos dois lados do plano de rompimento da rocha.

As dobras são estruturas geológicas cujas camadas, que originalmente encontravam-se horizontalizadas, apresentam-se inclinadas (envergadas ou basculadas). Dentre os estilos mais comuns de dobras estão as anticlinais e as sinclinais. As dobras anticlinais estão organizadas de tal forma que as rochas mais antigas estão situadas em seu núcleo, enquanto que nas sinclinais ocorre justamente o contrário. Assim, quando analisamos as rochas em perfil (como em um corte de estrada), as sinclinais mostram estratos com o lado côncavo para cima, enquanto que em anticlinais os estratos estão dispostos com o lado convexo voltado para cima. Em ambos os casos, as dobras possuem como elementos geométricos comuns o plano axial, o eixo (também conhecido como linha de charneira) e os flancos – identificados pela direção de mergulho das rochas (Figura 2.16A). Esses três parâmetros são utilizados em geologia estrutural para diagnosticar a existência de dobras e distinguir seus diferentes tipos.

Figura 2.16 | Estilos de estruturas geológicas e seus elementos geométricos principais: A) dobra e B) falha



Fonte: adaptada de Wicander e Monroe (2009, p. 220).

Fonte: Wicander e Monroe (2009, p. 225).

As falhas, por sua vez, representam o rompimento das rochas no qual, ao longo de um plano, os blocos rochosos se movimentaram (Figura 2.16B). Esse movimento dos blocos pode ser ortogonal à direção do plano de ruptura ou oblíquo a ele. Assim como nas dobras, as falhas também possuem elementos geométricos distintivos. O **plano de falha** é a superfície, reta ou curva, que simboliza a região de ruptura da rocha. Esse plano possui uma direção espacial, que é a direção geográfica da falha (medido em azimuth) e também um mergulho (de 0 a 90°).

Além disso, os blocos possuem nomenclatura específica: o bloco superior (que se sobrepõe ao plano de falha) recebe no nome de **capa** (ou **teto**), enquanto o bloco inferior (que está sob o plano de falha) é denominado de **lapa** (ou **muro**). Quando a capa se desloca sobre a lapa, estamos diante de uma falha inversa, geralmente resultado de forças compressivas. Já quando a capa desliza sobre a lapa, dizemos que a falha é normal, o que geralmente acontece por causa de esforços tensionais.



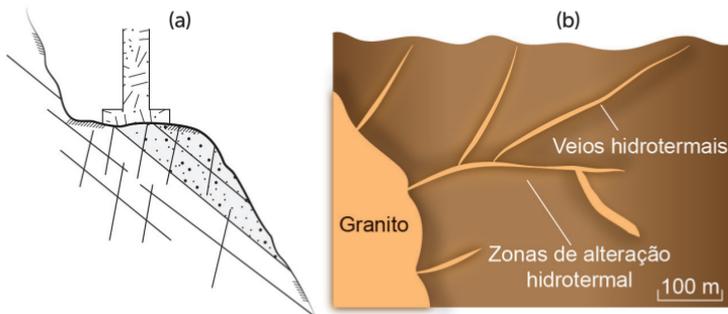
Refleta

Quais outros tipos de dobras e falhas podem existir considerando a disposição dos principais elementos geométricos de cada estrutura geológica?

Estudar e analisar essas estruturas geológicas não é apenas importante do ponto de vista científico. Para que projetos de engenharia e mineração tenham sucesso, é imprescindível que compreendamos como as dobras, falhas e fraturas podem afetar e até comprometer o desenvolvimento de uma mina, a estabilidade de um talude, a segurança de uma barragem e assim por diante. Do ponto de vista da resistência mecânica, falhas, fraturas e dobras são estruturas geológicas que apresentam pouca resistência à compressão e cisalhamento se houver sobrecarga sobre elas. Além disso, as falhas e fraturas são estruturas condutoras, ou seja, elas favorecem o escoamento de fluidos de forma relativamente rápida. Ademais, a água que se infiltra pode lubrificar os planos de falha ou fratura e diminuir ainda mais a resistência da rocha, podendo causar o movimento (escorregamento) de toda a massa de rocha e solo – e conseqüentemente qualquer outra construção – que esteja acima.

Em projetos de túneis, mineração a céu aberto e subterrânea, a orientação dos planos de falha/fratura, além do seu mergulho e continuidade, é um dos principais parâmetros para garantir a estabilidade das escavações, já que essas estruturas rúpteis tendem a fragmentar a rocha e desestabilizar determinada zona próxima à falha/fratura (Figura 2.17A). Por isso, é importante também mapear a extensão dessas estruturas para que sejam feitas adequações nos projetos. As falhas e dobras podem também influenciar o planejamento do desenvolvimento exploratório de uma jazida. Por exemplo, muitos depósitos de ouro (Au) e minerais de minério associados concentram-se no material de preenchimento de falhas/fraturas (Figura 2.17B). Com isso, o corpo do minério a ser explotado (filão) segue a orientação dessas estruturas. Dessa forma, muitas minas são planejadas seguindo a direção dessas estruturas e todas as etapas do desenvolvimento da lava são levadas em conta tomando-se essa prerrogativa.

Figura 2.17 | Relação das falhas com estruturas civis (A) e com depósitos minerais (B)



Fonte: Geologia de engenharia (2017, p. 3).

Fonte: elaborada pelo autor.

Além disso, as falhas/fraturas também podem formar reservatórios subterrâneos de água, os denominados aquíferos fraturados. Nessas situações, a água, que se concentra nas descontinuidades da rocha, pode comprometer o desenvolvimento de escavações subterrâneas em casos de obras civis e mineração, mas, em contrapartida, constituem fonte de água para regiões não abastecidas por rede pública. Nessas circunstâncias, a perfuração de poços tubulares profundos pode ser útil para sua extração. Em alguns casos de mineração, esses poços também são utilizados para condicionar o fluxo da água subterrâneas nas fraturas, removendo a água que poderia acumular nas regiões onde a lavra se desenvolverá.

Sem medo de errar

Vamos, antes de apresentar a solução para os questionamentos lançados no início da seção, lembrar brevemente o contexto no qual eles estão inseridos. Dessa forma, você conseguirá concluir a sua tarefa, que é o desafio desta unidade.

Lembre-se de que no início da unidade foi proposta uma situação em que você deveria apresentar um parecer definitivo, realizando o estudo de viabilidade de implantação de uma UHE, com base no mapeamento geológico e, para isso, decidiu dividir esse serviço em etapas. Como as duas outras etapas já foram realizadas, resta agora sua última tarefa. Nela você deve relatar as estruturas geológicas de importância para o projeto de implantação da UHE que são observadas na área. Pensando nisso, imaginamos uma situação em que, pela imagem de satélite e até mesmo nos trabalhos de campo, foram vistas algumas dobras anticlinais e falhas normais. Além disso, haviam outras descontinuidades nas rochas, principalmente na região de contato entre os granitos com os arenitos, argilitos e calcários. Para elaborar esta última etapa, você deve responder:

Quais são os parâmetros utilizados para identificar e diferenciar as dobras? Por que é necessário diagnosticar a existência de falhas na área de implantação da UHE? Como é o nome do contato erosivo formado entre as rochas ígneas/metamórficas e sedimentares e por que é importante considerá-las no seu serviço?

Para responder ao seu primeiro questionamento, lembre-se de que dobras são deformações nas rochas por meio de esforços que causam

o envergamento (basculamento) das camadas de rochas. Por isso, os estratos que antes encontravam-se na horizontal aparecem inclinados. Como muitas vezes temos um acesso restrito às estruturas das rochas, é importante aprendermos quais os principais parâmetros utilizados para descrevê-las. Assim, estudamos que as dobras possuem um plano axial (que é o plano ortogonal à linha de maior envergadura da dobra), um eixo (também conhecido como linha de charneira), que representa a zona de união dos pontos de maior envergadura da dobra e os flancos, que representam os dois lados da dobra e são identificados pela direção de mergulho das rochas. Esses parâmetros encontram-se representados na Figura 2.16A. Ressalta-se ainda que, para identificar dobras anticlinais das sinclinais, é imprescindível saber as idades das rochas, visto que nas anticlinais as rochas mais antigas se encontram no seu núcleo, enquanto que nas sinclinais ocorre o oposto.

Sobre a segunda pergunta, vimos que as falhas são zonas onde a rocha se encontra enfraquecida, ou seja, sua resistência mecânica é mais baixa. Assim, quando submetidas a esforços compressivos e cisalhantes, elas podem causar o rompimento da rocha e o colapso de estruturas. Complementarmente, aprendemos que as falhas são estruturas condutoras de fluidos, já que elas representam fissuras nas rochas. Dessa forma, a água que acumula nos planos de falha pode causar sua lubrificação, diminuindo o atrito entre as rochas e conseqüentemente diminuindo ainda mais a resistência a sobrecargas.

Com relação ao último questionamento, estudamos nos conceitos estratigráficos que o nome dado à superfície erosional de contato entre rochas ígneas/metamórficas e rochas sedimentares é denominado de não conformidade. Como destacamos no livro, essas superfícies podem apresentar, em determinadas situações, um comportamento mecânico e hidrodinâmico similar ao que acontece principalmente nas falhas e fraturas. Por isso, é importante considerar a existência delas no seu estudo.

Respondendo a essas perguntas e tirando suas dúvidas, você terá todas as bases necessárias para concluir o seu parecer e entregá-lo a seu superior. Assim, o projeto seguirá adiante e poderá ser implementado de forma segura e duradoura. Para concluir esse seu objetivo da segunda unidade, lembre-se de que primeiro você estudou de que forma era feito o reconhecimento das principais características das rochas ígneas e metamórficas que ocorrem na área

de estudo. No segundo passo, você descreveu qual a composição das rochas sedimentares identificadas na área e até identificou algumas condicionantes do intemperismo que acontece na região. Nesta última etapa, você identificou quais as estruturas geológicas existentes e por que é importante considerá-las na etapa de planejamento para a implantação de uma grande estrutura civil, a Usina Hidrelétrica.

Assim, considerando o que foi apresentado no estudo, você pôde perceber que há algumas características geológicas capazes de gerar riscos, como a presença de falhas, dobras e fraturas nas rochas, e por esse motivo é necessária uma adaptação do projeto para contemplar a contenção de encostas e obstrução de possíveis zonas condutoras de água. Portanto, apesar de o local poder abrigar a instalação da UHE, é importante que esses fatores sejam considerados.

Avançando na prática

Estruturando uma mina a céu aberto

Descrição da situação-problema

Imagine-se em uma nova situação: você trabalha no setor de desenvolvimento de lavra de uma empresa de mineração que opera algumas minas subterrâneas. No entanto, após a descoberta de uma nova jazida mineral de cobre, ouro e molibdênio do tipo pórfiro cuprífero, a empresa implantará sua primeira mina a céu aberto.

Considerando que os estudos preliminares demonstraram que a área possuiu muitas estruturas geológicas, especialmente falhas e fraturas, e que o estilo da lavra exigirá a implementação de bancadas, com taludes de até meia dezena de altura, vocês decidiram fazer algumas reuniões para a definição de algumas prioridades do projeto. Na primeira reunião da equipe, o diretor da área operacional, que estava no encontro, fez algumas perguntas, como: *por que devemos nos preocupar com as zonas de falha/fratura para a implementação das bancadas? Quais parâmetros das rochas fraturadas são importantes de serem analisados? Existe algum outro problema que podemos enfrentar conforme avançamos em profundidade com a mina?*

Resolução da situação-problema

Para que você consiga explicar ao diretor operacional os

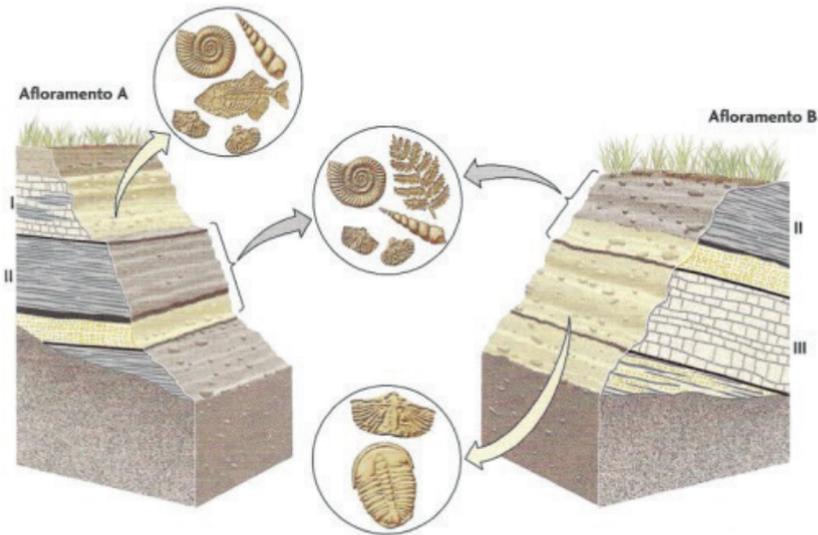
questionamentos feitos, você deve se lembrar do que foi explicado no livro didático, especialmente quando nos dedicamos a entender melhor sobre as estruturas geológicas, como dobras, falhas e fraturas. Se você se recordar, destacamos que as falhas e fraturas, que são as estruturas descritas para a área onde será implementada a mineração a céu aberto que você ajudará a desenvolver, apresentam pouca resistência à compressão e cisalhamento se houver sobrecarga sobre elas. Como se não bastasse, essas estruturas são boas condutoras de fluidos, o que dificulta ainda mais sua estabilidade, afinal a água reduz o atrito e lubrifica o contato entre as rochas. Assim, você terá respondido o primeiro questionamento do seu diretor.

Com relação à sua segunda pergunta, é preciso destacar que, conforme estudamos aqui, há alguns parâmetros que devem ser cuidadosamente analisados. Dentre eles, podemos destacar a orientação dos planos de fratura, ou seja, em que direção geográfica o plano está inclinado. Feito isso, é fundamental diagnosticar o seu mergulho. Por exemplo, fraturas com altos ângulos e que mergulham em direção à face do talude, como ilustra a Figura 2.17A, podem representar um risco à segurança da operação. Por último, é fundamental considerarmos que, com o avanço da mina em profundidade, estaremos propícios a atingirmos as zonas de aquíferos, já que as fraturas conduzem água para esses reservatórios subterrâneos. Portanto, deve-se levar em conta que para o desenvolvimento da mina, a água que infiltra nas fraturas deverá ser direcionada para porções externas, facilitando os trabalhos.

Faça valer a pena

1. Os princípios estratigráficos são importantíssimos para a interpretação correta de eventos geológicos, posicionamento no espaço e no tempo dos acontecimentos, correlação entre camadas de rochas que aparecem geograficamente descontínuas, entre outras aplicações. Essas informações, além de serem importantes para elaboração de mapas e modelos geológicos, são fundamentais para estudos prospectivos de minerais e outros recursos naturais. A Figura 2.18 exemplifica um dos princípios estratigráficos.

Figura 2.18 | Desenho ilustrando a ocorrência de um mesmo conjunto de fósseis em dois afloramentos



Fonte: adaptada de Press et al. (2006, p. 252).

Analise a imagem e assinale a alternativa que corresponda ao conceito mencionado.

- a) Princípio das inclusões.
- b) Princípio da continuidade lateral.
- c) Princípio das relações transversais.
- d) Correlação fóssil.
- e) Princípio da sucessão faunística (ou sucessão fossilífera).

2. A datação de eventos geológicos é uma das etapas mais fundamentais para a confecção de um bom mapa geológico. Sobre esse assunto, analise as alternativas abaixo e julgue quais são verdadeiras:

I – As discordâncias são superfícies de não deposição ou erosão que separam os estratos mais novos dos mais antigos, sendo que ambos podem conter um hiato temporal de milhões de anos.

II – Tanto os fósseis-guia quanto as rochas-guia podem ser utilizados para datação absoluta de eventos geológicos.

III – Dentre os elementos radioativos principais utilizados para datação absoluta das rochas estão o urânio, tório e chumbo, que estão contidos em alguns minerais, como a apatita e o zircão.

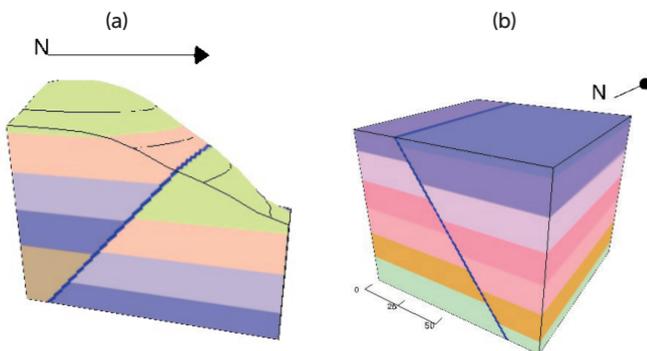
IV – A temperatura de bloqueio dos minerais define o limite máximo de temperatura em que o decaimento radioativo ainda se processa.

Considerando as asserções acima, assinale a alternativa verdadeira.

- a) I e II, apenas.
- b) I e III, apenas.
- c) I e IV, apenas.
- d) I, II e IV, apenas.
- e) II e IV, apenas.

3. A Figura 2.19 ilustra, esquematicamente, o desenvolvimento de dois tipos de falhas geológicas, geradas em regimes tectônicos distintos. Em um dos casos, forças compressivas fizeram com que as rochas se rompessem e, em outro caso, forças tensionais foram responsáveis pela ruptura das rochas. Além disso, os elementos geométricos de cada estrutura e a geologia também são distintos.

Figura 2.19 | Dois exemplos de falhas geológicas distintas



Fonte: elaborada pelo autor.

Considerando a Figura 2.19 e os conceitos de geologia estrutural, assinale a alternativa correta.

- a) Em A é exemplificado o desenvolvimento de uma falha normal.
- b) Em B a capa deslocou-se sobre a lapa, configurando uma falha inversa.
- c) A orientação do plano de falha em A é aproximadamente Leste-Oeste e em B é Norte-Sul.
- d) Em ambos os casos os planos de falha possuem mergulhos para as mesmas direções.
- e) Tanto em A quanto em B as falhas seriam perceptíveis por uma pessoa que estivesse vendo esse mesmo desenho somente em um mapa (visão em planta).

Referências

GEOLOGIA DE ENGENHARIA. **Descontinuidades**. Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_4_GE.pdf>. Acesso em: 6 nov. 2017.

MACHADO, F. B. et al. **Atlas de Rochas**. [on-line]. ISBN: 85-89082-12-1. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/museudpm/rochas/>>. Acesso em: 29 set. 2017.

POPP, J. H. **Geologia Geral**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. Disponível em: <<https://biblioteca-virtual.com>>. Acesso em: 6 out. 2017.

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

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, 2015. Disponível em: <<https://drive.google.com/open?id=0B2mK57ObVQY3cWIEZkJicHBQNGc>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

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

TWAIN Harte Dam Rock Stress Release 8/6/2014 5:00PM (Tradução livre: Liberação do esforço na rocha, Barragem Twain Harte às 17:00). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=DNdpqeJEPoY>>. Acesso em: 03 de out de 2017.

WICANDER, R.; MONROE, J. S. **Fundamentos de Geologia**. Tradução H. O. Avritcher; revisão técnica M. A. Carneiro. São Paulo: Cengage Learning Edições, 2009. Disponível em: <<https://biblioteca-virtual.com>>. Acesso em: 29 set. 2017.

Geologia de engenharia e hidrogeologia

Convite ao estudo

Na unidade anterior, estudamos os tipos de rochas, destacando seus processos formativos, as características mineralógicas, composicionais e suas texturas. Também vimos sobre os conceitos estratigráficos, datação das rochas e estruturas geológicas principais. Nesta terceira unidade, vamos estudar, primeiro, alguns conceitos básicos de pedologia e classificação de solos. Depois, abordaremos o ciclo hidrológico, dando ênfase ao conceito de bacia hidrográfica, balanço hídrico e a dinâmica da água superficial e sua posterior infiltração no subsolo. Por último, veremos alguns termos técnicos de hidrogeologia, comportamento da água subterrânea, sua interação com a água superficial e composição hidroquímica. O objetivo é que você consiga entender esses assuntos, que abordam aspectos fundamentais, e saiba como eles podem relacionar-se com alguns elementos da engenharia e mineração.

Como sempre, vamos elaborar uma situação para contextualizar a aplicabilidade do assunto e fazer com que você aprenda de forma mais aplicada. Imagine que a empresa em que você atua como gerente de projetos na área de engenharia e meio ambiente venceu a licitação para a implantação de um aterro sanitário numa cidade litorânea, que é formada por solos aluvionares e solos residuais de rochas basálticas (latossolo) e graníticas (neossolo). Além disso, esta área está próxima a regiões com montanhas relativamente elevadas. Como a área está também próxima ao mar e contém rios que partem das montanhas nas áreas mais internas do continente e levam as águas até o oceano, você percebeu que

não teria um trabalho fácil ao planejar as atividades a serem desenvolvidas na escolha locacional de implantação do aterro, e propôs dividir o estudo para subsidiar a proposição locacional em três etapas: compreender as características do solo da cidade onde será instalado o aterro sanitário; diagnosticar as condições hidrológicas naturais do entorno; e compreender a dinâmica das águas subterrâneas e analisar sua relação com as águas superficiais. Com isso, você embasará o seu estudo e poderá comunicar, em forma de parecer, o governo municipal dos fatores a serem levados em conta para fazer a escolha locacional para implantação do aterro.

Para que você conclua esse trabalho, é natural que algumas perguntas surjam, como: qual a origem e classificação dos solos da região? Como consigo distinguir os diferentes tipos de solos? Quais aspectos da geologia são importantes nesse projeto? Quais os métodos de investigação geológico-geotécnica tenho à minha disposição para me ajudar? O que é balanço hídrico e por que preciso conhecer a bacia hidrográfica em que esta área está inserida? Qual é a dinâmica superficial e subterrânea das águas?

Essas perguntas são importantes e devem ser levadas em conta na fase de planejamento do trabalho para que o melhor local seja escolhido futuramente. Por isso, nessa unidade, você deve mobilizar os conteúdos relacionados à geologia de engenharia e hidrogeologia. Sendo assim, encorajamos que você leia este livro com dedicação e atente-se ao conteúdo para que continuemos aprendendo conjuntamente.

Seção 3.1

Noções de geologia de engenharia

Diálogo aberto

Nessa seção, aprenderemos quais são os principais conceitos pedológicos, mencionando principalmente o que é pedogênese, como se desenvolve evolutivamente um solo, quais são as camadas (horizontes) do solo e suas características fundamentais. Além disso, veremos como os solos são classificados de acordo com seus atributos genéticos e evolutivos principais. Depois, veremos que a pedologia, assim como outras áreas da geologia, é imprescindível para a geologia de engenharia. Nesse assunto, conheceremos quais as principais variáveis estudadas e conheceremos os principais produtos de geologia de engenharia utilizados para o planejamento de projetos de engenharia, mineração e ordenamento territorial. Finalmente, conheceremos quais os principais métodos de investigação geológico-geotécnico para estudarmos o subsolo.

Antes de avançarmos, entretanto, vamos relembrar brevemente o desafio que apresentamos no início da unidade. Lá, vimos que você trabalha como gerente de projetos em uma empresa que venceu a licitação para implantação de um aterro sanitário numa cidade litorânea, com solos de distintas características e com algumas particularidades ambientais. Como o objetivo do estudo a ser apresentado é fornecer subsídios para, futuramente, se eleger um local de implantação do aterro, você resolveu particionar as atividades, para facilitar o fluxo de trabalho. Na atual etapa, cabe a você compreender as características do solo da cidade onde será instalado o aterro sanitário. Para que consiga fazer isso, portanto, é fundamental que alguns pontos sejam esclarecidos: quais as principais características dos solos, tanto residuais quanto transportados, que ocorrem na cidade? Quais as principais variáveis geotécnicas devem ser levadas em conta para analisar o comportamento dos solos? Quais são os métodos geológico-geotécnico disponíveis para investigação dos solos da região de interesse?

Neste livro didático mostraremos quais são as principais características genéricas dos latossolos e neossolos, também veremos uma das maneiras de identificar solos transportados. Ademais, destacaremos as principais variáveis utilizadas para a compreensão de possíveis eventos extremos que possam afetar o comportamento geotécnico dos solos e, para completar, estudaremos alguns métodos de investigações diretos e indiretos utilizados para o reconhecimento do subsolo. Portanto, não perca tempo e comece agora mesmo a estudar o conteúdo.

Não pode faltar

Na segunda seção da unidade anterior vimos sobre alguns processos exógenos responsáveis pelo enfraquecimento da rocha e posterior geração de sedimentos. Agora, nesta seção, veremos outro produto oriundo da alteração das rochas, o solo. De acordo com a *Soil Taxonomy* (1975) e *Soil Survey Manual* (1984), apresenta-se a conceituação de solo (IBGE, 2007, p. 31):



Solo é a coletividade de indivíduos naturais, na superfície da Terra, eventualmente modificado ou mesmo construído pelo homem, contendo matéria orgânica viva e servindo ou sendo capaz de servir à sustentação de plantas ao ar livre. Em sua parte superior, limita-se com o ar atmosférico ou águas rasas. Lateralmente, limita-se gradualmente com rocha consolidada ou parcialmente desintegrada, água profunda ou gelo. O limite inferior é talvez o mais difícil de definir. Mas, o que é reconhecido como solo deve excluir o material que mostre pouco efeito das interações de clima, organismos, material originário e relevo, através do tempo.

Portanto, a partir dessa definição, percebemos que o solo se constitui como um conjunto de material mineral e orgânica resultado da intensa interação entre distintos fatores com o material rochoso, produzindo um material inconsolidado, propício para o crescimento e desenvolvimento de plantas terrestres. O processo

de formação do solo é denominado de pedogênese, o qual envolve uma série de fatores que conduzem à uma diferenciação vertical das camadas de solo, desde a base, onde situa-se a rocha sã (inalterada), até a superfície, onde encontram-se a matéria orgânica (microrganismos vivos e mortos, restos vegetais, etc.) e o material mineral. Considerando esse perfil evolutivo, quanto mais distantes do material original, isto é, a rocha que deu origem aos minerais do solo, mais diferente será a composição, a textura e as estruturas do solo em comparação à rocha sã. De fato, quanto mais próximos à rocha original, mais preservado é o material, o que pode, inclusive, proporcionar o reconhecimento de algumas características originais da rocha, como cor, estrutura, arranjo espacial dos grãos, composição mineralógica, entre outros.

Se analisarmos um perfil genérico de solo, veremos que ele normalmente distribui-se em distintos horizontes. Nesse sentido, os solos encontram-se organizados aproximadamente conforme a Figura 3.1, que demonstra a sucessão vertical – da base à superfície – dos horizontes de solo da seguinte forma:

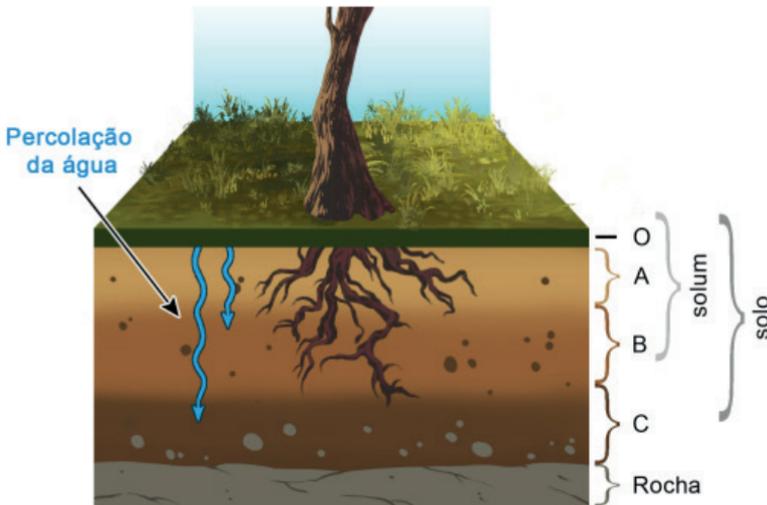
Horizonte C – compreende o intervalo de espessura onde ocorre a rocha alterada ou intemperizada, também conhecido como saprolito ou alterita;

Horizonte B – representa uma faixa onde ocorre a acumulação de argila, matéria orgânica e compostos oxidados de ferro (óxido-hidróxido de ferro) e alumínio. Possui cor normalmente alaranjada e avermelhada.

Horizonte A – constituído por matéria mineral e matéria orgânica, normalmente de cor escura, com alta atividade biológica e com restos da decomposição do material orgânico sobrejacente;

Horizonte O – formado por restos orgânicos em vias de decomposição.

Figura 3. 1 | Imagem representativa dos horizontes do solo, desde a rocha sã até a superfície.



Fonte: Toledo (2017, p. 7).

Em termos evolutivos, o *solum* – porção que compreende os horizontes O, A e B – corresponde ao intervalo mais evoluído do perfil de solo e, conseqüentemente, está mais intimamente ligado ao processo de reorganização estrutural do material que forma o solo. É no *solum* que minerais como goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) e hematita (Fe_2O_3) se acumulam formando, juntamente com outros minerais, a laterita (rocha rica em ferro, alvo de inúmeros projetos de exploração mineral). Esse tipo de rocha forma-se em condições quentes e úmidas, característica comum em climas tropicais.

Ainda do ponto de vista evolutivo, o solo pode apresentar natureza autóctone ou alóctone. Um solo autóctone (também denominado de solo residual) representa um cujo material de origem, ou seja, a rocha, encontra-se imediatamente subjacente (como exemplo, temos os com característica saibrosa – residual do granito – e os de "Terra Roxa" – residual do basalto). Ao contrário, um solo alóctone, compreende um solo cujo material

composicional foi transportado e, portanto, a rocha original não se encontra subjacente à ele, possuindo natureza distinta e compatível com outras rochas. É o caso de solos coluvionares e aluvionares, comuns em muitas regiões com rios e até mesmo cidades próximas ao litoral. Do ponto de vista prático, a identificação de solos transportados pode ser feita por meio da observação da ocorrência, no solo, de linhas de pedra (*stone lines*) com fragmentos rochosos arredondados ou subarredondados.



Assimile

Por horizonte, devemos entendê-lo como um intervalo de espessura do solo, aproximadamente paralela à superfície do terreno, onde a constituição mineral ou orgânica é dotada de características específicas que lhe permitam um inter-relacionamento com outros horizontes, dos quais se diferencia devido à diversidade de propriedades decorrentes da alteração pedogênica. Nota-se, com isso, que o horizonte é resultado da evolução pedológica do solo e não é resultado da alteração antrópica, em qualquer sentido.

Quanto à composição, podemos dizer que, de um modo geral, o solo é formado por minerais primários (dentre os quais os mais comuns são o quartzo, feldspato potássico, plagioclásio e micas), minerais secundários (oxi-hidróxidos de ferro e argilominerais diversos), matéria orgânica e espaço poroso, que pode se encontrar preenchido por água ou ar, normalmente.

Para muitos trabalhos, a classificação dos diferentes tipos de solos é fundamental para o planejamento e tomada de decisões. Por isso, é importante conhecermos as principais classes de solos, do ponto de vista pedológico, e que segue uma nomenclatura do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), organizado pela Embrapa (2006). Embora existam diversos níveis de classificação, vamos nos atentar somente às classes denominadas de primeira ordem, que representam as classes que dão nomes aos solos. Nesse nível, as principais características utilizadas para a sistematização são os atributos diagnósticos e horizontes diagnósticos e outras propriedades passíveis de serem identificadas em campo.

Por exemplo, um dos atributos diagnósticos é a atividade da fração argila, que corresponde à capacidade de troca catiônica que a argila, presente no solo, possui, definindo sua capacidade em reter cátions. Outro atributo é o teor em óxidos de ferro, fator que afeta a adsorção de poluentes no solo e também a fixação do fósforo, nutriente fundamental às plantas. Com relação aos horizontes diagnósticos, podemos citar solos com a presença de um horizonte A antrópico, que simboliza um horizonte modificado pelo uso contínuo do solo, muitas vezes com material orgânico misturado com material mineral, restos de ossos, etc.

Sendo assim, as classes de solos de primeiro nível são divididas em 13, as quais subdivididas em outras classes assim que novas características distintivas forem sendo adicionadas, classificando os solos de outros níveis categóricos. O Quadro 3.1 traz um exemplo das classes de solos e os termos de conotação.

Quadro 3. 1 | Classes de solos brasileiro do primeiro nível categórico, segundo Embrapa (2006).

Classe	Elemento Formativo	Termos de conotação e memorização
Argissolo	Argi	"Argila". Acumulação de argila Tb ou Ta (baixa ou alta atividade da fração argila), dessaturado de bases.
Cambissolo	Cambi	"Cambiare", trocar ou mudar, Horizonte B incipiente.
Chernossolo	Cherno	Preto, rico em matéria orgânica.
Espodossolo	Espodo	"Spodos", cinza vegetal. Horizonte B espódico.
Gleissolo	Glei	Glei. Horizonte glei.
Latossolo	Lato	"Lat", material muito alterado, horizonte B latossólico

Classe	Elemento Formativo	Termos de conotação e memorização
Luvissolo	Luvi	"Luere", iluvial. Acumulação de argila com alta saturação por bases e Ta.
Neossolo	Neo	Novo. Pouco desenvolvimento genético
Nitossolo	Nito	"Nitidus", brilhante. Horizonte B nítico.
Organossolo	Organo	Orgânico. Horizonte H ou O hístico.
Planossolo	Plano	"Planus". Horizonte B plânico.
Plintossolo	Plinto	"Plinthus". Horizonte plântico.
Vertissolo	Verti	"Vertere", inverter. Horizonte vértico.

Fonte: Embrapa (2006, p. 70).



Pesquise mais

Para conhecer outros atributos e horizontes diagnósticos, além de conhecer melhor as outras classes de solos, recomendamos a leitura dos dois primeiros capítulos do livro "*Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*" (Embrapa, 2006).

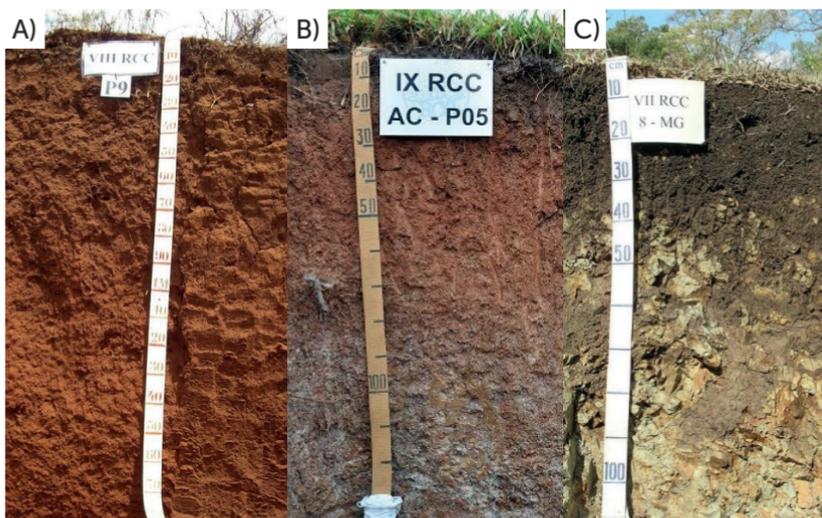
EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. – Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006. Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/downloads/sistema-brasileiro-de-classificacao-dos-solos2006.pdf>. Acesso em: 09 de nov de 2017.

Dentre esses, os solos mais comuns, em extensão territorial (área) no Brasil são os latossolos (31,49%), seguidos os argissolos (26,84%) e neossolos (13,18%). Esses três tipos totalizam mais de 70% de todos os solos que se distribuem sobre o território

nacional. Os latossolos (Figura 3.2A) são considerados solos em avançado estágio de intemperização, ou seja, são muito evoluídos, destituído de material mineral pouco resistente ao intemperismo. Normalmente profundos (por vezes maiores que 2 metros), esses solos apresentam horizontes pouco diferenciados, com zonas de transição difusas ou graduais, e boa capacidade de drenagem. Com exceção do horizonte A mais escuro, sua coloração normalmente varia de amarelo à vermelho escuro.

Os argissolos (Figura 3.2B) representam solos constituídos por material mineral, com presença de horizonte B textural (camada com textura arenosa fina ou muito fina em que houve incremento de argila). Dessa forma, nota-se que há um aumento no teor de argila do horizonte A para o horizonte B ou até porções mais profundas. A transição entre esses dois horizontes é normalmente clara e solo tende a possuir profundidade variável, coloração avermelhada ou amarelada. Esses solos estão relacionados à terrenos mais acidentados e, devido essa característica geomorfológica, aliado à sua textura, são bastante suscetíveis a processos erosivos. Por último, destacamos os neossolos (Figura 3.2C), que são constituídos por material mineral e orgânico pouco espesso, com característica evolutiva pouco expressiva, possuindo ainda minerais primários da rocha original. Em muitos casos o horizonte A assentasse sobre a rocha sã ou possui um horizonte C pouco espesso, formando uma sequência de horizontes A-R ou A-C-Rocha.

Figura 3.2 | Fotos representativas dos tipos de solos mais comuns no Brasil: A) Latossolo; B) Argissolo; e C) Neossolo.



Fonte: <https://www.estudopratico.com.br/tipos-de-solos-do-brasil/>. Acesso em: 9 nov. de 2017.

Compreender os solos também é importante para a geologia de engenharia. Esta área do conhecimento, que trabalha aplicando o conhecimento geológico no âmbito da engenharia, serve de base para o planejamento de ações na construção civil e gestão territorial. A geologia de engenharia envolve o conhecimento de várias subáreas da geologia, como a geologia estrutural, já estudada na unidade anterior. Entretanto, há outras características geológicas que devemos nos atentar. Do ponto de vista do comportamento geotécnico, a classe pedológica do solo, a declividade e altitude do terreno, a configuração geomorfológica, a quantidade de precipitação e infiltração da água no solo, aliado à litologia, influencia de maneira significativa o tipo de estrutura civil a ser implementada ou até mesmo alguma adaptação que tenha que ser efetuada para que o projeto de engenharia seja executado com sucesso.

Nesse sentido, solos muito evoluídos, com grande espessura (latossolos), tendem a apresentarem um comportamento geotécnico instável se não possuírem boa capacidade de drenagem e estiverem associados a terrenos declivosos. A declividade e a

altitude influenciam no desenvolvimento de movimentos de massa já que o ângulo de inclinação das vertentes reflete a propensão a deslizamentos, enquanto que a altitude está relacionada, entre outros fatores, à incidência de condições meteorológicas, estabelecendo um microclima particular de cada região. A configuração geomorfológica, por sua vez, também está relacionada à estabilidade de encosta. Geometricamente, unidades geomorfológicas com vertentes côncavas permitem um acúmulo de água, principalmente no contato rocha-solo, potencializando o risco de deslizamento. Além disso, a ocorrência de eventos erosivos também é comum. Vertentes convexas tendem a dispersar as águas, direcionando-as para fora da encosta e reduzindo a chance de acúmulo de água.

A água, para a geologia de engenharia, é um dos principais fatores a serem levados em conta. Por isso, a precipitação e a infiltração no subsolo são variáveis fundamentais. Isso porque a água é a grande responsável pela redução da força de atrito entre as partículas do solo, já que ela "lubrifica" a área de contato entre os minerais do solo e zonas de contato entre as rochas. Por isso, o teor de humidade do solo é um dos parâmetros analisados em estudos geotécnicos. Em situações críticas, com alta concentração de água, o solo pode se comportar como um fluido, já que a pressão exercida pela água separa as partículas. Esse fenômeno, denominado de liquefação, ocasiona as chamadas corridas de lama (*mud-flow*) ou de detritos (*debris-flow*), comum em algumas regiões montanhosas no verão brasileiro.

A consideração e análise desses parâmetros, compilados em formas de produtos cartográficos (mapas e cartas), servem para distintos propósitos. Por exemplo, as Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações, produzidos em escala 1:25.000, classificam os terrenos em zonas de alta, média e baixa propensão à este tipo de evento geológico. Já as Cartas Geotécnicas de Aptidão à Urbanização, produzidas em escala 1:10.000, caracterizam os terrenos do ponto de vista geológico-geotécnico e define as aptidões desses terrenos à ocupação urbana. De outro modo, as Cartas de Setorização de Riscos Geológicos, elaboradas em escala maior (geralmente entre 1:1.000 ou 1:3.000),

possuem como objetivo identificar, delimitar e caracterizar setores de uma encosta ou planície de inundação sujeitas à ocorrência de processos como movimentos de massa, enchentes e inundações.



Pesquise mais

Para aprofundar seus conhecimentos na área de cartografia geotécnica e sua utilidade, recomendamos a leitura do artigo de Sobreira e Souza (2012), disponível no site da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (ABGE).

SOBREIRA, F. G.; SOUZA, L. A. **Cartografia geotécnica aplicada ao planejamento urbano**. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, São Paulo, n. 2, p. 79-97. 2012. Disponível em: http://www.abge.org.br/uploads/revistas/r_pdf/RevistaABGE-art3.pdf. Acesso em: 10 de nov de 2017.

Em muitos casos, é imprescindível o desenvolvimento da etapa de investigação do solo e das rochas que ocorrem no local. Para isso, dependendo das particularidades do projeto, pode-se escolher um ou mais métodos geológico-geotécnicos de investigação do subsolo. Esses métodos podem ser divididos em diretos e indiretos. Os métodos diretos são aqueles que envolvem a observação do solo ou de amostras por meio da intervenção física (e destrutiva) com o auxílio de algum equipamento ou instrumento. Dentre esses métodos, podemos destacar: os poços e trincheiras – escavações feitas no solo com o objetivo de retirar amostras de solo indeformadas ou observar localmente os horizontes ou camadas do solo; sondagem à trado – perfuração do solo com o auxílio de uma lâmina cortante normalmente espiralada, com o objetivo de retirada de amostras deformadas, observação do nível d’água e identificação dos horizontes do solo; sondagem à percussão (SPT) – perfuração do solo por meio da cravação de um amostrador padrão para medição do índice de resistência à penetração (NSPT), determinação do nível d’água, profundidade das camadas ou horizontes, entre outros; e sondagem rotativa – utilização de conjunto motomecanizado para

penetração e rotação de uma broca que permita a retirada de um cilindro de rocha (denominado de testemunho).



Exemplificando

O método de investigação com a utilização de sondagem rotativa é o principal procedimento aplicado em estudos prospectivos de mineração, pois permite que um cilindro de rocha contínuo seja recuperado (testemunho), possibilitando a observação direta das características da rocha não exposta em superfície.

Figura 3.3 | Representação de um testemunho de rocha retirado de uma sonda rotativa.



Fonte: https://c1.staticflickr.com/9/8071/28420783170_d8a299a3ef_b.jpg. Acesso em: 10 nov. de 2017.

Os métodos indiretos são procedimentos realizados para a obtenção da informação do subsolo sem envolver sua perfuração ou escavação, ou seja, estimam-se as propriedades por meio dos parâmetros indiretos, como resistividade elétrica ou velocidade de propagação de ondas elásticas. Na prática, esses métodos indiretos são popularmente conhecidos como métodos geofísicos

e suas grandes vantagens são os custos operacionais (mais baixos que as sondagens diretas) e sua área de abrangência. Enquanto as sondagens são pontuais, os métodos geofísicos permitem uma maior cobertura. No Brasil, os métodos geofísicos mais utilizados na área de geologia de engenharia são: sísmica de refração, principalmente na determinação da profundidade do topo rochoso e espessura do capeamento (rocha alterada ou solo); e métodos geoelétricos, em especial a eletrorresistividade, que são fundamentais para investigação de descontinuidade no solo e na rocha, identificação de matacões, mapeamento de cavernas em regiões cársticas, fluxo da água subterrânea, entre outros.



Refleta

Considerando o que você aprendeu até aqui no curso, em quais casos seria interessante selecionar os métodos geofísicos em detrimento dos métodos diretos de investigação geológico-geotécnico?

Sem medo de errar

Antes de apresentarmos a resolução dos questionamentos expostos no início da seção, vamos lembrar o contexto de aprendizagem para podermos avançar na resolução do mesmo. Conforme informamos, você trabalha em uma empresa que venceu a licitação para implantação de um aterro sanitário numa cidade litorânea, que apresenta solos e características ambientais específicas, como mostramos no início da unidade. Nesse momento, você está envolvido na escolha do local para construção da obra e deve apresentar um parecer sobre os fatores a serem levados em conta para fornecer subsídios para a escolha locacional. O estudo foi dividido em etapas e, nessa atual fase, você deverá fazer o reconhecimento e compreender as características do solo da cidade. Para fazer isso, no entanto, é necessário se atentar à alguns pontos, sendo eles: quais as principais características dos solos, tanto residuais quanto transportados,

que ocorrem na cidade? Quais as principais variáveis geotécnicas devem ser levadas em conta para analisar o comportamento dos solos? Quais são os métodos geológico-geotécnico disponíveis para investigação do solo?

Para resolvermos o primeiro apontamento, é importante notar os tipos de solos que ocorrem na cidade, seguindo a descrição apresentada. Pelo que está relatado, no município ocorrem solos residuais de basalto, este classificado como latossolo, e de granito, qualificado como neossolo. Além disso, também ocorre solos aluvionares, que são solos alóctones ou transportados, isto é, seu material de origem não se encontra assentado sobre a rocha fonte de seus minerais. Conforme vimos nessa seção, os latossolos são solos resultantes de um estágio pedogenético evolutivo muito avançado, na qual seus minerais encontram-se num grau de intemperização alto. Por isso, a profundidade deles é mais elevada e, portanto, os horizontes do *solum* são normalmente espessos, embora seja difícil notar a variação entre os diferentes horizontes. A boa capacidade de drenagem é outra característica importante desse solo, que possui cores amareladas à avermelhadas escuras.

Já os neossolos são caracterizados por apresentarem uma constituição mineral e orgânica pouco expressiva, formando normalmente uma fina camada. Dessa forma, são solos pouco evoluídos e não muito profundos. O material mineral ainda apresenta características do material parental, ou seja, da rocha que lhe deu origem. No caso do neossolo proveniente de um granito, é provável que o solo apresente boa quantidade de quartzo, feldspato e alguma porcentagem de micas (moscovitas, biotitas, entre outras). Nesse tipo de solo é comum que o horizonte A assente-se diretamente sobre a rocha ou que possuía um horizonte C pouco significativo. O solo transportado que ocorre na cidade tem origem aluvionar, ou seja, se forma por meio do depósito de sedimentos carregados pelo rio, podendo possuir distintas características. Em alguns casos, para diagnosticar sua presença, é comum buscarmos a presença de linhas de pedra (*stone lines*), que representam fragmentos rochosos arredondados ou subarredondados imersos no solo.

Considerando o segundo ponto, há diversas variáveis levadas em consideração quando analisamos o comportamento geotécnico do

solo e que integram boa parte dos mapas geotécnicos. A primeira variável seria analisar a qual classe pedológica o solo se enquadra. Como vimos, latossolos são mais espessos que neossolos e, assim por diante. A segunda refere-se à declividade e altitude do terreno no qual o solo se assenta. Solos que repousam sobre encostas declivosas possuem maior propensão à movimentos gravitacionais. Além disso, terrenos em altitudes elevadas possuem condições meteorológicas distintas dos que situam-se em regiões litorâneas, como é o caso da região de estudo. A terceira variável, a configuração geomorfológica, está principalmente relacionada à geometria da vertente, que pode ser basicamente de dois tipos, côncava e convexa. As côncavas possibilitam um maior acumulo de água no solo, deixando mais propenso à ruptura, enquanto que as convexas tendem a direcionar as águas para fora, drenando o solo. A precipitação e infiltração da água no solo também influenciam a estabilidade geotécnica do solo e inclusive ditam o teor de umidade do solo. Além desses parâmetros, é importante avaliar a rocha sobre o qual o solo está apoiado, pois cada rocha possui uma composição mineralógica particular, dando origem a solos com minerais particulares.

Por último, vimos que os métodos de investigação do solo são amplos e dividem-se em diretos e indiretos. Sobre os últimos, aprendemos que há dois tipos principais: sísmica de refração, usada principalmente para determinação da profundidade do topo rochoso e espessura do capeamento (rocha alterada ou solo); e eletrorresistividade, imprescindível para o reconhecimento de descontinuidades no solo (e na rocha), identificação de matacões, mapeamento de cavernas em regiões cársticas, fluxo da água subterrânea, entre outros. Com relação aos métodos diretos, há ao menos três: os poços e trincheiras, que são escavações feitas no solo com o objetivo de retirar amostra de solo indeformadas ou observar localmente os horizontes ou camadas do solo; sondagem a trado, a qual corresponde à perfuração do solo com o auxílio de uma lâmina cortante normalmente espiralada, com o objetivo de retirada de amostras deformadas, observação do nível d'água e identificação dos horizontes do solo; e sondagem a percussão (SPT), que compreende a perfuração do solo por meio da cravação

de um amostrador padrão para mediação do índice de resistência à penetração (NSPT), determinação do nível d'água, etc.

Ao resolver esses pontos, que são fundamentais para nortear a escolha do local de instalação do aterro, você terá cumprido o seu primeiro desafio e estará melhor embasado para seguir o seu estudo e garantir o sucesso do projeto.

Avançando na prática

Investigação geológico-geotécnico aplicado a barragens

Descrição da situação-problema

Imagine que você trabalha em uma empresa de geotecnia, responsável pela execução de inúmeros projetos pelo Brasil. Nessa empresa, você é um engenheiro que trabalha no setor de projetos e acompanhamento de obras e, atualmente, está envolvido no planejamento da construção de uma barragem de concreto armado que irá formar o barramento de um curso d'água de grandes proporções. Nessa fase em que se encontra o projeto, o eixo da barragem foi selecionado para um determinado local, mas o gerente do projeto, querendo fazer um planejamento adequado, ainda possuiu dúvidas sobre o posicionamento da estrutura. Por isso, ele lhe convidou para uma reunião para saber algumas coisas: considerando que o solo do local é um latossolo de basalto, podemos esperar solos espessos ou rasos? Além disso, gostaríamos de avaliar previamente a presença de estruturas no subsolo que possam causar problemas de infiltração de águas, qual método podemos usar para avaliar isso? Se necessário, qual método geológico-geotécnico deve ser utilizado para investigar o subsolo diretamente?

Resolução da situação-problema

Para responder à essas perguntas feitas pelo gerente de projetos, você deve se lembrar que nessa unidade estudamos alguns solos típicos e também vimos alguns métodos de investigação geológico-geotécnico importantes. Para responder a primeira pergunta, você deve se lembrar que os latossolos são solos evoluídos, cujo processo de intemperismo avançado causou a alteração do material mineral original por um longo período de tempo. Dessa forma, esses solos possuem todos ou quase todos os horizontes bem desenvolvidos, sendo caracterizados como espessos, normalmente maiores que 2 m de profundidade. Sobre a segunda pergunta, considerando ser um reconhecimento prévio, não é necessário gastar com sondagens, podendo-se muito bem escolher um método geofísico para o serviço. Nesse caso, vimos que a eletrorresistividade pode ser útil para a investigação de descontinuidade no solo e na rocha, mapeamento de possíveis cavernas e comportamento do fluxo da água subterrânea. Por último, respondendo à terceira pergunta, vimos que para a investigação do solo é possível aplicação da sondagem a trado, que é útil para a retirada de amostras deformadas, observação do nível d'água e identificação dos horizontes do solo, ou a sondagem à percussão (SPT), que também identifica as camadas ou horizontes do solo e ainda calcula a resistência do solo à penetração (NSPT). Já para a investigação do tipo de rocha e suas características, vimos que a sondagem rotativa é a mais adequada.

Com essas informações, você já terá capacidade de iniciar o planejamento da atividade de forma a conseguir atingir seu objetivo final.

Faça valer a pena

1. O estudo da pedologia é uma das bases do bom mapeamento geotécnico, etapa fundamental no planejamento de obras e estruturas civis que servem à sociedade. Para isso, com objetivo de reduzir custos, evitar problemas geotécnicos e garantir o sucesso dos projetos, é fundamental conhecer o tipo de solo. Por isso, a respeito desse assunto, analise as alternativas a seguir:

- I - O horizonte C do solo corresponde ao mais alterado, mais evoluído e com material mineral bastante intemperizado.
- II - O *solum*, zona que compreende os horizontes O, A e B, corresponde ao intervalo mais evoluído do perfil de solo.
- III - O horizonte C é o último antes da rocha sã, e é denominado de saprolito ou alterita, podendo conter alguns fragmentos de rocha e minerais provenientes da rocha subjacente.
- IV - Os solos denominados de autóctones (residuais) são solos cujo material de origem, ou seja, a rocha, encontra-se imediatamente subjacente.

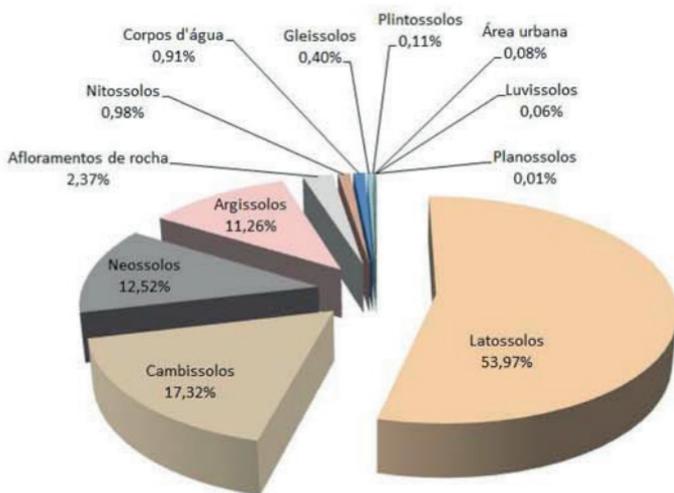
Considerando as afirmativas expostas acima, é possível afirmar que se encontra correto o que se encontra em:

- a) I e II, apenas.
- b) I e III, apenas.
- c) I, II e IV, apenas.
- d) II e IV, apenas.
- e) II, III e IV, apenas.

2. O Estado de Minas Gerais é um dos com maior diversidade geológica do Brasil e, aliado a outros fatores como clima e relevo, essa característica natural influencia na origem de diversos tipos de solos. Como pode ser observado na Figura 3.4, esses distintos tipos de solos ocupam proporções areais diversas, com destaque para quatro tipos predominantes.

Figura 3.4 | Porcentagem em área dos principais solos de MG.

Área relativa das classes de solo no Estado de Minas Gerais



Fonte: http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mapadosolo/mapa_solos_3.jpg. Acesso em: 10 nov. de 2017.

Sobre as classes pedológicas mais comuns, é correto afirmar que:

- Uma das características do neossolo, que ocupa cerca de 12,52% do território de MG, é possuir um horizonte C espesso.
- Os latossolos, classe de solo majoritária em MG, apresenta um horizonte B incipiente.
- Os cambissolos, segundo tipo mais comum de solo em MG, é caracterizado pela presença de um horizonte B textural.
- Os argissolos, quarto tipo de solos que mais aparecem em MG, possui um horizonte B textural, que demonstra um incremento no teor de argila do horizonte A para o horizonte B ou até porções mais profundas.
- De todos os solos mais predominantes em MG, o Neossolo é o mais pedologicamente evoluído.

3. A escolha do método de investigação geológico-geotécnico adequado não passa somente para análise de custos. Dependendo do escopo do projeto, muitas vezes, é necessário a escolha de um ou até mais métodos, inclusive aliando procedimentos diretos e indiretos (geofísicos).

Considerando um contexto de planejamento de uma obra civil, como um túnel ou barragem, analise as asserções a seguir:

- I - Os métodos geofísicos possuem um custo operacional menor do que os métodos diretos, porém são investigações pontuais.
- II - O planejamento de um túnel, que será escavado na rocha, necessitará de uma sondagem rotativa.
- III - Para a estimativa do volume de solo a ser removido na construção do eixo de uma barragem, poderia ser aplicado o método da sísmica de refração.

Sobre as alternativas a seguir, é possível afirmar que é correto o que se afirma em:

- a) I, apenas.
- b) I, II e III.
- c) II e III, apenas.
- d) I e III, apenas.
- e) III, apenas

Seção 3.2

Hidrologia básica

Diálogo aberto

Antes de vermos o assunto dessa nova seção, vamos lembrar brevemente do tema da seção anterior. Nela, estudamos o processo de formação dos solos, suas características, classificação e a relação com a geologia de engenharia. Também aprendemos alguns métodos diretos e indiretos usados para investigar as características geológicas e geotécnicas dos terrenos, algo fundamental em projetos de engenharia e mineração.

Nesta atual seção, vamos abordar os conceitos básicos relacionados à hidrologia, fundamentalmente como é o funcionamento do ciclo da água, seus elementos e relações. Além disso, veremos o que é balanço hídrico e por que é necessário entendê-lo. Também apresentaremos a definição de bacia hidrográfica e veremos alguns fatores que interferem no fluxo de água dentro dessa unidade. Por último, aprenderemos alguns parâmetros descritivos do escoamento superficial e também analisaremos alguns fatores que interferem na infiltração da água no subsolo, de maneira a compreendermos melhor as águas superficiais e iniciarmos nosso estudo sobre as águas que penetram no solo e se armazenam nos aquíferos.

Mas, primeiramente, para continuar o aprendizado, vamos recapitular o nosso contexto apresentado no início da unidade. Nele, vimos que você está trabalhando como gerente de projetos de uma empresa que venceu a licitação para a implantação de um aterro sanitário numa cidade litorânea com solos de distintas características e com algumas particularidades ambientais. O objetivo é que, após o estudo, seja escolhido um local para a construção do aterro e, para isso, você dividiu o serviço em etapas. Na anterior, realizou o estudo para compreender as características do solo da cidade onde será instalado o aterro sanitário. Agora, para dar sequência ao trabalho, imagine que você precisa realizar o diagnóstico hidrológico do

entorno, afinal um aterro sanitário é uma estrutura que pode afetar o meio ambiente.

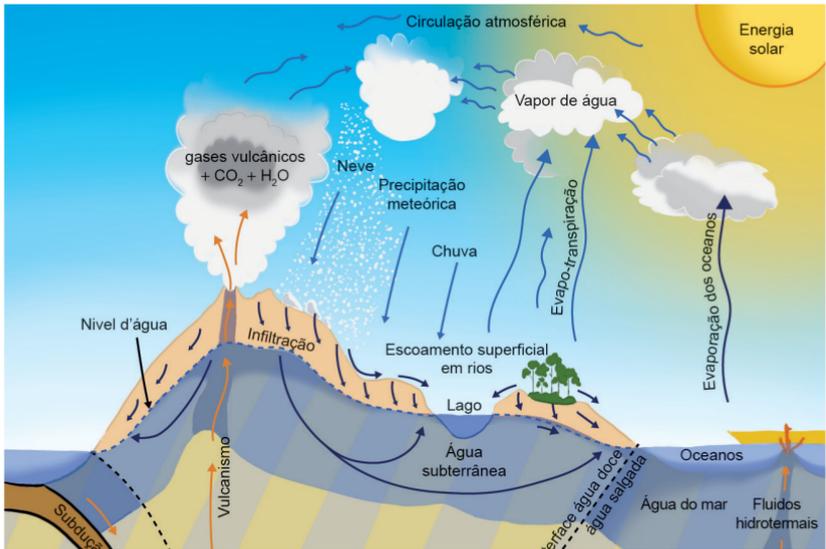
Pensando nisso, há alguns pontos que precisam ser esclarecidos: quais aspectos da bacia hidrográfica são importantes de serem analisados? Por que precisamos conhecer o balanço hídrico da bacia? Haveria diferença na infiltração da água no subsolo, considerando os tipos de solos da cidade? Explique.

Vamos mostrar nesta seção algumas das principais características climáticas e fisiográficas das bacias hidrográficas, e também o que é balanço hídrico, como ele é analisado e por que é fundamental levá-lo em consideração. Por último, veremos como a infiltração é avaliada e exporemos alguns valores característicos. Vamos nos aventurar nesse novo conteúdo e dê prosseguimento ao seu aprendizado. Boa leitura!

Não pode faltar

Na seção anterior, mencionamos que a água é um dos agentes complicadores em geologia de engenharia. No entanto, ela também é um fator essencial para a manutenção e equilíbrio entre vários sistemas bióticos e físicos do meio ambiente. Por isso, é fundamental que nos dediquemos a entender um pouco da dinâmica da água, partindo da análise do ciclo hidrológico e seus elementos, para interpretar a influência que ele exerce nos projetos de engenharia e mineração. Como você provavelmente já deve ter visto em outras oportunidades, o ciclo da água (Figura 3.5) é composto por alguns elementos inter-relacionáveis que simbolizam a trajetória da água dentro do sistema Terra.

Figura 3.5 | Representação do ciclo hidrológico com seus elementos e relações.



Fonte: Teixeira *et al.* (2003, p. 115).

Partindo da atmosfera, a condensação de gotículas a partir do vapor d'água forma nuvens carregadas que darão origem às chuvas e, portanto, ocasionarão a **precipitação da água** em forma líquida que atingirá a superfície terrestre. Na forma similar, a aglutinação do vapor d'água diretamente na forma de cristais de gelo dá origem à neve ou granizo, água que se precipita na forma sólida. Esta é, portanto, o primeiro elemento do ciclo hidrológico.

Grande parte dessa precipitação retorna à atmosfera, na forma de vapor d'água, através do processo de evaporação direta que acontece em corpos d'água (rios, lagos, mares, oceanos, etc.), já outra parte é levada devido a transpiração que as plantas exercem durante sua atividade biológica. Esses dois processos são conjuntamente denominados de evapotranspiração. Em áreas densamente florestadas de clima quente e úmido, esse fenômeno pode corresponder a até 70% da precipitação (TEIXEIRA *et al.*, 2003). Em algumas regiões de clima frio, a sublimação também contribui

para o retorno do vapor d'água à atmosfera. Adicionalmente, em regiões com atividade vulcânica, os gases expelidos pelo vulcão também contribuem nesse quesito.

Embora uma quantidade de água precipitada possa sofrer evaporação enquanto percorre sua trajetória em direção à superfície terrestre ou ser interceptada pela vegetação e construções e nunca atingir o solo, a maior porcentagem da água atinge a Terra. Nos oceanos e mares, a água irá recarregar esses reservatórios, mas nas áreas continentais ela seguirá dois caminhos. Um deles é o escoamento superficial, a porção de água que flui sobre a superfície. Nesse caso, esse processo ocorre normalmente quando a capacidade de absorção do solo é excedida e a água flui por gravidade para zonas topograficamente mais baixas. O fluxo inicia-se primeiramente na forma de pequenos filetes de água, comumente bem distribuídos e efêmeros, mas que, com o tempo, podem se tornar canais bem estabelecidos principalmente após a erosão e escavação da rocha ou solo.

O outro caminho que a água segue é a infiltração, que representa a parcela de água que, ao atingir a superfície terrestre, continua seu caminho descendente por meio dos poros que compõe os solos e as rochas. Portanto, a quantidade de água infiltrada dependerá da característica granulométrica do solo, da natureza da rocha, da presença de fraturas ou estruturas geológicas condutoras, tipo de cobertura do solo, declividade do terreno, entre outros. Do ponto de vista hidrogeológico, a infiltração é o principal fenômeno do ciclo hidrológico. Responsável pela recarga dos aquíferos, essa água representa a renovação e o abastecimento contínuo dos reservatórios de água subterrânea e pode ocorrer de duas formas: recarga direta – que é quando a água infiltra diretamente no aquífero, por meio das áreas de afloramento e fissuras nas rochas que situam-se logo acima; recarga indireta – que ocorre quando o reabastecimento do aquífero se desenvolve por meio da drenagem das águas superficiais e do fluxo subterrâneo indireto, em áreas onde há fluxos descendentes. No entanto, como mostra a Figura 3.5, a água não se infiltra somente por precipitação. Há uma grande quantidade de água que se infiltra no solo e nas rochas pelo oceano/mares e também nas zonas de subducção, embora este seja um fenômeno mais restrito.

Em termos numéricos, a infiltração é determinada com base na taxa de infiltração, que leva em conta a velocidade com que a água se desloca no solo. Por exemplo, solos com textura arenosa possuem uma taxa de infiltração geralmente maior que 30 mm/h, enquanto solos argilosos muitas vezes apresentam valores abaixo de 5mm/h. Apesar de corresponder a uma análise simplificada, nota-se que a recarga de aquíferos será mais lenta em solos argilosos, implicando num maior tempo de reabastecimento de água subterrânea. No entanto, ressalta-se que nem sempre isso é verdadeiro, pois há outros fatores que influenciam na infiltração da água.



Pesquise mais

Para aprender mais sobre a infiltração da água no solo, assista ao vídeo abaixo produzido pela UFPR TV.

SOLO na Escola - Infiltração da água no solo (11/05/16). Disponível em: <https://youtu.be/WCdRZBJMzAA>. Acesso em: 18 de nov de 2017.

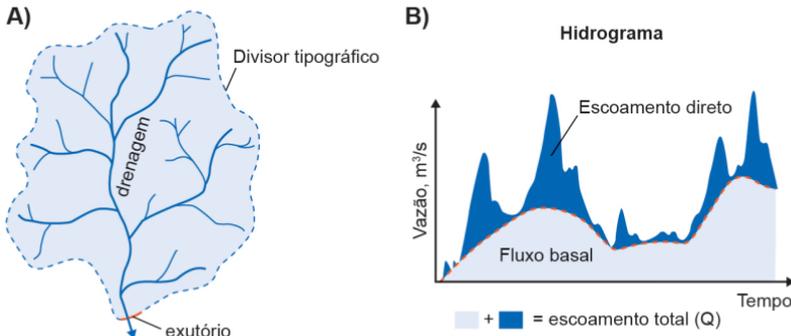
Se analisarmos com mais calma, perceberemos que todos os elementos do ciclo hidrológico representam variáveis de saída e entrada de um sistema durante um intervalo de tempo em uma área específica, o chamado balanço hídrico. Esse cálculo é realizado tomando como unidade básica de área a bacia hidrográfica, que representa uma área geográfica no qual o escoamento superficial, partindo de qualquer ponto, converge para um ponto fixo de saída, o chamado exutório. Essa área é delimitada pelos divisores de água, que se caracterizam por regiões altas (divisor topográfico) onde a água irá escoar para um lado ou outro (Figura 3.6A).



Assimile

A bacia hidrográfica é uma área na superfície terrestre na qual toda a água precipitada e, posteriormente escoada superficialmente, em qualquer ponto, converge para um único ponto fixo, denominado exutório.

Figura 3.6 | A) Bacia hidrográfica e seus principais elementos: divisor d'água (divisor topográfico), drenagens e exutório; B) Hidrograma de um determinado rio.



Fonte: Teixeira et al. (2003, p. 117).

Fonte: Teixeira et al. (2003, p. 117).

É na bacia hidrográfica que a quantificação do balanço hídrico se torna mais palpável. Assim, a expressão básica para o cálculo desse parâmetro é dado pela equação:

$$P - E - Q(\pm \Delta S) = 0.$$

Onde P corresponde ao volume de água que se precipita sobre a área da bacia, E representa o volume de água que voltou à atmosfera por meio da evapotranspiração, e Q o volume total de água escoado pela bacia durante um determinado intervalo de tempo, valor que é medido pela vazão no exutório durante o tempo analisado. O termo ΔS corresponde às possíveis variações, positivas ou negativas, que ocorrem devido o armazenamento no interior da bacia hidrográfica, principalmente por causa da água que fica retida no subsolo (aquífero) e cujo fluxo é mais lento que o escoamento superficial. Em épocas de estiagem, em que o escoamento da bacia é controlado pela água subterrânea (fluxo basal), os valores são positivos. Já em períodos chuvosos, quando boa parte da precipitação acaba por infiltrar, os valores são negativos. Esses valores tendem a se anular em períodos de análise mais longos e, portanto, normalmente a equação do balanço hídrico fica restrita a $Q = P - E$.

Na grande maioria dos casos, o cálculo do valor de Q é feito no rio principal de uma bacia, aquele que concentra a água proveniente

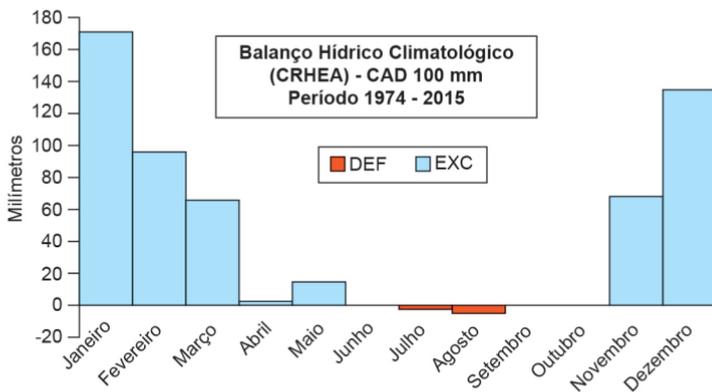
de todos os afluentes. Nesse caso, a vazão do rio é medida em m^3 / s , considerando um intervalo de tempo determinado, permitindo a construção de um hidrograma que representa o comportamento da bacia. Como mostra a Figura 3.6B, com esse gráfico é possível identificar a contribuição das águas superficiais (escoamento superficial) e subterrâneas (fluxo basal). Além disso, podemos analisar os volumes de precipitação e evapotranspiração por meio de medidas com pluviômetros e lisímetros (ou imagens de satélite), respectivamente. Com isso, é possível elaborar um gráfico de balanço hídrico que nos permite ter ideia sobre os intervalos de tempo em que o balanço hídrico é positivo (precipitação > evapotranspiração) ou negativo (evapotranspiração > precipitação). Dessa forma, períodos em que o balanço hídrico é negativo, ou seja, houve mais evapotranspiração que precipitação, a quantidade de água infiltrada no solo é nula (ou mínima), o que prejudica a recarga dos aquíferos.



Exemplificando

Para exemplificar, o gráfico da Figura 3.7 ilustra o balanço hídrico da bacia de Ribeirão da Onça, município de Brotas/SP, durante 1974-2015 (41 anos). As barras em azul exemplificam meses de balanço positivo (excedente hídrico), enquanto em vermelho está demonstrado os meses de balanço negativo (déficit hídrico).

Figura 3.7 | Balanço hídrico para a Bacia da Onça, Brotas/SP.



Fonte: Melo et al. (2017, p. 69).

Ademais, há alguns fatores que também influenciam a análise da bacia hidrográfica, destacando-se, principalmente, os de ordem climáticas e fisiográficas (Quadro 3.2).

Quadro 3. 2 | Fatores que influenciam o escoamento superficial e infiltração da água nas bacias hidrográficas.

Clima	Fisiografia
Intensidade da precipitação – quanto mais intensa mais rápido o solo atinge a sua capacidade de infiltração	Área e forma da bacia – quanto maior a área, maior o volume; e quanto mais compacta maior a tendência de concentração num canal principal.
	Capacidade de infiltração – quanto mais água infiltrar, menor será o escoamento superficial
Duração da precipitação – quanto mais prolongado, mais intenso o escoamento superficial	Permeabilidade do solo – quanto maior a permeabilidade, mais água infiltra e menos esco superficialmente
	Topografia da bacia – quanto mais íngreme a bacia, maior a velocidade de escoamento

Fonte: elaborado pelo autor.



Refleta

Quais outros possíveis fatores de ordem ambiental (climática, sedimentológica, biológica, etc.) e antrópica podem influenciar o balanço hídrico, escoamento superficial e infiltração das águas em uma bacia hidrográfica?

Esses fatores são importantes quando analisamos o escoamento superficial que ocorre numa bacia hidrográfica, de forma que existem algumas grandezas que podem ser estimadas para caracterizá-

lo. Um dos principais fatores é a vazão (Q) do rio, que expressa o volume de água que passa em uma determinada seção transversal por unidade de tempo, medida em m^3 / s em grandes rios ou em L/s em córregos. Muitas vezes, para efeito de comparação entre diferentes bacias, é comum o cálculo da vazão específica (q), que leva em consideração a área da bacia, expressa portanto como $q = Q / A$, sendo que a unidade mais comum é $m^3 / s.km^2$. Outro fator importante é o coeficiente de escoamento superficial (C), também denominado de coeficiente de *runoff*, que estabelece a relação entre o volume que escoou sobre a superfície do terreno (ES) e o volume total precipitado (PT), matematicamente simbolizado da seguinte forma:

$$C = \frac{ES}{PT}.$$

Na prática, o coeficiente de *runoff* nos dá uma estimativa porcentual, considerando determinada cobertura do terreno (solo, vegetação densa, grama, pavimento asfáltico), da proporção da precipitação que se transforma em escoamento superficial. Para se ter uma ideia, o valor de C para um pavimento asfáltico é da ordem de 0,7 a 0,95, enquanto que para solos arenosos cobertos por vegetação rasteira em terreno pouco declivoso esse valor passa a ser da ordem de 0,05 a 0,10, conforme a ASCE (1969). Outra grandeza muito analisada é a altura linimétrica (h), que se refere à altura que o nível da lâmina d'água do rio atinge, em um determinado momento, em relação a um nível de referência, denominado de posto fluviométrico. O histórico dessa altura define eventos de cheia e inundação.

Cheia é o período em que o curso d'água atinge um nível mais elevado que o normal, mas mesmo assim a água mantém-se em seu leito regular. A inundação, por sua vez, representa o evento hidrológico em que a altura linimétrica extravasa o leito normal, causando um transbordamento de suas águas, podendo causar prejuízos materiais e humanos (Figura 3.8).

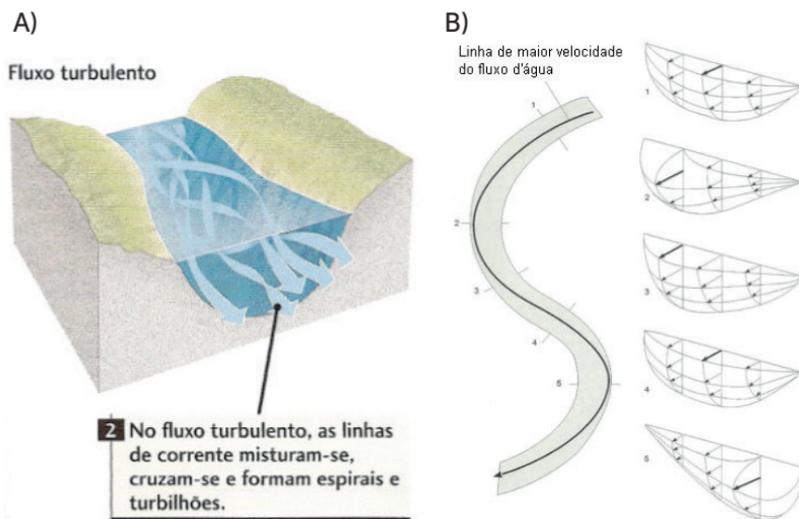
Figura 3. 8 | Esquema ilustrando a diferença entre enchente (cheia) e inundação.



Fonte: BRASIL (2007, p. 92).

O escoamento superficial em rios possui determinadas particularidades e deve ser analisado com atenção, principalmente quando o fluxo da água é turbulento. Nesse tipo de escoamento, as linhas de fluxo misturam-se, cruzando-se de forma complexa e causando turbilhonamento das águas (Figura 3.9), situação que ocorre geralmente em períodos de chuvas intensas e aumento da vazão fluvial.

Figura 3. 9 | A) Exemplo dos tipos de fluxos d'água em canais fluviais; B) Distribuição das linhas de fluxo em canais fluviais meandrantes.



Fonte: Press et al. (2006, p. 342).

Fonte: Scherer (2008, p. 107).

Aliado a esse fator, é comum em regiões montanhosas próximas ao litoral a ocorrência de rios meandrantes, que são rios que formam braços ou meandros, constituindo-se por uma trajetória sinuosa. Nesses rios, as linhas de fluxo de maior velocidade das águas seguem um padrão específico em que a maior velocidade encontra-se no centro do canal e próximo à superfície da água nas porções mais retilíneas, mas deslocam-se para a parte externa do meandro e abaixo da superfície da água nas áreas de curvatura mais acentuada, conforme mostra a Figura 3.9.

Esse comportamento faz que o rio eroda os sedimentos e solos da parte externa dos meandros de forma acentuada e deposite-os na parte interna do meandro ou carregue-os para regiões à jusante. Por causa dessa dinâmica fluvial, é comum que, em canais com margens pouco estabilizadas, com solo exposto ou vegetação rasteira, toda sua borda perca a sustentação contribuindo para o avanço da erosão das margens e, conseqüentemente, com a

perca de área adjacente ao rio. Essa condição se agrava em solos arenosos próximos às regiões urbanas, ocupadas por construções na beira do rio.

Sob outra ótica, vimos no começo do texto que a infiltração é o elemento mais importante para as águas subterrâneas. Para que isso ocorra, no entanto, há alguns fatores que influenciam o volume e a velocidade da água que infiltra. O tipo do material que aflora na superfície terrestre e a característica de todas as camadas pela qual a água passe é determinante. Solos e sedimentos arenosos e permeáveis, rochas com boa permeabilidade e/ou fraturadas permitem uma melhor penetração da água no subsolo. Contrariamente, materiais mais argilosos e rochas ígneas e metamórficas pouco fraturadas são desfavoráveis. A espessura do solo/sedimento também exerce papel significativo, retendo a água temporariamente, filtrando-a e liberando lentamente. Entretanto, há uma porcentagem da água que é absorvida pelo solo e utilizada pelas plantas e, dessa forma, não contribui para a recarga do aquífero.

Outro fator importante é a cobertura vegetal, que afeta de duas formas distintas: uma delas é a possibilidade de interceptação (já discutido anteriormente) da água, impossibilitando boa parte da precipitação atingir o solo, e a outra é a geração de caminhos preferenciais pelas raízes das plantas, acelerando o processo de infiltração. A topografia também influi de forma que regiões com depressões que permitem o acúmulo de água favorecem a infiltração, enquanto que porções íngremes favorecem o escoamento superficial.

Com relação à precipitação, é notável que, quanto melhor a distribuição das chuvas, maior a infiltração, visto que, dessa forma, a velocidade de infiltração segue um ritmo similar ao volume precipitado. Ao contrário, chuvas intensas e concentradas infiltram menos, visto que a taxa de infiltração é menor que o volume precipitado. Finalmente, o tipo de ocupação do solo exerce um dos mais significativos efeitos. Em áreas urbanas e em processo de urbanização, a pavimentação e as construções impedem o avanço da água para o solo, comprometendo a infiltração. Nas áreas rurais, o desmatamento, manejo de áreas cultivadas sem a prática de terraceamento, pisoteio do gado e posterior compactação do solo,

tem causado a diminuição da porcentagem de água que infiltra e que, conseqüentemente atinge o aquífero (TEIXEIRA, et al., 2003).

Sem medo de errar

Para que você continue o seu desafio, é importante que tenha ele bem claro em sua mente. Por isso, vamos lembrar o contexto apresentado no início da unidade, lembrando também a situação dele derivada, apresentada no início da seção.

Você está envolvido no projeto de estudo locacional para a implantação de um aterro sanitário em uma cidade litorânea, que possui solos com características distintas e conduções ambientais particulares. O estudo foi dividido em etapas e você já realizou a primeira, de reconhecimento dos solos da cidade. Agora, o estudo está voltado ao diagnóstico das condições hidrológicas do entorno, visando um aprofundamento do conhecimento da dinâmica das águas. Para isso, é fundamental o enfoque em alguns pontos, sendo eles: quais aspectos da bacia hidrográfica é importante analisar? Por que precisamos conhecer o balanço hídrico da bacia? Haveria diferença na infiltração da água no subsolo, considerando os tipos de solos da cidade? Explique.

Para ajudá-lo a solucionar a sua primeira pergunta, vimos que há alguns fatores de ordem climática e fisiográfica que podem influenciar na dinâmica das águas de uma bacia hidrográfica, principalmente as águas superficiais, que possuem uma velocidade de fluxo maior. Do ponto de vista climático, aprendemos que a intensidade da chuva e a duração da precipitação são fatores importantes. O primeiro governará a quantidade de água que cai sobre o solo, de forma que quanto maior a intensidade da chuva, mais rápido o solo atingirá sua capacidade de infiltração, o que resulta num maior volume de água sendo escoado superficialmente. Já o segundo afetará o tempo em que o evento se processará, de forma que quanto mais prolongado for o intervalo de precipitação, mais significativo será o escoamento superficial. Isso pode influenciar a escolha do local de implantação pois, para área de aterro, é desaconselhável que se desenvolva o

escoamento superficial ou se acumule água sobre o terreno. Dessa forma, a água que precipita precisa ser bem drenada.

Sobre a fisiografia da bacia, vimos que a área exerce influência no volume drenado, já que bacias grandes conseguem captar mais água, escoando a água em um maior número de canais. Já a forma da bacia pode afetar o grau de concentração da água, pois bacias compactas tendem a direcionar as águas para um canal principal, que fica sobrecarregado. Com relação à capacidade de infiltração, vimos que solos mais permeáveis irão permitir uma maior infiltração da água, fazendo com que o escoamento superficial não seja tão intenso. A topografia, por sua vez, governa a velocidade de direcionamento das águas, já que bacias hidrográficas formadas por encostas íngremes aumentam a velocidade da água superficial. Nesse sentido, para a implantação de um aterro, é importante que o local não esteja próximo a um rio cuja água provém de uma bacia compacta e que possua uma área grande, pois o risco de extravasamento da água do canal é elevado. Já a capacidade de infiltração é um parâmetro fundamental pois quanto mais elevado for, mais água se infiltrará e menos água ficará acumulada no terreno. A topografia, por sua vez, deve ser suave, pois o escoamento superficial com velocidade rápida pode possuir um efeito devastador em eventos climáticos extremos, de grande precipitação, comum em muitas regiões brasileiras durante o verão.

Sobre o outro ponto a ser analisado, lembre-se que estudamos que o balanço hídrico nada mais é do que a contabilização da água que entra na bacia e a água que sai da bacia, principalmente por precipitação e evapotranspiração, respectivamente. Nesse sentido, vimos que o cálculo da quantidade de água precipitada menos a quantidade de água evapotranspirada durante um certo intervalo de tempo nos permite identificar períodos de balanço positivo e negativo. Em épocas positivas, a precipitação supera a evapotranspiração, deixando a bacia com um excedente hídrico, ou seja, com sobra de água. Nesse caso, há mais água disponível para escoamento através de cursos d'água ou até mesmo para infiltração. Em períodos de balanço negativo, há um déficit hídrico e não há um ganho de água na bacia. Conhecer esse aspecto influencia o conhecimento do regime hídrico local e permite analisar como funciona o ciclo hidrológico em termos de disponibilidade de

água e ocorrência de eventos hídricos extremos, que influenciam, também, na dispersão de possíveis poluentes.

Sobre seu último questionamento, é importante que você reveja quais são os tipos de solos que existem na cidade e, principalmente, quais suas características de textura, reconhecimento que você realizou na etapa anterior. Nesta seção vimos que a infiltração é avaliada de acordo com sua taxa de penetração no solo, que pode ser medida em mm/h. Neste caso, solos mais arenosos possuem taxa de infiltração geralmente maiores que 30 mm/h. Se pensarmos nos solos descritos anteriormente para o local, veremos que o neossolo de granítico e os solos aluvionares corresponderiam à essa descrição. Já os solos mais argilosos, normalmente, apresentam taxa de infiltração da ordem de 5 mm/h ou até menos. No entanto, como também aprendemos aqui, há outros fatores que favorecem ou desfavorecem à infiltração, como o tipo de cobertura vegetal, topografia e distribuição das chuvas. Nesse caso, a importância do solo está ligada à infiltração de água superficial (que não deve ficar acumulada), mas também indica sua competência em dispersar qualquer tipo de contaminante que esteja na superfície e também em subsuperfície, como ocorre em alguns casos quando o chorume (líquido gerado pelo processo de degradação do resíduo depositado no aterro) acaba infiltrando no solo e atingindo o lençol freático.

Avançando na prática

Ciclo hidrológico em escala de reservatório

Descrição da situação-problema

Imagine que você trabalhe numa empresa de geotecnia que está envolvida no projeto e acompanhamento de implantação de uma barragem para o estabelecimento de um reservatório artificial de água em uma cidade. A área onde está sendo planejado o desenvolvimento desse corpo d'água situa-se numa depressão relativa do terreno, sendo o local circundado por regiões topograficamente mais

altas. Considerando que no local já existe um pequeno córrego, e que a área é formada por latossolos siltoargilosos e possui pouca cobertura vegetal, sendo a maioria de porte arbustivo, é necessário, além do projeto de engenharia, um planejamento hidrológico. Para isso, considerando ser esta uma obra de recurso público municipal, o prefeito da cidade resolveu convocar uma reunião para solucionar algumas dúvidas: qual o principal parâmetro que deve ser analisado para a estimativa do tempo de enchimento do reservatório? Existe outro fator que contribui para acelerar o preenchimento do reservatório? Quais são os parâmetros que podem retardar e dificultar esse processo de enchimento?

Resolução da situação-problema

Com o intuito de auxiliá-lo na resolução do problema, lembre-se dos conteúdos abordados nessa seção e, acima de tudo, busque desenvolver seu pensamento crítico e treinar sua habilidade em solucionar problemas. Assim, para resolver o primeiro questionamento do prefeito, você deve refrescar sua memória sobre quais são as grandezas que caracterizam o escoamento superficial. Vimos que uma das principais variáveis estudadas é a vazão do curso d'água principal e, como nesse caso se trata de um pequeno córrego, que possui vazão na ordem de L/s, você deve fazer a mensuração desse parâmetro para ter uma estimativa do tempo de enchimento do reservatório.

No entanto, esse não é o único parâmetro que irá contribuir para o preenchimento. Para ajudá-lo a responder o segundo questionamento, vimos que a precipitação que cai sobre a área da bacia hidrográfica – ou, nesse caso, microbacia hidrográfica – irá ser direcionada de forma a convergir em direção ao córrego que se situa numa posição topográfica favorecida. No entanto, atente-se para o fato de que a recarga pela precipitação só será efetuada se o balanço hídrico for positivo e houver excedente hídrico.

Para solucionar todas as dúvidas lançadas, vimos que também há fatores que causam a perda de água. Nesse caso, é importante analisar quanto de água é perdida por evapotranspiração, que se

refere à água que volta à atmosfera em forma de vapor, e também devido à infiltração da água no solo, considerando as características de textura do solo e o tipo de cobertura vegetal.

Faça valer a pena

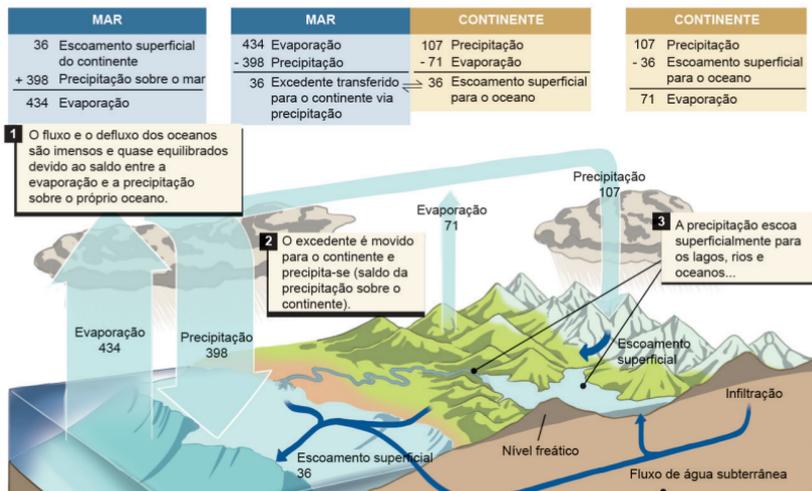
1. Em janeiro de 1997, o então presidente Fernando Henrique Cardoso sancionou a Lei nº9.433, a qual instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH). Nessa lei, um dos pressupostos incluídos no Art. 1º é de que a bacia hidrográfica é a unidade territorial para a implementação da política de recursos hídricos.

Sobre a bacia hidrográfica, sua definição, características e aspectos fisiográficos, assinale o que for correto.

- a) A bacia hidrográfica é delimitada pelos pontos de cota mais baixa, de onde as águas partem.
- b) Os divisores de água correspondem aos limites do território de abrangência de uma determinada bacia hidrográfica.
- c) A área e o formato da bacia não interferem no escoamento superficial total que ocorre dentro da bacia hidrográfica.
- d) O ponto de saída da bacia, para onde todas as águas convergem, é denominado de talvegue.
- e) A topografia da bacia influencia apenas na potencialização da ocorrência de movimentos de massa.

2. O ciclo hidrológico corresponde a um dos ciclos biogeoquímicos de maior importância para a manutenção de muitas atividades no nosso planeta, inclusive a nossa vida. Como o próprio nome denota, trata-se de um sistema fechado onde não há perda nem ganho, se considerarmos o globo como um todo. No entanto, a Figura 3.10, que traz alguns dados quantitativos sobre os elementos que fazem parte do ciclo, indica que a relação entre as entradas e saídas é dinâmica e variável no oceano e no continente.

Figura 3. 10 | Ciclo hidrológico, seus elementos fundamentais e quantificação da relação entre eles.



Fonte: Press et al. (2006, p. 315).

Sobre o ciclo hidrológico, e considerando a Figura 3.10, é possível afirmar que:

- I - A evaporação, em conjunto com a transpiração das plantas, correspondem ao fenômeno de evapotranspiração, elemento que causa a entrada de água no ciclo hidrológico.
- II - Se considerarmos a figura acima, temos que o balanço hídrico no oceano seria 0 (zero), e estaria em condição de equilíbrio.
- III - Segundo a figura acima, a totalidade da água em excedente (36) é transformada em escoamento superficial e não há infiltração, o que seria realisticamente impossível.
- IV - De acordo com a figura acima, a quantidade de água que evapora nos oceanos é aproximadamente 9% superior à quantidade que se precipita.

Considerando as assertivas expostas acima, analise-as e julgue qual das proposições abaixo é verdadeira:

- a) I e II, apenas.
- b) I, II e III, apenas.
- c) II e III, apenas.
- d) II, III e IV, apenas
- e) II e IV, apenas.

3. O escoamento superficial que ocorre dentro de uma bacia hidrográfica possui algumas grandezas, como a _____, parâmetro medido normalmente em m^3/s ou L/s. Além disso, para estabelecermos uma relação entre bacias, é comum utilizarmos a _____, cuja unidade é $\text{m}^3/\text{s}.\text{km}^2$. Já o _____ nos dá uma estimativa da porcentagem do volume _____ em comparação ao volume _____. Outro fator importante é a _____, que determina a altura que a lâmina d'água atingiu em um determinado momento relativo à um nível de referência.

Agora, analise o trecho acima e complete-o com as palavras que faltam para dar coerência ao texto.

- a) vazão específica / vazão / coeficiente de *runoff* / precipitado / escoado / altura linimétrica.
- b) vazão / vazão específica / coeficiente de *runoff* / escoado / precipitado / altura linimétrica.
- c) vazão específica / escoamento / coeficiente de infiltração / infiltrado / evaporado / escala linimétrica.
- d) vazão / vazão relativa / coeficiente de infiltração / precipitado / infiltrado / escala linimétrica.
- e) velocidade / velocidade relativa / coeficiente de decantação / decantado / infiltrado / altura linimétrica.

Seção 3.3

Fundamentos de hidrogeologia

Diálogo aberto

Para que consigamos desenvolver plenamente o assunto desta seção, precisamos ter na memória o que abordamos nas anteriores. Na primeira seção desta unidade, estudamos o processo de formação dos solos, suas características, classificação e a relação com a geologia de engenharia, e também vimos alguns métodos diretos e indiretos usados para investigar as características geológicas e geotécnicas dos terrenos. Na sequência, na segunda seção, apresentamos alguns assuntos relativos ao ciclo hidrológico, caracterizando seus elementos e apresentando conceitos de bacia hidrográfica e cálculo do balanço hídrico. Também vimos algumas grandezas que definem o escoamento superficial e abordamos o fenômeno da infiltração da água no solo. Agora, nessa terceira e última seção, trataremos das propriedades que caracterizam os aquíferos (como porosidade e permeabilidade), unidade hidrogeológicas, avaliação do escoamento da água subterrânea, análise da reação água superficial/subterrânea e, finalmente, estudaremos sobre hidrogeoquímica.

Agora, embora saibamos o que vamos estudar, é preciso revisar nosso contexto de aprendizagem apresentado no início dessa unidade e entender o que estamos fazendo. Como deve se lembrar, você está trabalhando como gerente de projetos de uma empresa que venceu a licitação para a implantação de um aterro sanitário numa cidade litorânea com solos de distintas características e com algumas particularidades ambientais. O objetivo é que, após o estudo, seja escolhido um local para a construção do aterro e, para isso, você dividiu o serviço em etapas. Na primeira etapa, você desenvolveu um estudo para compreender as características do solo da cidade onde será instalado o aterro sanitário. Na segunda etapa, por sua vez, você realizou o diagnóstico hidrológico do entorno, principalmente para compreender a dinâmica do ciclo da água na região. Agora, para finalizar seu estudo, você terá que

compreender a dinâmica das águas subterrâneas e analisar sua relação com as águas superficiais. Pensando nisso, você deve responder: Como ocorre a movimentação da água subterrânea e por que é importante saber disso? Qual parâmetro indica a rapidez do deslocamento da água no subsolo e por que devemos avaliá-la? Quais seriam as possíveis relações entre a água subterrânea e as águas superficiais e o que ocorreria se houvesse vazamento de chorume? Considerando todas as características apresentadas anteriormente, nas outras seções, e levando em conta os tipos de solo, as condições hidrológicas e hidrogeológicas, seria possível apontar um local mais adequado para instalação do aterro?

Agora é contigo, caro aluno! Como você poderia resolver essas perguntas? Lembre-se que sempre lhe auxiliaremos e, por isso, vamos expor no livro didático os principais conceitos ligados à dinâmica da água subterrânea, destacando o principal mecanismo responsável pelo deslocamento lateral da água na zona de saturação. Além disso, veremos qual a grandeza que exprime a velocidade da água no meio poroso e estudaremos como ocorre a comunicação entre a água subterrânea e superficial, destacando a influência que um exerce sobre o outro.

Não pode faltar

Na seção anterior estudamos o ciclo hidrológico, destacando seus elementos e de que forma eles se relacionam. Naquela oportunidade, demos destaque, em especial, para a água superficial e para o fenômeno da infiltração, água esta que irá alimentar os aquíferos. De agora em diante, portanto, vamos aprender sobre o mundo subterrâneo, que é o principal reservatório de água doce líquida de todo o globo terrestre. Para isso, vamos precisar compreender algumas características fundamentais das rochas e dos solos.

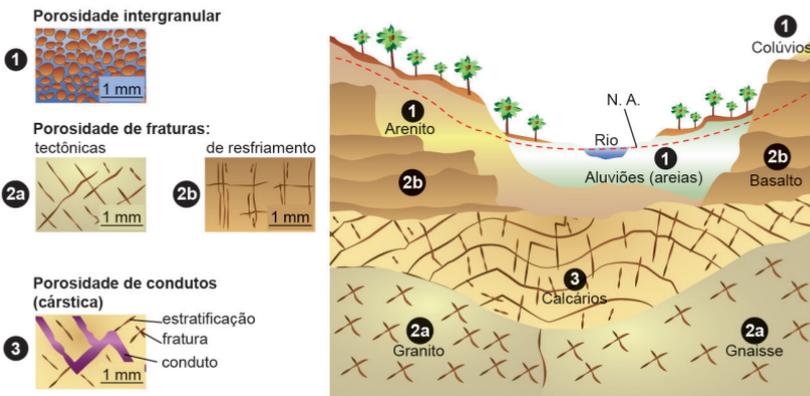
Existem duas propriedades básicas para que uma unidade geológica (camada ou conjunto de camadas de solo e/ou rocha) consiga armazenar e distribuir água no subsolo. A primeira delas é a porosidade (ϕ), que corresponde à razão formada pelo volume

de vazios (V_V) com relação ao volume total da rocha ou solo (V_T) multiplicado por cem (pois comumente nos referimos à esse valor em porcentagem). Em termos matemáticos, denotamos a porosidade como:

$$\phi = \frac{V_V}{V_T} * 100.$$

A porosidade consiste em espaços vazios (poros) que existem entre as partículas sedimentares, mas também pode estar associada às fraturas nas rochas ou até mesmo à dissolução sofrida após um evento diagenético. Normalmente, esses tipos de porosidade estão associados às rochas específicas, como demonstra a Figura 3.11. A porosidade intergranular está presente nos arenitos e solos, enquanto as porosidades em fratura são mais comuns em rochas como basalto, granito e gnaiss (por exemplo). Já a porosidade formada pela dissolução (cárstica) é comum nas rochas carbonáticas, como os calcários.

Figura 3.11 | Principais tipos de porosidade relacionados às rochas/solos que armazenam água subterrânea.



Fonte: Adaptado de Teixeira et al. (2003, p. 121).

Alguns valores comuns de porosidade são os seguintes: a) solo (em geral) – 55%; b) cascalho – 20 a 40%; c) areia – 25 a 50%; d) argila – 50 a 70%; e) arenito – 5 a 30%; f) calcários/dolomitos – 10 a

30%; e g) basalto fraturado – 5 a 40% (HEATH, 1983; WICANDER e MONROE, 2009).

A outra propriedade hidrogeológica de extrema importância é a **permeabilidade**, que se refere à qualidade da rocha em possibilitar a transmissão de fluidos. Essa variável depende a comunicação existente entre os poros de forma que somente os poros conectados permitem que a água movimente-se em subsolo. Em alguns livros, os termos permeabilidade e condutividade hidráulica (k) aparecem como sinônimos, o que representa um equívoco. A condutividade hidráulica (normalmente expressa em m/s) depende não somente das propriedades do solo/rocha, mas também do fluido que escoar no meio poroso. Nesse caso, ambos só podem ser considerados sinônimos se o mesmo fluido (p. ex., água) for analisado. Considerando essas duas propriedades, podemos distinguir quatro tipos de unidades hidrogeológicas, conforme mostra o Quadro 3.3.

Quadro 3.3 | Unidades hidrogeológicas conforme características de porosidade e permeabilidade das camadas.

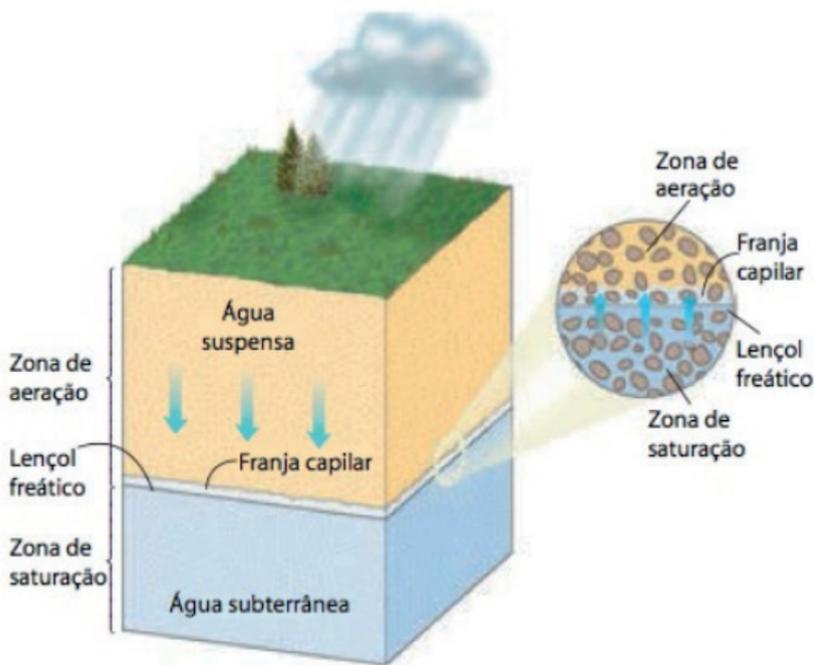
Unidade Hidrogeológica	Características
Aquífero	Unidade hidrogeológica capaz de armazenar e transmitir água subterrânea em quantidade suficiente para o abastecimento. Exemplo: arenito botucatu.
Aquiclude	Unidade hidrogeológica que, muito embora consiga armazenar água, não possui a capacidade de liberá-la devido à sua baixíssima permeabilidade. Exemplo: argila (sedimento) ou argilito (rocha).

Unidade Hidrogeológica	Características
Aquitarde	Unidade hidrogeológica capaz de armazenar água, no entanto a liberam muito lentamente, pois possuem porosidade e permeabilidade baixas. Exemplo: arenito com matriz argilosa.
Aquífugo	Unidade hidrogeológica que não possui capacidade de armazenar e tampouco de transmitir a água, pois não há porosidade e permeabilidade. Exemplo: basalto sem fraturas.

Fonte: elaborado pelo autor.

À medida que a água vai preenchendo os poros das rochas ou solo, os espaços vazios vão ficando saturados em água, preenchendo toda a porosidade. Isso acontece desde a base da unidade armazenadora em direção ao topo, até que se atinja um determinado limite. Essa distribuição da água em subsuperfície divide os aquíferos em duas zonas: a) zona de aeração, onde os poros são ocupados por ar; e b) zona de saturação, onde 100% do espaço poroso é preenchido por água e cujo topo delimita a chamada superfície freática (Figura 3.12). Entre essas duas zonas, desenvolve-se uma franja capilar, região na qual a água ascende por tensão superficial, aderindo à superfície dos minerais, num fenômeno similar ao que acontece quando encostamos levemente uma folha de papel sobre a água.

Figura 3.12 | Imagem ilustrando a divisão das zonas de aeração e zona saturada num aquífero.



Fonte: Wicander e Monroe (2009, p. 292).

Além disso, se analisarmos os aquíferos, podemos distingui-los de acordo com a pressão que a água presente em seus poros está submetida. Sendo assim, existem os aquíferos livres, suspensos, confinados e semiconfinados. Os aquíferos livres são aqueles nos quais a água está submetida à pressão atmosférica e, dessa maneira, restringe-se a profundidades rasas, de no máximo algumas dezenas de metros. Os aquíferos suspensos se instalam sobre aquitardes ou aquífugos, formando camas aquíferas restritas acima de um nível freático principal. Os aquíferos confinados ocorrem em situações no qual o aquífero está limitado, no topo e na base, por duas unidades pouco permeáveis ou impermeáveis, fenômeno comum em aquíferos profundos. O aquífero semiconfinado ocorre quando

a unidade acima do aquífero permite uma drenança vertical da água, que alimenta o aquífero subjacente, ainda que limitado por uma base impermeável.

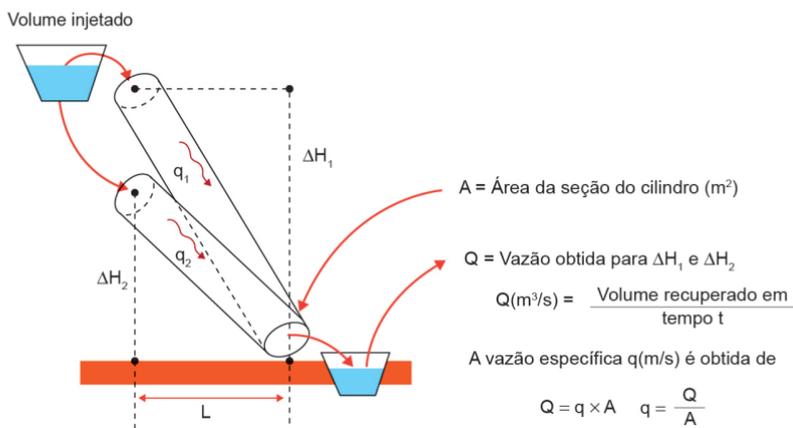


Assimile

Em algumas situações, os aquíferos confinados dão origem ao fenômeno do artesianismo. Nessas condições, a água que penetra no aquífero em porções profundas exerce uma pressão hidrostática superior à pressão atmosférica, causando o jorramento espontâneo da água quando um poço é perfurado nessa condição.

Esse comportamento da água, alimentando o aquífero a partir do movimento descendente das águas não é o único movimento que a água exerce. No subsolo, a água também se desloca lateralmente dentro da zona de saturação, mesmo que de maneira mais lenta que as águas superficiais, obviamente. Assim como nas águas superficiais, a água subterrânea também se movimenta pela diferença de gradiente hidráulico ($\Delta h / \Delta L$), ou seja, a razão entre o desnível (Δh) e a distância horizontal (ΔL) entre os dois pontos onde o nível é medido. No entanto, nas águas subterrâneas é imprescindível considerar a influência exercida pela permeabilidade e pela viscosidade e densidade da água. Essa relação foi investigada por Henry Darcy em 1856, o qual formulou a equação base de hidrologia dos meios porosos. No experimento, Darcy analisou como era o desenvolvimento da vazão (Q) que passava por um cilindro de área A e comprimento L , considerando diferentes gradientes hidráulicos, conforme mostra a Figura 3.13. Desse modo, ele definiu a vazão específica (q) do material, medida similarmente à velocidade.

Figura 3.13 | Demonstração do experimento executado por Darcy e as variáveis relacionadas ao fluxo em meios porosos.



Fonte: Adaptado de Teixeira et al. (2003, p. 124).

Assim, Darcy observou que a vazão específica é diretamente proporcional à condutividade hidráulica (ou permeabilidade, se considerado um mesmo fluido), de maneira a expressar a seguinte equação simplificada:

$$q = k \frac{\Delta h}{L} \text{ ou } \frac{Q}{A} = k \frac{\Delta h}{L}.$$

Nesse caso, k seria o coeficiente de permeabilidade que representa a facilidade de um meio poroso em transmitir o fluido. Considerando alguns materiais terrestres, temos que esse coeficiente varia desde 0,5 a 15 cm/dia para materiais permeáveis (como areia mal selecionada) até valores maiores que 100 m/dia, como em cascalhos bem selecionados e sem cimentação entre as partículas. Para rochas, os valores variam de poucas dezenas de centímetros por ano em litotipos pouco fraturados a até mais de 1.000 m/dia em rochas calcárias dissolvidas (TEIXEIRA, et al., 2003).

Na prática, a medição da condutividade hidráulica é realizada em campo, a partir de métodos específicos que se utilizam de poços perfurados sobre o solo ou rocha para a obtenção de informações. Um dos métodos mais utilizados é o denominado de *slug test* e consiste na inserção de um bastão de peso padronizado dentro de um poço, procedimento acompanhado pelo monitoramento do

aumento e posterior rebaixamento do nível d'água durante um certo intervalo de tempo. Com esses parâmetros conhecidos, aplicam-se fórmulas, como a de Hvorslev (1951).

$$k = \frac{r^2 \ln(L_e/R)}{2L_e T_0}$$

Onde: K – coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica (cm/s); r – raio do revestimento do poço (cm); R – raio do poço (cm); L_e – comprimento do filtro do poço (cm); e T_0 – tempo que leva para o nível d'água cair 37% da variação inicial.

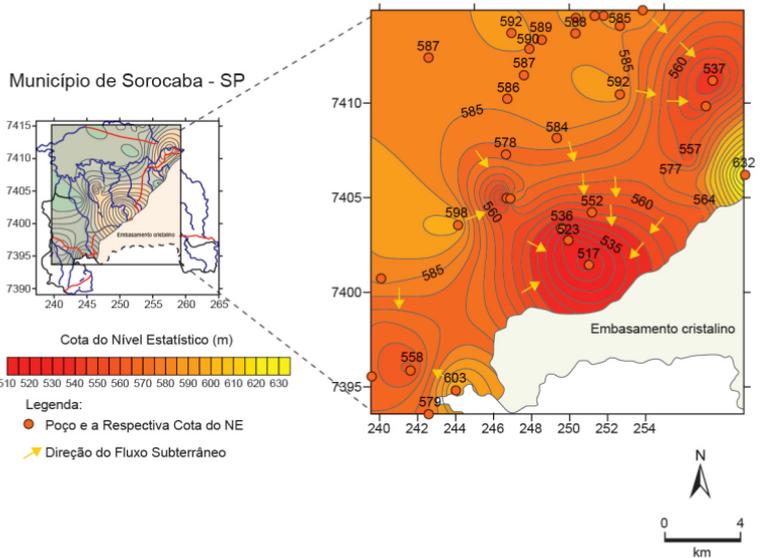
Adicionalmente ao método de medição da condutividade hidráulica em campo, o comportamento da água subterrânea também é diagnosticado por meio de mapas potenciométricos. Esse mapa corresponde a um produto cartográfico gerado por meio da leitura da profundidade do nível d'água subterrânea em poços, o que leva à determinação do topo da superfície freática. Esse registro, feito em no mínimo três pontos, permite a espacialização da superfície freática e o estabelecimento dos pontos de igual profundidade, identificando para onde o fluxo subterrâneo está se deslocando (do mais alto gradiente hidráulico para o mais baixo). Assim, as linhas equipotenciais, ou seja, as linhas de igual cota da superfície freática, demarcam pontos onde o nível é o mesmo, enquanto as linhas de fluxo, que são desenhadas perpendicularmente às equipotenciais, representam a direção de escoamento. Assim, com o mapa potenciométrico e os dados de condutividade hidráulica do aquífero, é possível formar um diagnóstico quantitativo do deslocamento da água subterrânea e avaliar a movimentação de possíveis poluentes associados à essa água.



Exemplificando

A Figura 3.14 exemplifica os elementos de um mapa potenciométrico, demonstrando as linhas equipotenciais, ou seja, as linhas que unem pontos de mesma cota da superfície freática, e as linhas de fluxo, que representam a direção de deslocamento das águas subterrâneas no aquífero em questão.

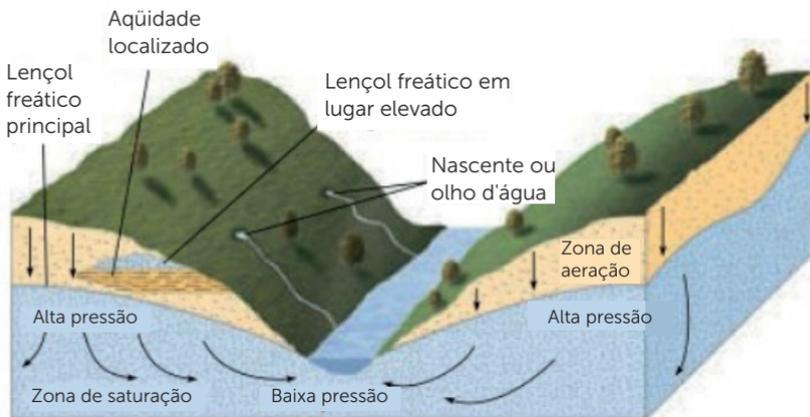
Figura 3. 14 | Mapa potenciométrico do Aquífero Tubarão, município de Sorocaba.



Fonte: Zanetti et al. (2010, p. 10).

Além dessa dinâmica subterrânea, as águas subterrâneas guardam uma estreita relação com as águas superficiais, afinal, como vimos na seção anterior, ambas são responsáveis pela manutenção do ciclo hidrológico. Por exemplo, quando a superfície freática ascende em direção à superfície do solo, seja por qualquer razão, ela pode aflorar, gerando nascentes ou olhos d'água, que dão origem a muitos rios e córregos (Figura 3.15).

Figura 3.15 | Bloco diagrama mostrando, de forma simplificada, a relação entre as águas superficiais e subterrâneas.



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

Contrariamente, em algumas ocasiões, o nível freático está tão baixo que é o próprio rio que contribui de forma a abastecer o aquífero. Dessa forma, temos duas contribuições possíveis e, conseqüentemente, duas terminologias distintas para os rios quanto à sua relação com as águas subterrâneas. No caso descrito anteriormente, os rios receberam o aporte de água subterrânea e, portanto, são denominados de efluentes. Nesse caso, uma grande porcentagem de sua vazão deve-se à alimentação dada pelo aquífero. Em contrapartida, no segundo caso, são os rios que alimentam os aquíferos, sendo denominados de influentes, pois eles influenciam na recarga de água subterrânea.



Refleta

Considerando a relação entre a água superficial e a subterrânea no ambiente urbano, qual seria o local aconselhado para a perfuração de um poço destinado ao abastecimento público?

Em ambos os casos, essa relação água subterrânea/superficial tem uma importância ambiental fundamental, tanto em zonas urbanas quanto rurais. Em zonas rurais com rios efluentes, existe o risco real de um contaminante presente na água subterrânea atingir um rio sem contaminação, principalmente devido a aplicação extensiva de defensivos químicos, prática comum na grande maioria das lavouras. Já em zonas urbanas, é comum o lançamento de esgoto nos rios que, em muitos casos, são influentes e, por consequência, encaminham essa poluição para o lençol freático, causando a alteração, principalmente, da qualidade microbiológica da água devido a presença de coliformes fecais. Outro problema comum associado à relação água subterrânea/superficial é vista em zonas costeiras, onde a superexploração do aquífero pode levar à infiltração da água salgada (intrusão salina), proveniente do mar, nos poços que captam água doce.

Considerando esse assunto, aliás, é importante entendermos a composição natural das águas subterrâneas, afinal sua constituição físico-química e bacteriológica é bem diferente das águas superficiais, a que estamos mais acostumados. A composição da água subterrânea reflete toda a trajetória que a água percorreu, desde sua infiltração até sua retirada por meio de um poço de abastecimento. Durante todo esse caminho, a água passou pelo solo, aumentando sua acidez e, portanto, diminuindo o seu pH. Isso porque o solo é rico em matéria orgânica e CO_2 , dois fatores que, associados, causam esse fenômeno. Com isso, como a maioria dos constituintes mineralógicos dos solos e das rochas são mais suscetíveis à dissolução em águas ácidas, a água subterrânea incorpora em sua constituição íons provenientes dos minerais.

Dessa forma, águas subterrâneas que em sua trajetória passaram majoritariamente por rochas graníticas ou calcárias possuirão composição distintas daquelas que percolaram nas rochas basálticas, por exemplo. O Quadro 3.4 apresenta alguns minerais constituintes das rochas citadas e os respectivos íons que elas liberam quando em contato com a água.

Quadro 3.4 | Exemplo de alguns minerais e os íons liberados por eles em contato com a água

Mineral	Íons	Mineral	Íons
Plagioclásio	Na^+ e Ca^{2+}	Microclínio	K^+
Hornblenda	Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}	Apatita	Cl^- e Ca^{2+}
Calcita	Ca^{2+}	Alanita	Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}
Muscovita	K^+	Epidoto	Ca^{2+}
Biotita	K^+ e Mg^{2+}	Titanita	Ca^{2+}
Granada	Ca^{2+} e Mg^{2+}	Clorita	Mg^{2+}

Fonte: Feitosa e Manoel Filho (2000, p. 87).

Como é possível notar no Quadro 3.4, há muitos íons comuns, de forma que, quimicamente, as águas subterrâneas são compostas por ânions e cátions principais. Dentre os cátions, destacam-se o sódio, potássio, cálcio e magnésio; enquanto que dentre os ânions, os principais são o cloreto, sulfato (SO_4^{2-}), bicarbonato (HCO_3^-) e nitrato (NO_3^-). Além desses íons, as águas subterrâneas sempre possuem uma determinada quantidade de bactérias heterotróficas e coliformes (totais e termotolerantes), embora esses últimos parâmetros indiquem a não potabilidade da água. Além desses constituintes, existem também outros secundários muito comuns, como o fosfato (PO_4^{3-}), manganês, boro, zinco, entre outros, e alguns parâmetros que normalmente indicam contaminação, como o cobre, chumbo, cádmio, arsênio, bário, selênio, etc.



Para conhecer alguns valores limites de potabilidade, dê uma olhada nas tabelas localizadas no anexo da Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde, que estabelece o padrão de qualidade da água para consumo humano.

BRASIL. Portaria nº 2.914/2011. **Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.** Brasília, DF, dez 2011. Disponível em: <http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html>. Acesso em: 28 de nov de 2017.

Sem medo de errar

Antes de apresentarmos a vocês a solução dos questionamentos lançados no início da seção e encaminharmos a conclusão do estudo locacional para implantação do aterro sanitário, é necessário lembrarmos o contexto apresentado no início.

Lembre-se que você deve realizar o estudo locacional para a instalação de um aterro sanitário numa cidade litorânea, que contém solos aluvionares e solos residuais de rochas basálticas (latossolo) e graníticas (neossolo). Além disso, esta área está próxima a regiões com montanhas relativamente elevadas e também próxima ao mar, possuindo rios que partem das montanhas nas áreas mais internas do continente e levam as águas até o mar. Para organizar esse estudo, você dividiu as tarefas em três etapas, com o objetivo de segmentar os estudos para compor, agora, uma conclusão final. As duas primeiras etapas já foram realizadas, agora resta esta última, que compreende conhecer a dinâmica das águas subterrâneas e analisar sua relação com as águas superficiais. Para isso, você deverá esclarecer alguns pontos: como ocorre a movimentação da água subterrânea e por que é importante saber disso? Qual parâmetro indica a rapidez do deslocamento da água no subsolo e por que devemos avaliá-la? Quais seriam as possíveis relações entre a água subterrânea e as águas superficiais, e o que ocorreria se houvesse

vazamento de chumbo (contaminante)? Considerando todas as características apresentadas anteriormente, nas outras seções, e levando em conta os tipos de solo, as condições hidrológicas e hidrogeológicas, seria possível apontar um local mais adequado para instalação do aterro?

Com relação ao seu primeiro questionamento, é importante destacar alguns aspectos que aprendemos sobre o escoamento em meios porosos. A facilidade de fluxo subterrâneo está relacionada com a permeabilidade do solo ou das rochas, grandeza medida por meio da aplicação do conceito elaborado por Darcy. Essa propriedade intrínseca irá definir a velocidade do escoamento, muito embora a movimentação da água esteja ligada a diferença de gradiente hidráulico entre dois pontos no terreno. Por isso, o gradiente hidráulico ($\Delta h / \Delta L$), ou seja, a razão entre o desnível (Δh) e a distância horizontal (ΔL) entre os dois pontos onde o nível é medido corresponde ao mecanismo de deslocamento da água na zona de saturação, isto é, a porção do subsolo onde 100% do espaço poroso está ocupado por água. Nesse sentido, a água se deslocará do gradiente hidráulico mais alto para o mais baixo, seguindo uma lógica similar à tendência de movimentação da água superficial. A importância da avaliação está relacionada ao conhecimento da direção para a qual possíveis contaminantes, vazados do aterro e dissolvidos na água subterrânea, possam se deslocar. Assim, saberemos, espacialmente, o local de deslocamento.

Sobre o seu segundo questionamento, aprendemos que há dois parâmetros importantes na quantificação da rapidez do deslocamento da água subterrânea. A permeabilidade permite identificar a facilidade com que o fluido irá escoar no meio poroso, sendo uma característica do próprio material. Sua unidade é o Darcy (ou mD, milidarcy), e está relacionado à condutividade hidráulica, outra propriedade utilizada para mensurar a velocidade de escoamento em meios porosos. No entanto, a condutividade hidráulica não corresponde igualmente à permeabilidade, já que o valor não será o mesmo se diferentes fluidos forem analisados. Por exemplo, a condutividade hidráulica de um solo arenoso não será a mesma para a água ou óleo, visto que esses dois fluidos possuem viscosidade e densidades diferentes. No entanto, na prática, o parâmetro mais utilizado é a condutividade hidráulica,

considerando que analisamos, em hidrogeologia, apenas a água como fluido, considerando que a mesma não esteja contaminada. Em campo, essa propriedade é mensurada por diversos métodos, sendo o *slug test* o mais comumente aplicado. Pensando no nosso caso prático, saber a velocidade de deslocamento da água subterrânea auxiliaria a estimar a agilidade com que medidas mitigadoras devem ser implantadas, de forma a evitar possíveis conflitos de uso da água com instalações próximas, moradores que captam água subterrânea perto ou até mesmo para evitar que o contaminante se desloque para os rios, poluindo-os e causando degradação de sua qualidade natural.

Já sobre o terceiro ponto, vimos que as águas superficial e subterrânea se comunicam de distintas formas. Primeiro, a água subterrânea pode contribuir com o escoamento superficial, alimentando a vazão dos rios. Nesse caso, como o corpo d'água superficial recebe aporte subterrâneo, o rio passa a ser denominado de efluente. Isso é comum em áreas onde o lençol freático aflora, dando origem às nascentes ou olhos d'água. Outra relação possível é quando o lençol freático recebe aporte de água proveniente dos rios, fazendo com que a recarga do aquífero seja influenciada pela água superficial. Nesse caso o rio recebe o nome de influente, já que influi no funcionamento da água subterrânea. Em regiões litorâneas, existe uma outra relação possível com o mar. Nesses locais, é comum, muitas vezes por causa da instalação de poços, que o gradiente hidráulico seja modificado e, em vez da água subterrânea seguir sua trajetória em direção do mar, ocorra uma inversão de fluxo e a água salgada do mar escoar em direção ao continente. Portanto, é importante conhecer as variáveis associadas à interação água superficial/subterrânea para conhecer de que forma ambas estão conectadas, pois isso poderá impactar áreas externas a um aterro, caso haja uma contaminação do lençol freático. Além disso, como sabemos, a água subterrânea se desloca a uma velocidade menor que a água superficial, assim, quando um contaminante atinge o curso hídrico superficial, ele se desloca muito mais rapidamente, podendo atingir locais distantes em um curto período de tempo. Ainda pior, o contaminante pode se deslocar para o mar, podendo afetar os banhistas e a biodiversidade marinha.

Por último, finalizando o estudo, lembre-se que os latossolos possuem uma espessura maior de *solum* e, normalmente, tendem a apresentar boa drenagem. Logo, a água superficial consegue escoar e a água infiltrada não atinge prontamente o lençol freático, o que permite uma certa filtragem de possíveis contaminantes. Sobre o regime hidrológico, o local deve, preferencialmente, estar situado em condições de boa distribuição hídrica, sem ocorrência anormal de eventos climáticos, e inserido numa bacia hidrográfica de pequena área de captação e não compacta. Já sobre as condições da água subterrânea, deve-se respeitar um local que atenda as ponderações mencionadas acima. Com isso, analisando brevemente essas situações, aconselha-se instalar o aterro sobre um latossolo e, preferencialmente longe de rios e do mar. Dessa forma, você terá uma boa ideia locacional para implantação do aterro, mas esteja ciente de que, muitas vezes, são necessários outros estudos adicionais, a depender a situação. De qualquer forma, todo o conteúdo apresentado aqui, propiciará um bom embasamento para você finalizar o seu desafio.

Avançando na prática

Hidrogeologia e a mineração

Descrição da situação-problema

Imagine-se numa situação como essa: a empresa de mineração de ouro em que você trabalha recebeu uma notificação do Ministério Público (MP) do Estado pedindo esclarecimentos sobre uma denúncia encaminhada ao órgão pelos moradores de um bairro vizinho à área onde está instalada a mina à céu aberto. Segundos os vizinhos, que possuem poços tubulares profundos, popularmente conhecidos como artesianos, para abastecimento de suas necessidades diárias, a água que chega em suas casas está contaminada devido à negligência da empresa de mineração. Dessa forma, o MP deseja que seja apresentado um estudo conclusivo de diagnóstico das condições da água subterrânea extraída pelos

moradores. Esse estudo passará pela avaliação de um corpo técnico, externo à empresa, delegado pelo MP, para emitir um parecer sobre o estudo desenvolvido pela sua empresa. Você foi convocado pelo seu diretor a desenvolver tal estudo, aproveitando para lhe questionar sobre algumas coisas: como é possível determinar se a água subterrânea está se deslocando em direção ao bairro? Como determinamos a velocidade da água subterrânea que se desloca em profundidade? Quais parâmetros da água podem indicar a contaminação do aquífero explotado pelos moradores?

Resolução da situação-problema

Para que você consiga dar seu posicionamento para o diretor da empresa e definir o que deve ser feito para apresentação do estudo, você deve se lembrar do que abordamos nesta seção, principalmente sobre a condutividade hidráulica, mapa potenciométrico e hidrogeoquímica. Com relação a isso, e já buscando responder ao primeiro questionamento, destacamos que a determinação do deslocamento da água passa pela análise da espacialização da superfície freática, identificando no terreno os pontos onde ela se encontra com gradiente hidráulico mais baixo ou mais alto. Nesse caso, é necessário conhecer a profundidade da superfície freática através de poços para que seja possível a confecção do mapa potenciométrico, principal ferramenta para a definição da direção de escoamento da água subterrânea. Como a água flui do gradiente hidráulico mais alto para o mais baixo, você poderá diagnosticar se o fluxo subterrâneo se move em direção ao bairro. Segundo, a velocidade da água subterrânea é avaliada por meio da condutividade hidráulica, sendo um dos testes mais executados o método do *slug test*, cujo resultado pode ser interpretado pela equação de Hvorslev (1951). Esse procedimento dará uma estimativa da taxa de deslocamento da água e também do tempo até ela atingir (ou não) o bairro. Por último, vimos que alguns parâmetros, como cobre, chumbo, cádmio, arsênio, bário e selênio podem indicar contaminação da água, algo que deve ser investigado com atenção.

Faça valer a pena

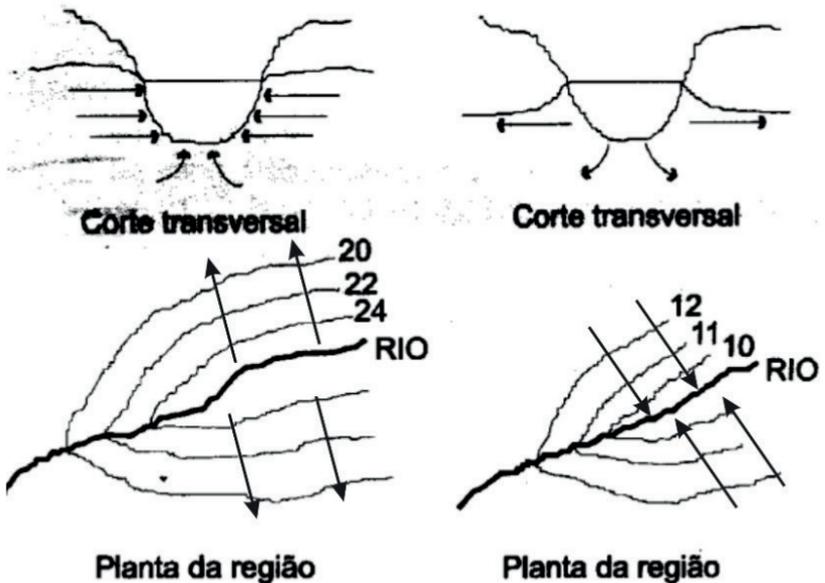
1. Os aquíferos são considerados reservas de água estratégica, pois servem de desafogo para períodos de seca extrema, mantendo um nível de disponibilidade aceitável. No entanto, cada vez mais esse recurso tem sido usado de forma não planejada, sendo explorado de forma descontrolada.

Considerando as características de um aquífero, é possível afirmar que:

- a) Aquíferos em rochas calcárias possuem a porosidade intergranular como predominante.
- b) A porosidade corresponde à porcentagem da área ocupada pelos espaços vazios em relação à área total da rocha/solo.
- c) A permeabilidade refere-se à facilidade da rocha/solo em transmitir um fluido, sendo uma propriedade intrínseca do material.
- d) O aquífugo é a hidrogeológica capaz de armazenar água, mas de liberá-la muito lentamente.
- e) Condutividade hidráulica e permeabilidade são sinônimos, independentemente da situação.

2. A relação entre as águas superficiais e subterrâneas era, até pouco tempo, desconhecida ou até mesmo negligenciada. No entanto, com o passar dos anos, percebeu-se que ambas estavam interligadas e que em muitos aspectos possuíam uma dinâmica muito estreita. Dessa forma, os rios passaram a receber denominações específicas conforme sua relação com as águas subterrâneas. Para exemplificar de forma mais didática, expomos a Figura 3.16 como ilustração.

Figura 3. 16 | Imagem representativa da relação entre a água subterrânea e a superficial.



Fonte: adaptada Feitosa e Manoel Filho (2000, p. 49).

Considerando a Figura 3.16, assinale a alternativa que descreva corretamente a situação do rio e a sua denominação.

- A imagem "A" exemplifica numa visão em corte de um rio efluente, cuja visão em planta é mostrada em "I".
- A imagem "A" exemplifica numa visão em corte de um rio efluente, cuja visão em planta é mostrada em "II".
- A imagem "A" exemplifica numa visão em corte um rio influente, cuja visão em planta é mostrada em "II".
- A imagem "B" exemplifica numa visão em corte um rio efluente, cuja visão em planta é mostrada em "I".
- A imagem "B" exemplifica numa visão em corte um rio influente, cuja visão em planta é mostrada em "I".

3. O estudo da dinâmica das águas subterrâneas é muito importante na mineração e engenharia civil, principalmente na definição da direção de percolação das águas, projetos de rebaixamento do lençol freático, avaliação do avanço da pluma de contaminação, extensão do cone de rebaixamento, entre outras aplicabilidades. Considerando esse assunto, analise as alternativas abaixo:

- I - Na zona de saturação do solo, a água subterrânea movimenta-se lateralmente pela diferença de gradiente hidráulico.
- II - A permeabilidade de um solo aluvionar, composto principalmente por areias modernamente selecionadas, será diferente considerando como fluido que escoar sobre esse meio a água ou um óleo.
- III - A água subterrânea que percola nas rochas basálticas e graníticas terá composição idêntica à de um rio que escoar sobre um leito rochoso de composição litológica exatamente igual.

Considerando as asserções acima, assinale a alternativa verdadeira:

- a) Estão corretas as alternativas I e II, apenas.
- b) Estão corretas as alternativas I e III, apenas.
- c) Estão corretas as alternativas I, II e III.
- d) Está correta a alternativa I, apenas.
- e) Todas as alternativas estão erradas.

Referências

Seção 1

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. – Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006.

IBGE. **Manual técnico de pedologia**. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 2. Ed. - Rio de Janeiro: IBGEManuais técnicos em geociências, ISSN 0103-9598; n4). 323p., 2007.

SOBREIRA, F. G.; SOUZA, L. A. **Cartografia geotécnica aplicada ao planejamento urbano**. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, São Paulo, n. 2, p. 79-97. 2012. Disponível em: http://www.abge.org.br/uploads/revistas/r_pdf/RevistaABGE-art3.pdf.

SOIL taxonomy: **a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys**. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, 1975. 754 p. (Agriculture handbook, n. 436).

SOIL survey manual. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, 1984. cap.1. (Agriculture handbook, n. 430).

TOLEDO, M. C. M. **Intemperismo e pedogênese**. Disponível em: https://midia.atp.usp.br/impressos/lic/modulo02/geologia_PLC0011/geologia_top07.pdf. Acesso em: 07 dez. 2017.

Seção 2

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

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm. Acesso em: 21 de dez 2017.

BRASIL. Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT – **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios**. Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007. 176 p.

MELO, D. C. D.; CABRERA, M. C. M.; WENDLAND, E. **Balço hídrico e modelagem computacional visando estimar recarga subterrânea**. Águas Subterrâneas, v. 31, p. 66-78, 2017.

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

SCHERER, C. M. S. **Ambientes Fluviais**. In: Pedreira da Silva, A.J.C.L.; Aragão, M.A.N.F.; Magalhães, A.J.C.(Org.). **Ambientes de Sedimentação do Brasil**. Rio de Janeiro: PETROBRAS, p. 102-130, 2008.

SOLO na Escola - Infiltração da água no solo (11/05/16). Disponível em: <https://youtu.be/WCdRZBJMzAA>. Acesso em: 18 de nov de 2017.

TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T.R.; TOLEDO, M.C.; TAIOLI, F. ed. **Decifrando a Terra**. São Paulo, Oficina de Textos, 557 p., 2003.

Seção 3

BRASIL. Portaria n°2.914/2011. **Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**. Brasília, DF, dez 2011. Disponível em: http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html. Acesso em: 28 de nov de 2017.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia: Conceitos e aplicações**. 2a Edição. CPRM Serviço Geológico Nacional, 404 p., 2000.

HEATH, Ralph C. **Basic ground-water hydrology**. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2220, 86 p., 1983.

HVORSLEV, M. J. **Time lag and soil permeability in ground water observations**. Bulletin Army Corps of Engineers Waterway Experimentation Station, U.S. n. 36, 1951.

TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T.R.; TOLEDO, M.C.; TAIOLI, F. ed. **Decifrando a Terra**. São Paulo, Oficina de Textos, 557 p., 2003.

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

ZANETTI, N.; GALEMBECK, O.; ROSA RODRIGUES, V. Utilização de SIG para gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos: uma aplicação no município de Sorocaba-SP. **Anais...** do II Simpósio "Experiências em Gestão dos Recursos Hídricos por Bacia Hidrográfica". Atibaia/SP, nov. 2010.

Recursos minerais e energéticos

Convite ao estudo

Na unidade anterior aprendemos sobre a formação dos solos, suas características pedológicas e classificação. Vimos também sobre o ciclo hidrológico, seus elementos e sua dinâmica, dando especial enfoque nas águas que infiltram, ou seja, aquelas que irão (re)abastecer os aquíferos. Por último, estudamos melhor o comportamento da água subterrânea, sua relação com a água superficial e sua composição hidroquímica. Agora, nesta última unidade, vamos estudar alguns conceitos importantes da área de geologia econômica, abordando, também, assuntos relacionados à terminologia técnica e característica genérica dos depósitos minerais. Depois, veremos alguns dos principais exemplos de depósitos formados em distintos ambientes geológicos, enfatizando as principais características de cada depósito. Para finalizar, abordaremos sobre os recursos energéticos convencionais, como petróleo, carvão e gás natural, bem como os não-convencionais (energia geotérmica, *shale gas*, etc.), apresentando os problemas ambientais derivados de sua exploração.

Para aprender esses assuntos de forma prática, vamos idealizar uma situação contextualizada, como já estamos acostumados. Imagine que a empresa de exploração mineral em que você trabalha executou, durante 5 (cinco) anos, os projetos da fase de prospecção e definição de alvos e, enfim, definiu um novo local para implantação de uma mina. Neste local, de características geológicas únicas, os geólogos e engenheiros da empresa identificaram a possibilidade de exploração de dois recursos minerais principais: carvão e

ouro (que se encontra alojado em veios de quartzo presentes em um corpo granítico que intrudiu nas rochas carbonosas). Apesar da intrusão ter afetado boa parte do depósito de carvão, uma boa quantidade de carvão foi avaliada, sendo de boa qualidade para ser extraído. Nesse sentido, você ficou responsável pela confecção de um memorial descritivo que orientará os projetos futuros para que a atividade saia do papel. Esse material deve possuir a maior quantidade possível de informações pertinentes para os planejadores e, inclusive, para os investidores do empreendimento. Para executar esse trabalho, no entanto, você dividiu a confecção do memorial em três etapas: **i)** apresentação dos principais conceitos relacionados ao depósito encontrado; **ii)** apresentação do modelo geológico descritivo que gerou a concentração de ouro e **iii)** descrição do processo de formação dos depósitos de carvão, análise prévia de sua qualidade e menção dos possíveis impactos ambientais causados pela sua extração (e de ouro também).

Sobre esse assunto, naturalmente, algumas dúvidas surgiram: Quais são os recursos e quais são as reservas da área a ser explorada? Quais seriam os minerais de minério e quais são os minerais de ganga? Quais as características formativas dos minérios a serem explorados? Quais os problemas ambientais provenientes da exploração desses recursos minerais?

Essas e outras perguntas guiarão você neste estudo e devem ser consideradas para que a produção do memorial descritivo seja realizada com sucesso. Para te ajudar, vamos aprender, nesta unidade, os principais conceitos relacionados à geologia econômica, formação de depósitos minerais, gênese de depósitos energéticos convencionais, não-convencionais e alternativos bem como os problemas ambientais ocasionados por sua extração. Boa leitura!

Seção 4.1

Introdução à geologia econômica

Diálogo aberto

Aluno, nesta seção vamos começar nosso estudo sobre a geologia econômica, o ramo da geologia que se dedica ao conhecimento dos materiais geológicos que podem ser usados para benefício econômico e industrial. Para isso, é importante conhecermos alguns conceitos fundamentais, como recurso e reserva, analisando a relação entre um e outro, bem como os fatores que interferem na transformação de um recurso em uma reserva. Depois veremos o que é o fator de concentração e qual sua aplicação na definição da viabilidade econômica de um depósito. Também analisaremos, genericamente, quais são os fatores que convergem para a geração de um depósito mineral e o que são minerais de minério e de ganga. Além disso, veremos que os minérios são classificados em metálicos e não-metálicos, uma divisão baseada em sua aparência e composição, mas que reflete, também, seu valor econômico agregado. Por último, discutiremos brevemente sobre a forma de ocorrência dos depósitos minerais, destacando os dois tipos de concentração mineral.

Antes de avançarmos, no entanto, vamos relembra o desafio apresentado no início da unidade. Nele, lançamos um contexto hipotético em que você trabalha numa empresa de exploração mineral que, durante alguns anos, executou um programa de prospecção mineral cuja etapa final culminou na definição de uma mina de carvão e ouro. Sobre isso, você ficou responsável pela confecção de um memorial descritivo que orientará os projetos futuros para que a atividade saia do papel – material que também deverá ser apresentado aos planejadores da empresa e aos potenciais investidores. Para ajudar no desenvolvimento do seu trabalho, você dividiu tal tarefa em algumas etapas, sendo que, nessa primeira parte, você deverá apresentar os principais conceitos relacionados ao depósito encontrado, e quanto a isso, algumas ponderações são importantes: **O que é fator de concentração e**

qual deve ser o seu valor provável (relativo ao ouro) para que a mina entre em desenvolvimento de forma rentável? Quais são alguns dos minerais de minério e de ganga a serem encontrados na mina? Quais são as formas de disposição do corpo de minério da mina e quais suas particularidades?

Agora é com você! Está preparado para resolver essas questões? Se não estiver, não se preocupe, pois estamos aqui para ajudá-lo. No livro didático vamos mostrar que o fator de concentração é um método para estimar, com relação à tendência do mercado e ao avanço tecnológico, a viabilidade de um depósito mineral ser produtivo, possuindo um valor específico para cada substância mineral. Além disso, considerando a breve descrição da geologia da mina, veremos o que são minerais de minério e de ganga e quais são os prováveis a serem encontrados na mina. Posteriormente, apresentaremos os principais tipos de distribuição dos minérios de interesse do ponto de vista geológico identificando as particularidades de cada modo de concentração. Por isso, não dê bobeira e comece já a prospectar novos conhecimentos!

Não pode faltar

A última unidade da nossa disciplina discute um tema fundamental para o desenvolvimento da nossa sociedade, os recursos naturais e energéticos. Nesse sentido, a evolução tecnológica que tem sustentado nosso estilo de vida atual, é totalmente dependente de recursos que permitem esse avanço. Por isso, a exploração de minerais, minérios e recursos energéticos tem sua demanda cada vez mais intensificada, um assunto que alavanca intensas discussões.

Independentemente disso, no entanto, é inegável que os recursos que extraímos da Terra ainda sejam imprescindíveis e, muito provavelmente, ainda o serão pelas próximas décadas. A diferença é que a futura indústria de exploração desses bens naturais aplicará mais tecnologia e inovações para diminuir o impacto que a atividade gera no meio ambiente, descobrindo novas reservas minerais ou energéticas.

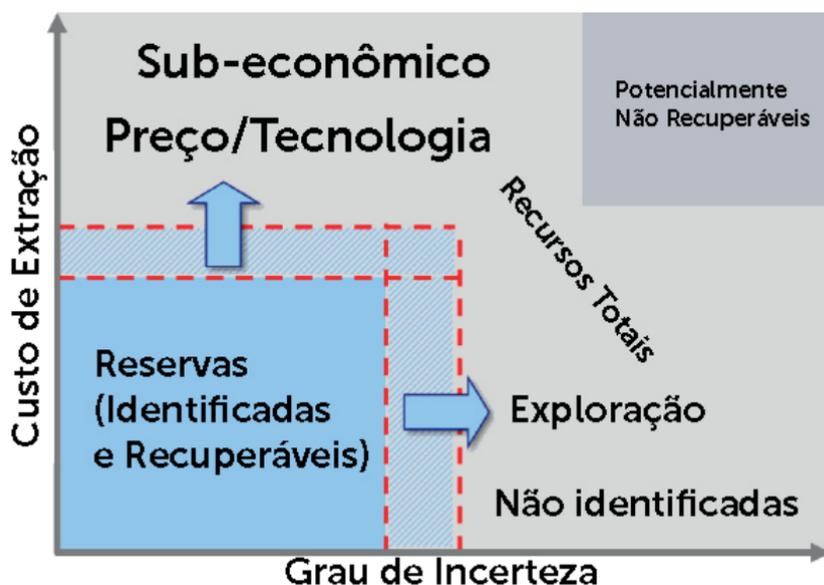
Nesses dois parágrafos acima apresentamos dois conceitos diferentes, você notou? Pois bem, trata-se dos conceitos de recursos e reservas, dois nomes que devem ficar bem claros para que consigamos avançar no nosso estudo. Os **recursos** são qualificados como todos os bens minerais e energéticos que efetivamente ou potencialmente possam ser úteis ao ser humano e, conseqüentemente, dotados de algum valor econômico. Nesse sentido, o recurso pode ser algo pontual, restrito a pequenas porções da crosta terrestre, ou estar espalhado em diversos pontos do globo. Quando contabilizado, entretanto, geralmente nos referimos a recursos como um somatório da quantia disponível de material ou energia armazenada existente.

As **reservas**, por sua vez, referem-se à parte do recurso em que o volume, o grau de conhecimento de sua extensão, a demanda de mercado, o custo de produção e o preço de comercialização são tão favoráveis que sua exploração se torna viável. Por isso, as reservas incluem uma parte de algum recurso que foi avaliado e, a partir dessa avaliação e definição, percebeu-se que sua retirada poderia trazer lucro. Como pode-se perceber, portanto, a definição de uma reserva exige uma série de estudos, sendo bem mais detalhado que quando se define um recurso. No entanto, a relação recursos e reservas é extremamente dinâmica e, muitas vezes, a transição entre um e outro é momentânea.

A Figura 4.1 demonstra de que forma essa dinamicidade ocorre, analisando os principais fatores envolvidos nesse processo. Por exemplo, quando analisamos os custos de extração e o grau de incerteza sobre a extensão da jazida e viabilidade e concluímos que são mínimos, temos as reservas identificadas e recuperáveis, representadas pelo quadrado no canto inferior esquerdo do gráfico. Quando o grau de incerteza geológica é baixo, ou seja, quando é conhecida a extensão da jazida, mas o custo de extração é alto, temos recursos subeconômicos, isto é, ainda não é viável sua exploração. É o que demonstra a área do canto superior esquerdo do gráfico. Por outro lado, quando o conhecimento geológico está mal estabelecido (e, conseqüentemente, o grau de incerteza da jazida é alto), mas o custo de extração é baixo, temos os recursos não identificados, definindo recursos que não podem ser

aproveitáveis nesse momento. Por último, quando tanto a incerteza quanto o custo de extração forem altos, classificamos os recursos como potencialmente não recuperáveis.

Figura 4. 1 | Relações dinâmicas entre recursos e reservas



Fonte: <<https://people.hofstra.edu/geotrans/eng/ch5en/appl5en/img/resourcesreserves.gif>>. Acesso em: 9 de dez. 2017.

A mesma Figura 4.1 também traz as variáveis responsáveis pela transição entre as reservas e os recursos. Assim sendo, em muitos casos, um recurso não identificado se transforma em reserva porque houve investimento em exploração geológica, reduzindo o grau de incerteza e quantificando sua viabilidade em relação ao custo de extração, que pode estar associado à invenção de novas tecnologias de extração ou redução no custo de retirada do recurso ou de ambos simultaneamente. Aliás, a tecnologia e o preço de mercado também são os principais contribuidores para a transformação de recursos subeconômicos - aqueles que já possuem um grau de incerteza quantificado, uma vez que sua geologia é conhecida - em reservas identificadas e recuperáveis.

Em se tratando de recursos minerais, um estudo detalhado pode levar à consolidação da viabilidade técnica-econômica de um depósito mineral, isto é, um corpo geológico com um volume rochoso enriquecido em substâncias minerais e/ou químicas concentradas de modo anormal, se comparado com sua média de concentração na crosta terrestre, e cuja quantidade é economicamente rentável. Nesse sentido, quanto maior o teor da substância alvo de exploração, maior a potencialidade do depósito mineral se tornar uma jazida mineral (depósito que possui teor, quantidade, infraestrutura e localização que permite aproveitamento econômico rentável).



Assimile

O teor refere-se ao grau de concentração, geralmente expresso em porcentagem ou partes por milhão (ppm), da massa de uma determinada substância mineral ou química em relação à massa total da rocha em que ela se encontra. Alternativamente, analisa-se o teor com relação à concentração média do elemento ou substância mineral na crosta terrestre.

Assim, como podemos perceber, a gênese ou origem de um depósito mineral está ligada ao enriquecimento, por processos geológicos, de uma determinada porção rochosa, aumentando sua concentração média de uma substância mineral em relação ao seu valor médio na crosta. Dessa forma, a razão entre o conteúdo (teor) de uma substância num mineral de minério (teor_{minério}) e a sua abundância na crosta (média_{crosta}) é denominado de fator de concentração (f.c.), que pode ser matematicamente expresso da seguinte forma:

$$\text{f.c.} = \text{teor}_{\text{minério}} / \text{média}_{\text{crosta}}$$



Exemplificando

Para exemplificar, vamos observar a Tabela 4.1, que representa o f.c. de algumas substâncias importantes na sociedade moderna.

Tabela 4. 1 | Fator de concentração de alguns elementos economicamente importantes

Elemento	Abundância na crosta (Porcentagem em peso)	Fator de concentração (f.c.)
Alumínio	8,00	3-4
Ferro	5,8	5-10
Cobre	0,0058	80-100
Níquel	0,0072	150
Zinco	0,0082	300
Urânio	0,00016	1.200
Chumbo	0,00010	2.000
Ouro	0,0000002	4.000

Fonte: Press et al. (2006, p. 567).

Analisando esse quadro, é possível notar que o f.c. do ferro, por exemplo, que possui uma concentração média na crosta terrestre de 5,8%, é entre 5 e 10. Isso significa que, para um depósito de ferro se tornar uma jazida de ferro lucrativa, sua concentração em determinada localidade deve ser entre cinco e dez vezes maior à sua abundância na crosta. Nesse mesmo sentido, substâncias mais raras, como urânio e ouro, por exemplo, necessitam de um f.c. milhares de vezes maior que a concentração média do elemento na crosta.

Notavelmente, o f.c. é dependente, também, dos custos de extração e tecnologias empregadas no processo de lavra mineral, bem como do preço de mercado da substância. Dessa forma, o f.c. é variável de ano a ano e reflete as mudanças que ocorrem no setor de mineração. Utilizando a mesma variável, também é possível perceber que os processos que geram os depósitos de ouro e chumbo, por exemplo, precisam ser mais eficientes do que aqueles que geram os depósitos de alumínio e ferro. Mas como ocorre esse aumento na concentração?

Os fatores envolvidos no processo de enriquecimento são variáveis e dependem das rochas e dos processos geológicos

envolvidos num determinado local. São esses processos geológicos, que podem ocorrer concomitantemente ou sucessivamente, que geram condições especiais que conduzem à concentração de substâncias úteis num fenômeno denominado mineralização. Para que isso ocorra, portanto, são necessários alguns elementos básicos. Por exemplo, como demonstra a Figura 4.2, é imprescindível que haja uma **fonte** que forneça a substância que irá se concentrar em um local específico, que chamaremos aqui de **ambiente de deposição**. Essa substância sofre **transporte** desde seu local de origem até o sítio onde irá se concentrar, passando por um meio que permite esse fluxo, até ser aprisionada numa **armadilha**. A eficiência da atuação conjunta desses elementos corresponde ao processo de mineralização que irá elevar o conteúdo de uma substância ou determinado elemento químico no ambiente de deposição, gerando um depósito mineral.

Figura 4.2 | Modelo genérico contemplando os elementos atuantes na geração de um depósito mineral. Nota: M = substância genérica qualquer, como ouro, níquel, cobre, etc.



Fonte: Teixeira et al. (2003, p. 450).

Considerando esse modelo, a fonte da substância *M* pode ser uma rocha pré-existente enriquecida em ouro; um magma com alta concentração de chumbo ou, até mesmo, uma água altamente mineralizada retida nos poros de uma rocha sedimentar.

O transporte, que normalmente acontece por meio de um fluido, pode ser promovido por uma intrusão magmática (energia térmica) ou simplesmente ocorrer devido à ação da gravidade. Já o meio pelo qual esse fluido passa pode ser representado pela própria superfície terrestre ou por estruturas geológicas (como dobras, falhas e fraturas) que permitam o escoamento por meio de detritos ou na forma de solutos em solução natural. Em relação ao ambiente de deposição, este pode ser representado por um solo, uma praia, rochas fraturadas ou um sistema de falhas, dobras ou fraturas, entre outros sítios. Nesses locais, é comum a disposição do depósito em zonas específicas que contenham armadilhas que causam o aprisionamento da substância útil, favorecendo sua acumulação; ou seja, exercem um controle na mineralização, restringindo a área em que o depósito mineral de M é situado.



Refleta

Quais são os possíveis fatores que exercem um controle na mineralização? Qual sua natureza genética (tectônica, estratigráfica, geoquímica, etc.)?

A complexidade dos depósitos minerais, no entanto, é algo que torna sua prospecção muito minuciosa e extremamente cara, não sendo raro campanhas de exploração mineral – etapa que precede a descoberta de um depósito – que ultrapassam dezenas de milhões de dólares. Isso porque um depósito mineral contém minérios e outros minerais sem valor econômico que ocorrem associados. No próprio minério ocorrem dois tipos de minerais: os **minerais de minério**, o qual possui valor econômico, como já vimos, e o **mineral de ganga** (ou simplesmente **ganga**), que não possui valor econômico agregado. Como comumente ocorrem juntos nos depósitos minerais, eles são separados por meio de métodos de processamento mineral, por isso, o conhecimento da ocorrência e a relação entre os dois minerais são de extrema importância na fase de extração da substância de interesse, um tema pertinente especialmente à engenharia de minas. Para ilustrar essa diferença entre os minerais, o Quadro 4.1 mostra um tipo de rocha que pode

conter um mineral de minério e ganga, e qual a substância de interesse para exploração.

Quadro 4.1 | Exemplo de rochas/sedimentos/dépósito formadores de depósitos minerais, com seus respectivos minerais de minérios, ganga e substância/elemento de interesse

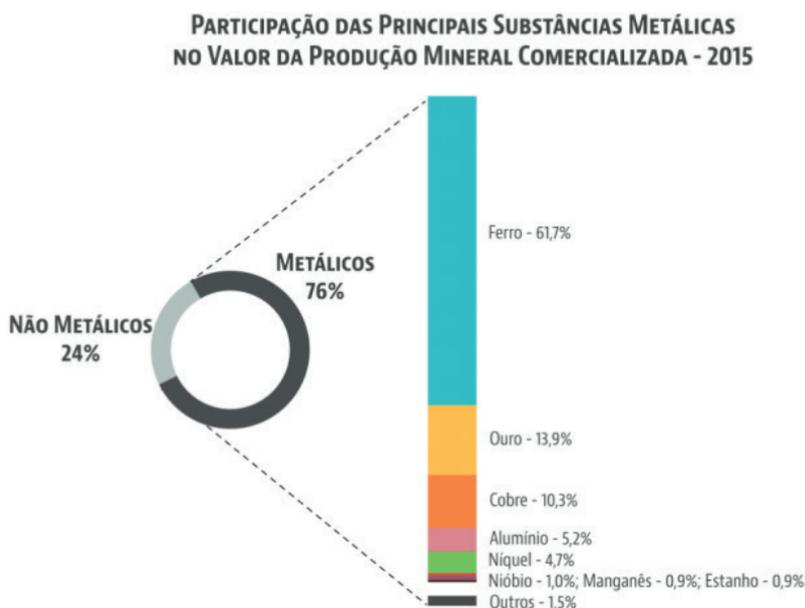
Rocha/ Sedimento/ Depósito	Mineral de Ganga (Ganga)	Mineral de Minério	Substância/ Elemento de Interesse
Granito	Feldspato Quartzo Micas	Cassiterita (SnO_2)	Estanho (Sn)
Pegmatito	Feldspato Quartzo Micas	Espodumênio ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$)	Lítio (Li)
Granito	Feldspato Quartzo Pirita Calcopirita	Ouro (Au)	Ouro (Au)
Aluvião	Quartzo (areia/ cascalho) Feldspato (areia) Argilominerais (argila)	Ouro	Ouro (Au)
Carvão	Quartzo Argilominerais Pirita	“Macerais” (vitrinita, inertinita e liptinita) – Constituintes orgânicos do carvão	Carbono (C)

Fonte: adaptado de Teixeira et al. (2003, p. 452).

Dentre esses minérios, distinguem-se duas classes, denominadas de **minérios metálicos** e **não-metálicos**, nomenclatura usada principalmente para diferenciar o valor econômico associado, afinal,

os minerais metálicos tendem a possuir um valor unitário muito mais elevado que os não-metálicos (Figura 4.3). Os minérios metálicos compreendem todos os minérios que são fontes de substâncias metálicas ou que tenham em sua composição minerais de minério de brilho metálico (por exemplo, cassiterita, ouro, níquel, bauxita, etc.), enquanto os minérios não-metálico correspondem àqueles que não possuem metais em sua composição e não contém minerais de brilho metálico, sendo normalmente empregados diretamente na construção civil (calcita, caulim, fosfato, brita e cascalho). Essa divisão e seu preço de comercialização estão, também, relacionados à complexidade do trabalho empregado para o seu beneficiamento e, portanto, é possível inferir que os minérios metálicos necessitam de mais processos do que os não-metálicos.

Figura 4.3 | Representação da porcentagem de participação dos minérios metálicos e não-metálicos no valor da produção comercializada, evidenciando a predominância dos metálicos, que possuem um valor mais elevado de comercialização



Fonte: Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM (2016, p. 1).

Dentro da classe de minérios não-metálicos tem-se, costumeiramente, enquadrado as **rochas e os minerais industriais**,

ou seja, uma gama de materiais geológicos que possuem aplicação praticamente direta na indústria e no comércio – como a cianita e outros minerais refratários, rochas ornamentais, minerais para agricultura (dolomita, calcita, magnesita) – e que geram um valor de produção bastante significativo, inclusive sustentando diversas cidades brasileiras.



Pesquise mais

Para conhecer um pouco mais da participação dos minérios metálicos e não-metálicos na economia, recomendamos uma breve análise do Anuário Mineral de Minas Gerais de 2010 a 2014, principalmente entre as páginas 97 e 107. Nele, você poderá ter uma ideia dos tipos de minérios produzidos e seu valor arrecadado.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). **Anuário Mineral Estadual (2010-2014) – Minas Gerais**. Brasília: DNPM, 2017. Disponível em: <<https://goo.gl/jrSUHQ>>. Acesso em: 9 dez. 2017.

A produção de todos os bens minerais aqui abordados seguem um ciclo natural de etapas para que a geologia seja conhecida, os depósitos quantificados e o aproveitamento avaliado. Assim sendo, para que todo depósito mineral de valor econômico se transforme em jazida, um longo tempo é depositado bem como diversos esforços são aplicados. Primeiro, desenvolvem-se diversos estudos sobre a **metalogênese** dos depósitos, ou seja, um detalhamento sobre as condições geológicas que levaram determinado local a enriquecer-se em determinados minérios e substâncias de interesse. Normalmente os minérios concentram-se em duas situações específicas: 1) na forma de corpos de minério regulares, como é o caso de **veios** ou **filões** (Figura 4.4 A), **estratos** (como os depósitos de carvão), **pipes**, etc., que correspondem a corpos tabulares ou tubulares nos quais o acúmulo mineral ocorreu. Nesse caso, a rocha encaixante – que aloja uma intrusão, veio ou qualquer estrutura discordante tabular ou tubular – pode apresentar-se entremeada, com fraturas/falhas, preenchida com minerais de minério e de ganga; ou 2) na forma de corpos de minério irregulares, como é o caso de minérios que ocorrem **disseminados** (Figura 4.4 B), em que a concentração de determinada substância encontra-se espalhada

em uma rocha hospedeira, podendo, até mesmo, formar uma trama extensa de diminutas fraturas, numa estrutura denominada de **stockwork**. Nessa situação, os depósitos normalmente apresentam um teor baixo, mas que acaba compensatório devido ao tamanho do corpo de minério, que pode abrigar milhares de toneladas da(s) substância(s) de interesse. Os depósitos de ouro ocorrem em ambas as situações, por isso, é preciso ter cuidado quando analisarmos sua geologia e o modo de ocorrência.

Figura 4.4 | Tipos de depósitos minerais: A) Depósitos minerais em filões (forma regular); B) Depósitos minerais disseminados (forma irregular)



A) Rocha ígnea alcalina (rocha encaixante, formada por minerais claros e escuros) com veio de molibdenita (MoS_2), um mineral fonte de molibdênio (Mina Climax, Colorado – EUA).

B) Rocha metamórfica com pirita e calcopirita, mas com pequenas quantidades de calcocita, bornita e outros sulfetos ocorrendo de forma disseminada, qualificando-a como uma amostra de um depósito de cobre. Depósito de VMS de Flambeau, Wisconsin-EUA.

Fonte: <<https://www.flickr.com/photos/jsjgeology/19689604770>>. Acesso em: 9 de dez. 2017.

Fonte: <<https://www.flickr.com/photos/jsjgeology/14817887929>>. Acesso em: 9 de dez. 2017.

Somente depois da definição dos modelos metalogenéticos é que são levados a cabo estudos prospectivos mais detalhados para a definição de prospectos, alvos e novos depósitos, quantificando e cubando as jazidas existentes, além de definir as estratégias para o desenvolvimento da lavra, o método pelo qual ocorrerá a extração da substância mineral.

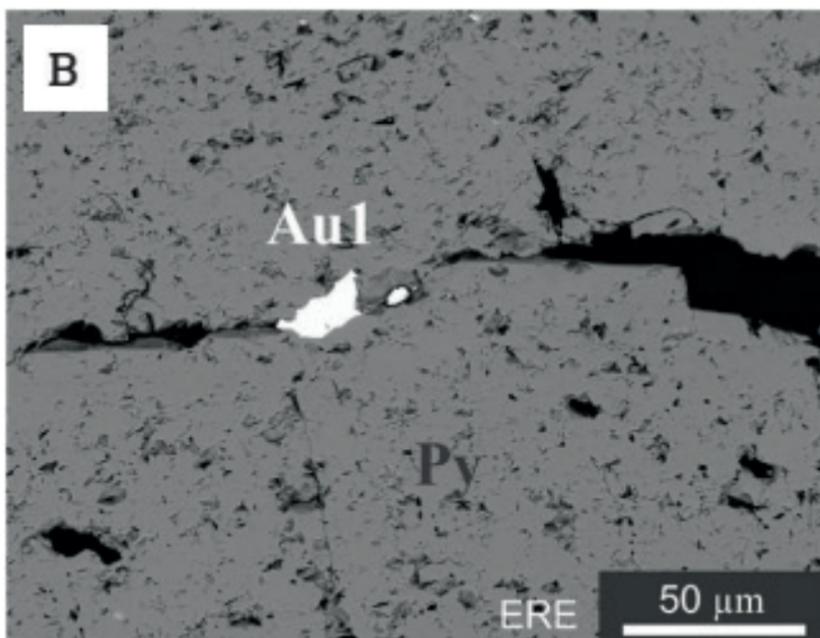
Antes de resolvermos o desafio lançado no início dessa seção, é importante lembrarmos rapidamente a situação contextualizada. Como mencionamos, imagine que você trabalha numa empresa de exploração mineral que executou um programa de prospecção mineral durante algum tempo. Essa campanha exploratória rendeu frutos e agora está sendo apresentado a viabilidade de desenvolvimento de uma mina de carvão e ouro. Nesse caso, você ficou responsável pela confecção de um memorial descritivo que orientará os projetos futuros para que a atividade saia do papel. Esse material deverá ser apresentado aos planejadores da empresa e aos potenciais investidores. Pensando nisso, a fim de ajudar no desenvolvimento do seu trabalho, você o dividiu em algumas etapas. Nessa primeira parte, você deverá apresentar os principais conceitos relacionados ao depósito encontrado, e sobre isso, algumas ponderações são importantes: **O que é fator de concentração e qual deve ser o seu valor provável para que a mina entre em desenvolvimento de forma rentável? Quais são alguns dos minerais de minério e de ganga a serem encontrados na mina? Quais são as formas de disposição do corpo de minério da mina e quais suas particularidades?**

Para solucionar o primeiro questionamento apresentado, você deve se lembrar que uma substância mineral ou um elemento químico está, geralmente, contido num mineral ou numa rocha. Portanto, para que um determinado depósito tenha um valor econômico significativo, o teor da substância/elemento de interesse deve ser atrativo. O teor refere-se ao grau de concentração, geralmente expresso em porcentagem ou partes por milhão (*ppm*) da massa de uma determinada substância mineral ou química em relação à massa total da rocha em que ela se encontra. Se considerarmos a crosta terrestre como nossa massa total, também poderemos calcular a média da concentração desse elemento na Terra e, dessa forma, ter sua abundância. Por exemplo, o ouro (Au) possui uma porcentagem média de concentração na crosta de 0,0000002%, ou seja, é extremamente baixa, logo, o Au é uma substância rara. Nesse sentido, para que um depósito de Au seja economicamente viável,

é necessário que esse depósito contenha um teor (concentração) de Au elevadíssimo, isto é, o seu fator de concentração (f.c.- $f.c. = \text{teor}_{\text{minério}} / \text{média}_{\text{crosta}}$) tem que ser alto. De fato, o Au é uma das substâncias de mais alto f.c., sendo que, na média, seu valor tem que ser 4.000 vezes maior que o teor médio de ouro na crosta. Obviamente que esse valor é dinâmico e é reflexo do preço de mercado, do custo de extração e das tecnologias existentes para sua retirada das rochas, mas o fator de concentração dá uma boa ideia do limite mínimo de teor que o Au deve ter para se obter lucro com sua exploração.

Sobre a segunda pergunta, é necessário primeiro entender a geologia da mina. Na breve descrição apresentada no início da seção, destacamos que a mina é formada por um depósito de carvão e o ouro ocorre na forma de veios de quartzo presentes em um corpo granítico que intrudiu nas rochas carbonosas, isto é, nas rochas que contém o carvão. Portanto, a partir disso, sabemos que o granito é a rocha encaixante; que nela existem veios/filões de quartzo que preenchem uma trama de fraturas e que nesses locais há Au. Logo, nosso mineral de minério é o próprio ouro, a substância de interesse, alvo da exploração mineira. Já os minerais de ganga, ou simplesmente ganga, são aqueles minerais formadores de rocha que compõem a rocha encaixante (granito), como quartzo, feldspato e micas, mas como mostrado no Quadro 4.1, podem existir uma porcentagem de sulfetos, como a pirita e a calcopirita, que nesse caso também se configurariam como gangas, como demonstra a Figura 4.5. Em relação aos minerais de ganga do carvão, o Quadro 4.1 mostra que o quartzo, os argilominerais e a pirita podem ocorrer juntamente ao "minério" de interesse. Já os minerais de minério são, na verdade, formados por constituintes orgânicos (os macerais), sendo os principais a vitrinita, a inertinita e a leptinita. Embora se enquadrem de forma *stricto sensu* no conceito, a lógica pode ser aplicada de forma a atender quais são os minerais alvo e os de ganga.

Figura 4. 5 | Imagem de elétrons retroespalhados (ERE) mostrando a ocorrência de ouro (Au1) incluído em fratura formada na pirita (Py)



Fonte: adaptada de Sotero et al. (2015, p. 600).

Por último, para destacar as formas de distribuição do corpo de minério, é importante conhecermos os tipos principais. Sobre isso, destacamos que existem dois que se destacam: os corpos de minérios regulares – que representam corpos de geometria conhecida, como tabular, tubular, pipes, etc., nas quais o minério ocorre concentrado em fraturas preenchidas, formando uma trama de veios ou filões que contém as substâncias/elementos de interesse para exploração mineral – e as substâncias que se encontram de forma irregular, como ocorre nos casos em que o minério está disseminado, em que determinada substância encontra-se espalhada em uma rocha hospedeira, podendo, até mesmo, formar uma trama extensa de diminutas fraturas (*stockwork*). Nesses casos, os depósitos geralmente possuem um baixo teor, que acaba sendo compensatório, pois muitos desses corpos de minério possuem um grande tamanho, fato que lhes permite abrigar milhares de toneladas da(s) substância(s) de interesse. Conforme mostra a descrição do

depósito mineral da mina em estudo, podemos enquadrá-la no primeiro caso, uma vez que os veios de quartzo são porções em que o ouro está contido, caracterizando um depósito filoniano, enquanto o depósito de carvão possui um formato tabular. Nesses casos, a principal particularidade é que o minério de interesse se encontra na forma de um corpo tabular, formando uma rede de fraturas/falhas preenchida com minerais de minério e de ganga, no caso do ouro, e distribuindo-se de forma tabular lateralmente contínua, no caso do carvão.

Resolvendo essas questões, você explicará no memorial descritivo alguns conceitos importantes e pontos específicos que ajudarão os tomadores de decisões da empresa a planejar melhor as atividades e, conjuntamente, fornecer informações pertinentes para os investidores que desejarem aplicar seus recursos no desenvolvimento da mina.

Avançando na prática

Investimento geológico

Descrição da situação-problema

Imagine que você trabalha numa empresa de investimento em empreendimentos minerários. Nessa empresa, você trabalha como analista de oportunidades no setor de mineração e passa boa parte do seu tempo analisando potenciais investimentos em projetos de exploração mineral e desenvolvimento de depósitos minerais. Por se tratar de uma empresa que normalmente recebe investidores interessados em aplicar recursos nesses tipos de projetos, você também acaba tendo que explicar alguns conceitos de geologia econômica para essas pessoas. Numa visita recente, você recebeu a visita de um grupo chinês que planeja investir num depósito mineral de cobre (Cu) e níquel (Ni). Na reunião, os chineses levantaram alguns questionamentos que você deve responder: **Quais os principais fatores associados à transformação de um recurso em reserva mineral? De forma simplificada, como ocorre a formação**

de um depósito mineral? O fator de concentração do Cu e do Ni é maior ou menor que o do Au?

Resolução da situação-problema

Para responder a esses questionamentos, lembre-se que nesta seção estudamos o que são recursos e reservas e qual os fatores que interferem na transformação de um recurso em reserva. Além disso, também vimos um modelo que explica a formação de um depósito mineral, ideal para utilizar em explicações genéricas, e aprendemos o que é fator de concentração bem como vimos alguns valores desse fator. Sendo assim, para resolver seu primeiro questionamento, vimos que os parâmetros envolvidos na obtenção de uma reserva de minério é o custo de extração, que pode sofrer alterações conforme o preço de mercado do produto e o avanço da tecnologia empregada em sua recuperação. Além disso, vimos que o grau de incerteza (desconhecimento) da reserva também é importante, o que pode ser reduzido conforme a aplicação em projetos de exploração mineral, ou seja, do conhecimento geológico do depósito. Já sobre a segunda pergunta, vimos que a formação do depósito ocorre quando uma determinada fonte fornece uma substância de interesse, que é transportada por um determinado meio até chegar ao seu ambiente de deposição, sendo aprisionada por uma armadilha, ou seja, alguma estrutura que cause o seu acúmulo naquele local. Esse modelo genérico descreve como ocorre os processos de mineralização das rochas. Por último, vimos que o fator de concentração do Au é um dos maiores que existem (4.000), enquanto o do Cu e do Ni são um pouco menores, entre 80-100 e 150, respectivamente. Dessa forma, a abundância desses elementos é maior que o do Au, visto que o teor para exploração desses elementos é mais baixo que o do Au.

Faça valer a pena

1. Grande parte dos utensílios domésticos que possuímos em nossas casas, dos aparelhos que utilizamos para trabalhar, do automóvel que utilizamos para nos movimentar está baseado na transformação de um recurso natural em reserva e posterior aproveitamento dessa reserva a

partir da extração do minério ou bem energético. Nesse sentido, a respeito desse assunto, analise as alternativas a seguir:

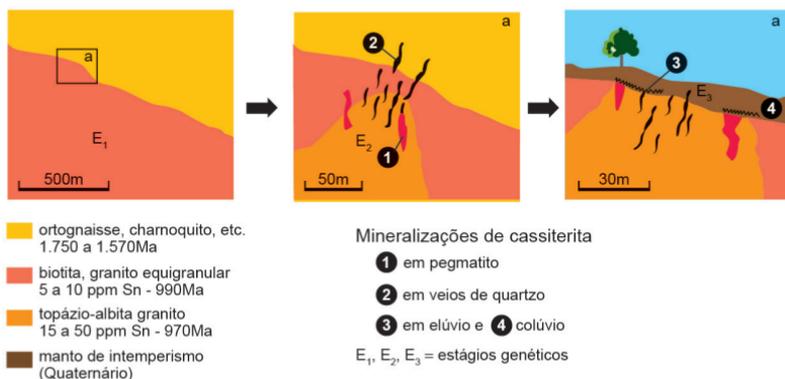
- I- Um recurso representa um bem mineral e/ou energético que pode ser útil ao ser humano e, conseqüentemente, possui algum valor econômico.
- II- A reserva representa a uma parte de algum recurso que foi avaliado e, a partir dessa avaliação e definição, percebeu-se que sua retirada poderia trazer lucro.
- III- O grau de conhecimento da extensão de um depósito, a demanda de mercado do bem mineral ou energético, o custo de produção e preço de comercialização são alguns dos fatores levados em conta para a definição de uma reserva.

Considerando as afirmativas expostas acima, é possível afirmar que é correta a que se encontra em:

- a) I, apenas.
- b) II, apenas.
- c) III, apenas.
- d) I e II, apenas.
- e) Todas as alternativas.

2. A Província Estanífera de Rondônia (PER) responde por 47% da produção nacional de estanho (Sn) e, juntamente com o estado do Amazonas, que produz 50% do Sn do Brasil, ambos estados respondem por 7,5% do total de reservas de estanho mundial. O modelo metalogenético simplificado desses depósitos está demonstrado na figura a seguir e ilustra o modo de ocorrência dessa substância.

Modelo de geração dos depósitos estaníferos da PER.



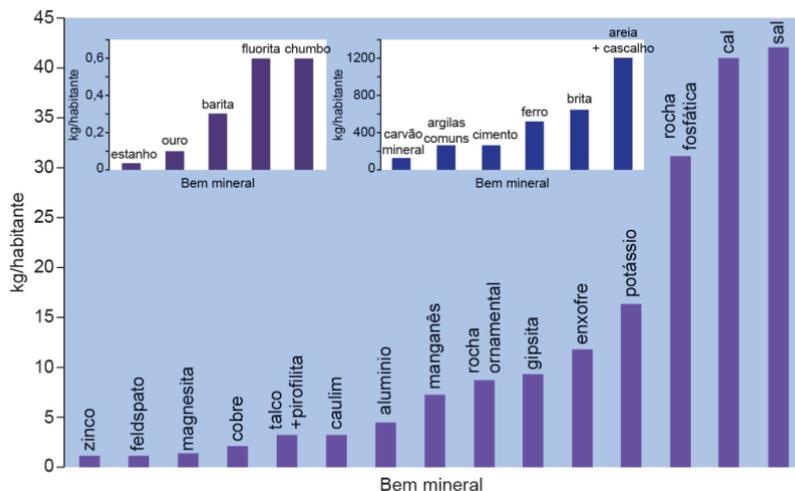
Fonte: Teixeira et al. (2003, p. 451)

Sobre esse assunto, é correto afirmar que:

- A fonte de Sn do depósito parecer ser formada pelo conjunto de rochas denominadas de ortognaise e charnoquito.
- A geração da principal fonte de Sn está relacionada ao estágio E_1 .
- O meio de transporte do Sn para as porções mais superficiais foram as fraturas geradas no momento da intrusão do topázio-albita granito durante o estágio E_2 .
- Os depósitos de Sn da Província Estanífera da Rondônica são exclusivamente filonianos.
- O principal evento geológico responsável pela formação da rocha com maior teor de Sn ocorreu no estágio E_3 .

3. Anualmente o brasileiro consome vários quilos de minerais necessários para a manutenção das atividades básicas diárias e também para o desenvolvimento das cidades e da economia. Dentre esses minerais importantes, estão os minerais de minério, tanto metálicos quanto não-metálicos, conforme mostra a Figura a seguir.

Consumo anual médio por habitante de minerais metálicos e não-metálicos no ano de 1998



Fonte: Teixeira et al. (2003, p. 453).

Sobre o gráfico apresentado e a característica dos minerais consumidos, assinale a alternativa verdadeira:

- a) Os minerais metálicos são os mais consumidos pela população.
- b) O consumo de estanho, cobre, ouro e chumbo ultrapassa a barreira de 1kg/habitante.
- c) Os minerais não-metálicos, como o sal (mineral de halita), potássio, fosfato, alumínio e manganês são os mais consumidos.
- d) Os minerais utilizados na construção civil são os menos consumidos.
- e) Os minerais utilizados na agricultura, como o calcário ("cal"), magnesita, potássio, fosfato, entre outros, ultrapassam o valor de 1 tonelada por pessoa.

Seção 4.2

Depósitos minerais

Diálogo aberto

Antes de passarmos para os assuntos a serem abordados na atual seção, vamos relembrar rapidinho a seção passada. Nela estudamos sobre alguns conceitos de geologia econômica, como recursos e reservas, fator de concentração, modelo genérico de geração de depósito mineral, minerais de minério e de ganga, modos de ocorrência mineral, entre outros assuntos. Agora, nesta seção, vamos estudar alguns tipos de depósitos minerais divididos de acordo com o ambiente geológico de ocorrência do depósito e o processo mineralizador. Assim, veremos alguns depósitos minerais magmáticos e vulcano-exalativos, hidrotermais, sedimentares e supergênicos.

Para isso, seguindo nosso sistema de aprendizado contextualizado, vamos rebuscar a situação exposta no início da unidade. Nela, apresentamos um contexto em que você trabalha numa empresa de exploração mineral que durante alguns anos desenvolveu um programa de prospecção mineral, o qual proporcionou a seleção de um local para a implantação de uma mina de carvão e ouro. Nesse projeto, você está responsável pela produção de um memorial descritivo que deverá orientar as etapas futuras para que a atividade saia do papel. Esse material também deverá ser apresentado aos planejadores da empresa e aos potenciais investidores. Nesse sentido, para ajudá-lo na organização das ideias fundamentais, você dividiu o trabalho em etapas.

Na anterior, você relatou alguns conceitos importantes a serem considerados antes da implantação da mina, como o fator de concentração, possíveis minerais de minério e ganga e qual a forma de ocorrência do minério de interesse. Agora, na atual fase, você ficou encarregado de apresentar o modelo geológico que gerou a concentração de ouro. Sobre isso, para que você consiga descrever da melhor forma esse modelo, é necessário que alguns pontos sejam abordados: Qual a provável natureza geológica (mágnica,

hidrotermal ou sedimentar) do depósito de ouro e quais são os subtipos baseados na sua afinidade geoquímica? Qual região do depósito concentra o maior teor em Au? Existe uma característica que indique a ausência de minério (zona estéril)?

Agora o desafio está contigo! Pense numa maneira de resolver essas considerações e apresentar o modelo da maneira mais adequada. Para isso, lembre-se: o livro didático está aqui para isso.

Portanto, estudaremos, ao longo desta seção, o principal ambiente formador dos depósitos de ouro, com as características descritivas do modelo que estamos estudando, e aprenderemos quais são os subtipos baseados em observações geoquímicas. Além disso, veremos que existe algumas características geológicas que indicam a zona de maior concentração de elementos de interesse, principalmente o ouro. Por último, conheceremos outras particularidades importantes do modelo que ajudam a indicar a localização de zonas estéreis, isto é, aquelas que não possuem mais minérios. Portanto, não perca tempo e dedique-o a estudar mais sobre o assunto. Bons estudos!

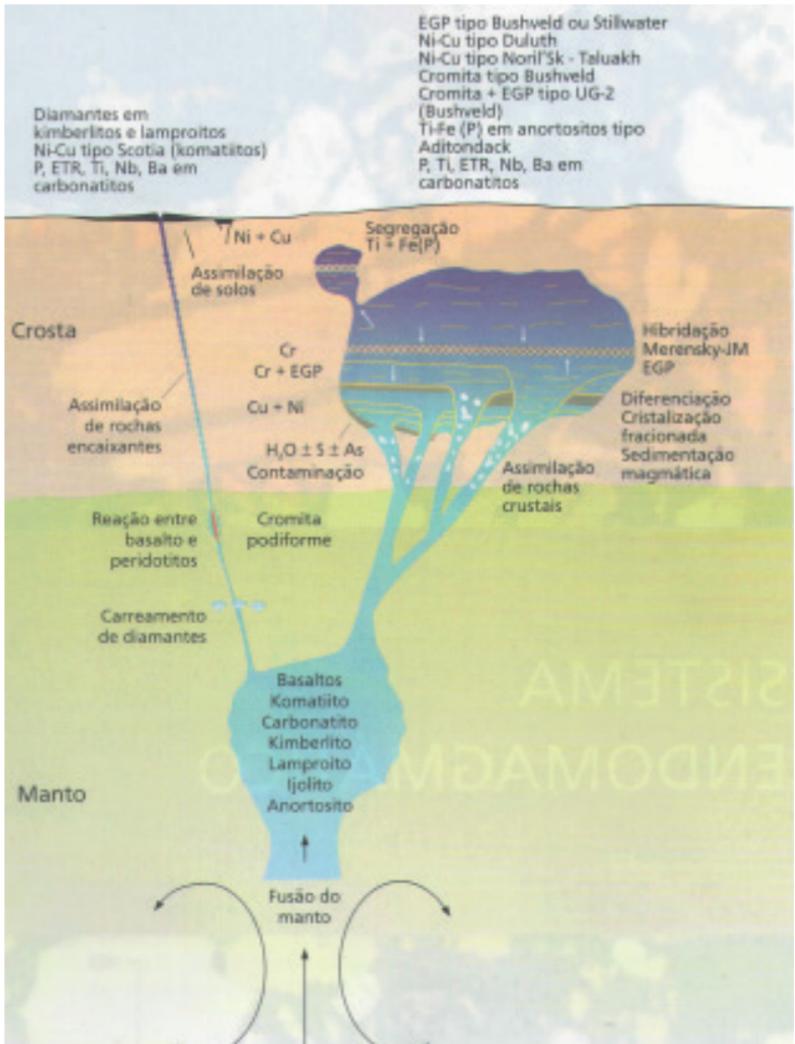
Não pode faltar

Na seção anterior vimos um modelo genérico de como ocorre a formação de um depósito mineral bem como de onde destacamos os elementos que, agindo de forma sincrônica, propiciam o enriquecimento das rochas em uma (ou mais de uma) determinada substância. Agora, nesta seção, vamos abordar alguns modelos genéricos baseados no ambiente geológico de formação, em especial os depósitos gerados em ambientes **magmáticos** e **vulcano-exalativos**, **hidrotermais**, **sedimentares** e **supergênicos**. Esses cinco grupos abrangem boa parte dos modelos formativos, mas não englobam exatamente todos os tipos de depósitos minerais, afinal, até hoje, existem muitas dúvidas sobre determinados depósitos.

Os depósitos minerais formados em ambientes magmáticos são principalmente relacionados ao sistema endógeno. Nessas situações, um magma gerado pela fusão parcial do manto ou da astenosfera, que possui uma composição primária específica, segrega alguns

minerais exatamente dentro da câmara magmática, sem envolver a ação de fluidos magmáticos. Esse particionamento ocorre devido à diferença da temperatura de cristalização do mineral e densidade. Alternativamente, os próprios magmas podem se tornar depósitos minerais, como ocorre com os magmas kimberlíticos, carbonatíticos e lamproíticos (Figura 4.6).

Figura 4.6 | Esquema ilustrativo do processo de formação de depósitos minerais magmáticos (endomagmáticos)

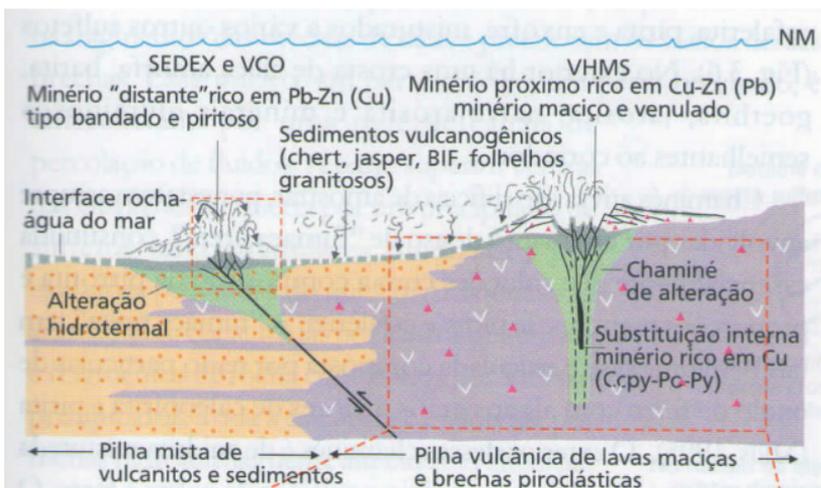


Fonte: adaptada de Biondi (2003, p. 32).

Esse sistema mineralizador pode produzir diferentes tipos de depósitos, sobretudo devido à diferentes características do magma gerador dos depósitos. Assim sendo, quando o magma envolve a geração de rochas básicas e ultrabásicas (como basalto e peridotito, respectivamente), podemos ter a ocorrência de significativos depósitos de cromita, metais do grupo da platina (EGP), níquel e cobalto. Associado a magmas de natureza alcalina (cuja rocha pode ser um traquito, por exemplo), é comum a existência de depósitos de elementos terras-raras (ETR), zircônio e urânio. Já nos magmas de natureza carbonática (carbonatitos) ocorrem depósitos de fosfato, nióbio, ETR e barita, e nos granitóides aparecem depósitos de estanho e wolfrâmio (TEIXEIRA, et al., 2003).

Em outros casos, quando o magma contém uma quantidade de enxofre e outros elementos voláteis, pode ocorrer a exalação de fluidos magmáticos em zonas fraturadas, como ocorre em zonas tectônicas extensionais, onde existem porções intensamente fraturadas e com presença de fumarolas. Esses fluidos também podem ser provenientes de fonte superficial, geralmente água marinha, que, ao penetrar nas rochas e atingir temperaturas elevadas devido à circulação próxima à câmara magmática, lixivia alguns elementos químicos da rocha encaixante. Esse fluido, ao misturar-se à água e a gases vulcânicos, constitui um fluido vulcanogênico que exala na zona submarina. Nessa região próxima ao centro de exalação, depositam-se sulfetos ricos em cobre, zinco, chumbo, ferro, entre outros elementos, formando depósitos conhecidos como Sulfetos Maciços Vulcanogênicos (VMS, em inglês), enquanto que nas zonas mais distantes do ponto exalativo, formam-se os Depósitos Sedimentares Exalativos (SEDEX, em inglês), cuja gênese está associada à sedimentação de argilominerais e, também, à precipitação sílica (Figura 4.7).

Figura 4.7 | Exemplos de depósitos vulcano-exalativos do tipo SEDEX e VMS.



Fonte: adaptada de Biondi (2003, p. 109).

Os depósitos hidrotermais compreendem uma gama de ocorrência de mineralizações associadas à consolidação de um complexo fluido formado por inúmeros elementos químicos, e depende do tipo de solução hidrotermal, da natureza da rocha encaixante, da profundidade de intrusão do corpo ígneo e sua dimensão, além do tempo de atuação do processo ígneo, no caso de depósitos hidrotermais magmáticos.



Assimile

Uma solução hidrotermal é uma solução aquosa quimicamente complexa, de alta temperatura (normalmente próximo ou acima de 200 graus C), sendo constituída por vários íons dissolvidos. Sua natureza está relacionada à circulação de água meteórica, magmática, sedimentar (conata) ou metamórfica.

Existem diferentes subsistemas hidrotermais, mas talvez os mais importantes em número de ocorrências sejam os depósitos hidrotermais associados a sistemas subvulcânicos e plutônicos. No grupo dos subvulcânicos incluem-se os depósitos formados pela intrusão de plútons subsuperficiais, isto é, corpos ígneos alojados na crosta a profundidades menores que 2 km. Nessa situação, os

depósitos minerais são formados pela manifestação de um sistema de diques, falhas (que serão preenchidas pelas mineralizações), domos ígneos, vulcões, entre outras estruturas. Devido à sua formação próxima à superfície, esses depósitos são denominados, por alguns autores, como depósitos epitermais.

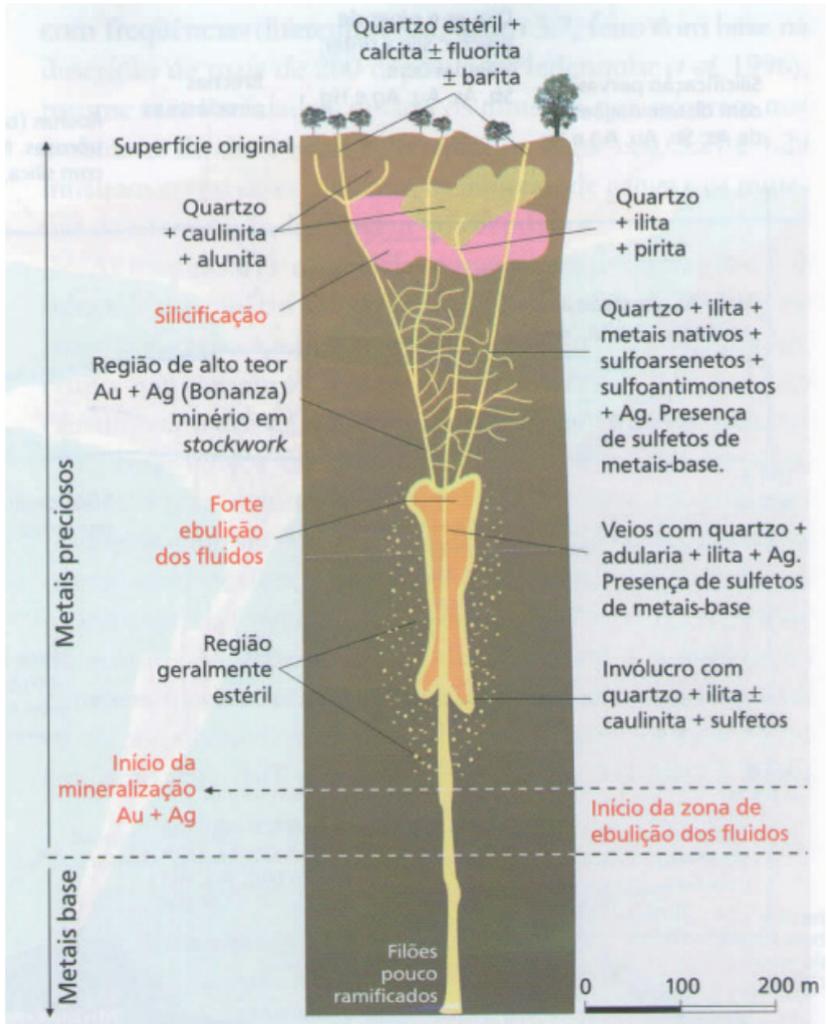
A ocorrência da mineralização de alto teor está concentrada em filões ou sistema de vênulas (um rendilhado de veios/filões altamente concentrado), enquanto que os teores mais baixos se encontram disseminados em rochas porosas. Esse tipo de processo hidrotermal é responsável, principalmente, pela gênese de depósitos de ouro (Au) e prata (Ag). Sobre isso, observou-se que há dois tipos de depósitos de acordo com sua afinidade geoquímica: a) depósitos epitermais ácido sulfatados (alta sulfetação), que se associam a rochas vulcânicas, e b) depósitos epitermais do tipo sericita-adulária (baixa sulfetação), que ocorrem em plútons subsuperficiais (ou seja, habitualmente em rochas de natureza granítica).

Nesses depósitos de Au-Ag filoneanos, tanto nos de baixa como nos de alta sulfetação, as reservas são geralmente menores que 2 milhões de toneladas, as médias dos teores de Au ficam abaixo dos 10 ppm e os de Ag entre 18 e 130 ppm. Em algumas situações, nos depósitos de alta sulfetação, ocorrem minérios com teores significativos de Cu. Já nos depósitos de baixa sulfetação, os teores de Cu são menores, no entanto, os de Ag, Zn e Pb são maiores, o que os tornam elementos explorados como subprodutos do Au (BIONDI, 2003).

Em termos geométricos, os filões são pouco ramificados em profundidade, zona onde se acumulam os metais base. Em direção à superfície, acima da zona de ebulição dos fluidos mineralizantes, forma-se uma zona estéril com grande quantidade de argilominerais. Acima dessa parte, com a ebulição intensa dos fluidos e o desenvolvimento de faturamento hidráulico das rochas, dá-se uma intensa descarga de metais, constituindo uma região de *stockwork*, rica em Au e Ag. Já bem próximo à superfície, até mesmo dentro do lençol freático, uma disseminação de sílica e, conseqüentemente, silicificação das rochas (Figura 4.8). Além disso, o Quadro 4.2 traz um resumo da forma do depósito, das texturas, dos minerais de

minério, de ganga e dos metais dos depósitos epitermais de Au-Ag nos tipos de alta e baixa sulfetação.

Figura 4.8 | Representação das principais características dos depósitos de ouro epitermal de baixa sulfetação (ou tipo sericita-adulária)



Fonte: Biondi (2003, p. 135).

Quadro 4. 2 | Quadro descritivo de geometria, textura, minérios, ganga e metais dos dois subtipos de depósitos de ouro, conforme sua característica geoquímica.

Características	Sericita-Adulária (Baixa Sulfetação)	Ácido Sulfatado (Alta Sulfetação)
Forma do depósito (geometria)	Veios predominantes. <i>Stockwork</i> são comuns. Disseminações e substituições pouco frequentes.	Predominância de minérios disseminados e substituições. Stockworks e veios pouco frequentes.
Texturas	Vênulas, preenchimento de cavidades, brechas.	Substituições das encaixantes, brechas e veios.
Minerais de minério	Pirita, ouro livre, esfalerita, galena (arsenopirita)	Pirita, enargita, calcopirita, tennantita, covelita, ouro livre, teluretos.
Ganga	Quartzo, calcedônia, calcita, adularia, ilita ou sericita, carbonatos.	Quartzo, alunita, barita, caulinita, pirofilita.
Metais	Au, Ag, Zn, Pb (Cu, Sb, As, Hg, Se)	Cu, Au, Ag, As (Pb, Hg, Sb, Te, Sn, Mo, Bi)

Fonte: Biondi (2003, p. 136).

Ainda dentro do contexto dos depósitos hidrotermais, ou seja, formados por fluidos hidrotermais, existem também os depósitos hidrotermais metamórficos, os quais são formados a partir de fluidos hidrotermais circundantes nas rochas em profundidade. Nesse caso, os fluidos são provenientes de reações de desidratação e desvolatilização de minerais provocadas devido ao aumento de pressão e temperatura em contextos de colisão de placas tectônicas (um exemplo são os depósitos de Au tipo orogênico, encontrados por todo o globo). É importante salientar, entretanto, que existem vários outros depósitos hidrotermais, mesmo dentro do subsistema subvulcânico e plutônico superficial – dentre os quais podemos citar os que estão relacionados aos carbonatitos e complexos alcalinos –

e até mesmo aqueles incluídos no subsistema plutônico profundo, como os tipos porfíricos e aqueles relacionados aos pegmatitos, entre outros.

Em relação aos depósitos minerais gerados em ambiente sedimentar, ou seja, devido à ação de processos relacionados à dinâmica exógena, destacamos três subsistemas: i) sedimentar continental, cuja gênese não envolve influência de água marinha, somente água doce; ii) sedimentar marinho, que envolve a ação da água salgada, e iii) sedimentar hidatogênico, que corresponde a depósitos gerados pela circulação de água não-magmática que carrega metais das rochas percoladas, depositando-os em outros lugares.

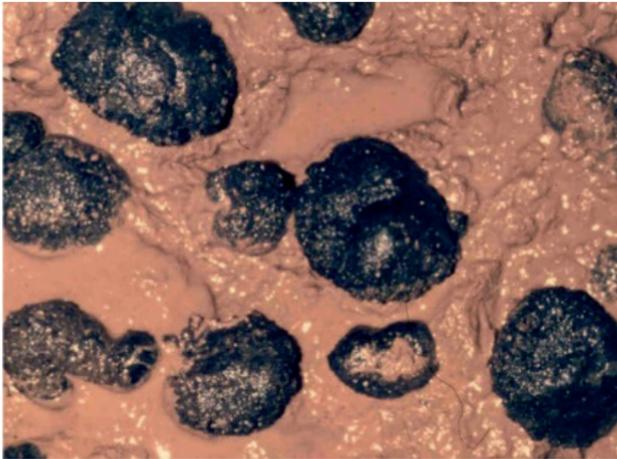
Em ambiente continental, o escoamento superficial da água e o vento são os dois principais agentes transportadores de minério e responsáveis por sua concentração num contexto clástico (detritico). Assim, alguns cordões litorâneos e algumas dunas podem conter ilmenita (óxido de Fe-Ti), rutilo (Ti), zirconita (Zr) e monazita (cério e lantânio) se as condições geológicas propiciarem. Em porções mais internas dos continentes, os ambientes de sedimentação fluvial podem ser responsáveis pelo transporte de alguns minérios de ouro, estanho e diamante. Em contextos áridos, a precipitação de minerais evaporíticos que contenham lítio (Li) é o principal exemplo de depósito mineral sedimentar de natureza química. Em ambiente marinho existem inúmeros exemplos de processos mineralizadores, no entanto, um dos mais visados atualmente são os nódulos polimetálicos, que se encontram depositados no fundo dos oceanos. Esses nódulos contêm uma quantidade significativa de Fe-Mn-Ni-Cu-Co.



Exemplificando

A Figura 4.9 mostra um exemplo de um nódulo polimetálico assentado em uma vasa silicosa, um tipo de sedimento biologicamente precipitado produzido pelo acúmulo de carapaças silicosas de diatomáceas (um tipo de alga verde).

Figura 4. 9 | Nódulos polimetálicos (blocos rochosos escuros) imersos numa lama biologicamente precipitada, conhecida como vasa silicosa. Ambiente marinho profundo

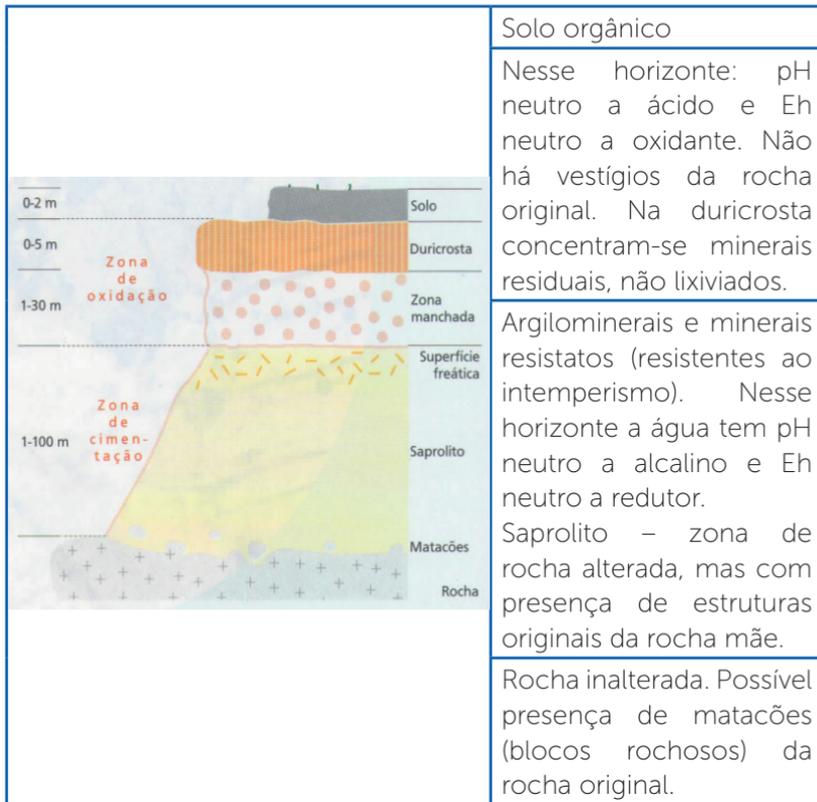


Fonte: Souza et al. (2009, p. 12).

Esses nódulos foram encontrados no Oceano Pacífico, numa zona conhecida como Clarion-Cliperton, mas estudos recentes indicam que existem áreas oceânicas na costa brasileira, como na Ilha de Trindade e na Elevação do Rio Grande, que também possuem esse tipo de recurso mineral.

Já em ambiente sedimentar hidatogênico, que envolve a circulação de fluidos aquosos crustais dentro de sedimentos ou rochas sedimentares, enriquecendo-se em metais que estavam nessas rochas, e posterior deposição em outro local, há exemplos de depósitos de chumbo e bário em arenitos, urânio em depósitos do tipo "rolo" (*roll-type*), cobre do tipo "White Pine", entre outros. A Figura 4.10 ilustra alguns casos de depósitos minerais em ambientes sedimentares tratados aqui e em outros tipos não mencionados no texto.

Figura 4.11 | Perfil laterítico típico mostrando as zonas de cimentação e oxidação



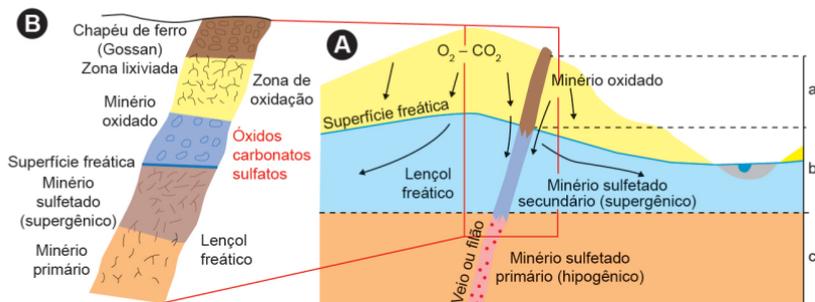
Fonte: adaptada de Biondi (2003, p. 378).

Nesse modelo, acima da zona freática, desenvolve-se a principal porção de interesse mineral. Isso porque, conforme a água meteórica avança da superfície ao aquífero, ela carrega apenas os elementos solúveis, deixando para trás os elementos insolúveis (residuais), que se acumulam na zona manchada e na duricrosta. A composição da duricrosta dependerá, primordialmente, da constituição da rocha original. Assim, ela será ferruginosa ou aluminosa se a rocha original for feldspática - gerando as bauxitas – ou ferroniquelífera, cuja rocha original possui natureza ultrabásica, dando origem às garnieritas oxidadas. Os saprólitos, apesar de menos importantes economicamente, podem conter quantidades de níquel e cobalto ou argilominerais. O desenvolvimento desse perfil típico está ligado

a fatores ambientais, mas sua principal característica é a ocorrência de um clima tropical quente e úmido, com estações secas e úmidas, definidas e separadas.

Em condições específicas, quando o perfil laterítico se desenvolve interceptando depósitos minerais com sulfetos e/ou ouro, pode haver a formação de outros tipos de depósitos supergênicos. Nessa situação, sob a ação da água, que promove a hidrólise dos sulfetos, há a geração de óxidos e hidróxidos de ferro, como a goethita e hematita, e sulfatos solúveis com cátions dos sulfetos, como Cu, Ni e Zn, que podem migrar até a zona saprolítica. A duricrosta, nesse contexto, possui característica específica, sendo rica em Pb, Mo, V e elementos platinóides (platina, rutênio, paládio, etc.), e nomenclatura típica, denominada de chapéu de ferro ou *gossan* (Figura 4.12).

Figura 4.12 | Representação sobre o desenvolvimento de um depósito supergênico sobre um minério sulfetado



Fonte: adaptada de Biondi (2003, p. 402).

Cabe ressaltar, por último, que a evolução do ambiente supergênico é dependente da estabilidade tectônica da região, isso porque os processos superficiais que causam a lixiviação dos compostos solúveis, as trocas químicas, a precipitação dos elementos transportados e a concentração dos elementos residuais ocorrem durante um longo período geológico. Assim, quando sofrem deformações tectônicas, alterando a configuração topográfica do terreno e, conseqüentemente, a mudança hidrológica, o processo de laterização é interrompido e os horizontes lateríticos são destruídos.



Qual a importância prática, pensando em exploração mineral, de se conhecer a expressão superficial de alguns depósitos minerais?

Sem medo de errar

Para que você consiga avançar na resolução do desafio lançado no início da unidade, é importante lembrá-lo: você trabalha numa empresa de exploração mineral que durante alguns anos desenvolveu um programa de prospecção mineral, o qual proporcionou a seleção de um local para a implantação de uma mina de carvão e ouro. Nesse projeto, você está responsável pela produção de um memorial descritivo que deverá orientar as etapas futuras para que a atividade saia do papel. Nesse sentido, você dividiu o trabalho em etapas. Nessa atual etapa, você deverá apresentar o modelo descritivo do depósito que gerou a concentração de ouro, sendo fundamental responder aos seguintes questionamento: **Qual a provável natureza geológica (magnética, hidrotermal ou sedimentar) do depósito de ouro e quais são os subtipos baseados na sua afinidade geoquímica? Qual região do depósito concentra o maior teor em Au? Existe uma característica que indique a ausência de minério (zona estéril)?**

Para ajudá-lo a resolver o primeiro ponto apresentado acima, é preciso se atentar a breve descrição apresentada no início da unidade. Lá, destacamos que o ouro se encontra alojado em veios de quartzo presentes em um corpo granítico que intrudiu nas rochas carbonosas (carvão). Com esse pensamento em mente, mencionamos que existem distintas manifestações de depósitos hidrotermais, mas talvez os mais importantes em número de ocorrências sejam os depósitos hidrotermais associados à sistemas subvulcânicos e plutônicos. Nesse grupo dos subvulcânicos estão incluídos os depósitos formados pela intrusão de plútons subsuperficiais, justamente a característica descritiva apresentada inicialmente. Nessa condição, os depósitos minerais são formados pela manifestação de um sistema de diques e falhas (que serão preenchidas pelas mineralizações). Por isso, a natureza provável

do depósito é hidrotermal. No entanto, no modelo hidrotermal de depósito de ouro (e prata), percebeu-se a ocorrência de dois subtipos de acordo com a afinidade geoquímica. Assim, vimos que existem os modelos de alta sulfetação (ácido sulfatados) e de baixa sulfetação, ou também conhecidos como do tipo sericita-adularia. O primeiro encontra-se associado às rochas vulcânicas, enquanto o segundo está relacionado aos plútons subsuperficiais (ou seja, usualmente em rochas de natureza granítica), como é o caso do depósito em questão. Nesse caso, apresentamos na Figura 4.8 as características e feições geológicas específicas desse tipo de depósito de baixa sulfetação, também descritos no Quadro 4.2.

Sobre o segundo questionamento e conforme apresentado na Figura 4.8, existem zonas específicas dentro do modelo do depósito mineral do tipo baixa sulfetação. Nesse sentido, a zona de maior interesse está concentrada nos chamados *stockworks*, uma região formada por uma alta concentração (rendilhado) de veios e filões onde o ouro está situado, ocorrendo, em alguns casos, conjuntamente com outros metais, como Ag, Zn e Pb (e, em menor concentração, os seguintes elementos: Cu, Sb, As, Hg, Se). Essa região, também chamada de bonanza, possui a porção de mais alto teor dentro do modelo, mas note que esses metais ocorrem junto dos minerais de ganga, como quartzo, calcedônia, calcita, adularia, ilita ou sericita, carbonatos.

Por último, visando responder ao último questionamento, é importante desenvolver um senso crítico e interpretativo. Como exibido na Figura 4.8 e mencionado anteriormente, existem distintas zonas dentro do depósito mineral. A mais prolifera é a de *stockwork*, que concentra uma série de veios e vênulas que contém minérios de interesse. No entanto, conforme avançamos em profundidade no depósito mineral, esse rendilhado de veios diminui sua dimensão e distribuição, formando uma zona com pouca ramificação dos filões. Além disso, a mineralogia também indica a existência de uma zona estéril. Assim, filões pouco ramificados com presença de quartzo, adularia e ilita, seguido de um invólucro com quartzo, ilita, caulinita e sulfetos, simboliza que o corpo de minério já não apresenta mais ouro e prata em teores significativos e são, portanto, estéreis.

Com isso, resolvendo esses questionamentos e compreendendo a natureza geológica do depósito, você terá mais condições de desenvolver o memorial descritivo e, até mesmo, ponderar novas informações necessárias para as etapas futuras do desenvolvimento do projeto de implantação da mina de ouro. Além disso, concluindo essa etapa, você terá finalizado a sua segunda tarefa do desafio dessa unidade e estará apto para seguir para o próximo e último passo.

Avançando na prática

Analizando novos depósitos

Descrição da situação-problema

Imagine-se em uma nova situação: você trabalha numa empresa multinacional de exploração mineral que realiza a pesquisa de novos depósitos minerais. A empresa já possui experiência na prospecção de minério de ouro e prata em depósitos hidrotermais e depósitos de elementos terras-raras (ETR) em complexos alcalinos. No entanto, a companhia passou por uma reestruturação e o novo diretor de exploração mineral possui o interesse em expandir a atuação da empresa para prospecção de novos depósitos, dando enfoque, principalmente, nos depósitos vulcano-exalativos e nódulos polimetálicos. Por tanto, ele convocou você, os geólogos e sua equipe de trabalho para uma reunião com o intuito de abordar algumas características geológicas desses novos alvos exploratórios. Nessa reunião, ele fez algumas perguntas: **Quais são os tipos de depósitos que existem num ambiente vulcano-exalativo? Qual a diferença entre eles? Quais elementos químicos podem ser aproveitados nos nódulos polimetálicos?**

Resolução da situação-problema

Para auxiliá-lo na resposta desses questionamentos levantados pelo diretor de exploração da empresa, é importante lembrar dos

assuntos abordados nesta seção. Sobre isso, visando responder ao primeiro ponto levantado, vimos que em zonas extensionais submarinas (de separação de placas) forma-se um trecho intensamente fraturado em que o magma, rico em substâncias voláteis (gases, como o enxofre), acaba expelindo, por meio de uma fumarola, um fluido rico em elementos metálicos dissolvidos. Nessas situações, formam-se depósitos conhecidos como Sulfetos Maciços Vulcanogênicos (VMS, em inglês) e os Depósitos Sedimentares Exalativos (SEDEX, em inglês). Com relação à segunda pergunta, os depósitos do tipo VMS formam-se na região próxima ao centro de exalação, em que são depositados sulfetos ricos em cobre, zinco, chumbo, ferro, entre outros elementos, enquanto que nas zonas mais distantes do ponto exalativo, formam-se os depósitos do tipo SEDEX, cuja gênese está associada à sedimentação de argilominerais e também à precipitação sílica. Por último, sanando a dúvida do diretor de exploração, vimos que nos nódulos polimetálicos, que se encontram depositados no fundo dos oceanos, há uma quantidade significativa de Fe-Mn-Ni-Cu-Co.

Com isso, você será capaz de dirimir esses primeiros questionamentos do diretor e poderá orientá-lo melhor no planejamento das próximas etapas exploratórias.

Faça valer a pena

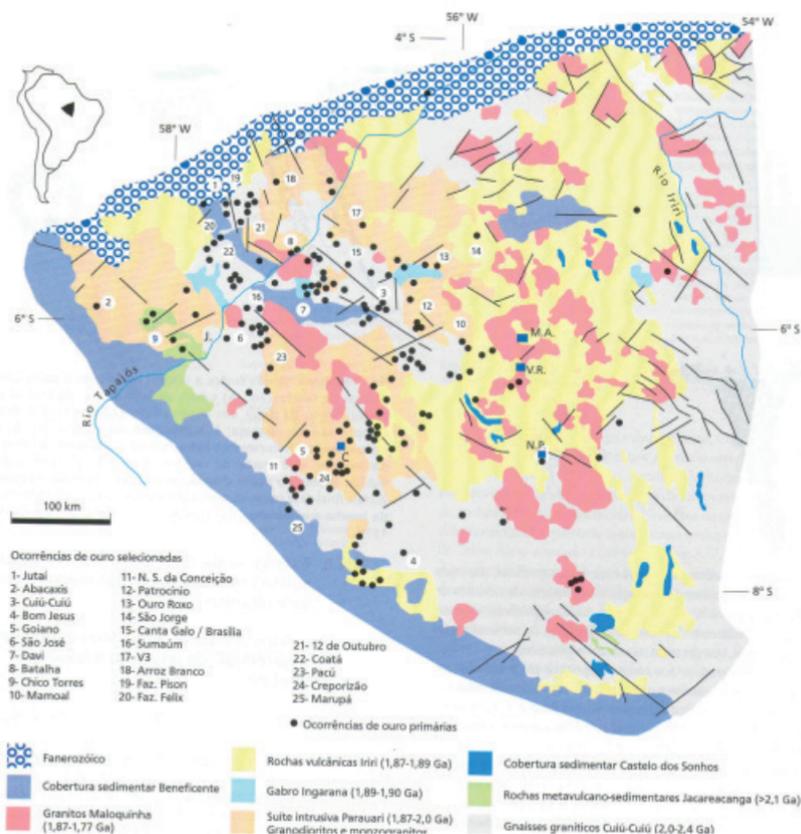
1. Os depósitos minerais relacionados ao ambiente magmático endógeno estão relacionados ao processo de consolidação por meio da cristalização fracionada dos minerais de grandes volumes de rochas. Nessas situações, normalmente, os depósitos tendem a apresentar depósitos volumosos e diversificados, mas são dependentes da natureza geoquímica do magma fonte.

Sobre os exemplos de depósitos minerais magmáticos endógenos, assinale a alternativa que representa um tipo de depósito gerado nesse ambiente:

- a) Depósito de ouro epitermal.
- b) Depósito de pórfiro cuprífero.
- c) Depósito de laterita de ferro.
- d) Depósito de cromita (cromo).
- e) Depósito de plácer diamantífero.

2. A Província Aurífera de Tapajós (PAT), situada entre os estados de PA, MT e AM, é, provavelmente, a maior província aurífera do Brasil. Nela, encontram-se diversos depósitos de ouro que foram avaliados e considerados viáveis para exploração e, portanto, tornaram-se minas. Esses depósitos de ouro estão relacionados ao hidrotermalismo que ocorreu na região, logo, são considerados depósitos epitermais.

Mapa geológico da Província Aurífera de Tapajós (PAT)



Fonte: Biondi (2003, p. 152).

Sobre os depósitos de ouro epitermal, avalie as alternativas abaixo e assinale a resposta correta:

I- Existem dois subtipos de depósitos epitermais de ouro: os ácidos sulfatados (alta sulfetação), que se associam às rochas graníticas, e os depósitos epitermais do tipo sericita-adulária (baixa sulfetação), que ocorrem, usualmente, em relação com as rochas vulcânicas;

II- As mineralizações geralmente ocorrem na forma de filões e possuem, na média, volumes menores que 2 milhões de toneladas. As médias dos teores de Au ficam abaixo dos 10 ppm e os de Ag entre 18 e 130 ppm.

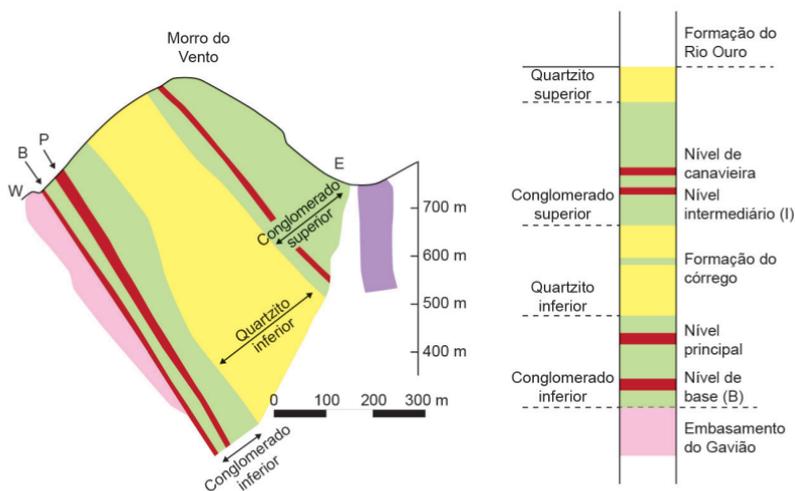
III- Em algumas situações, os depósitos de ouro possuem alguns outros elementos economicamente importantes, como Ag, Zn, Pb e Cu.

Considerando as alternativas expostas acima, assinale o item que corresponde à resposta correta:

- a) Estão corretas as alternativas I e II, apenas.
- b) Estão corretas as alternativas I e III, apenas.
- c) Estão corretas as alternativas II e III, apenas.
- d) Está correta a alternativa II, apenas.
- e) Todas as alternativas estão corretas.

3. A Figura a seguir ilustra um modelo geológico dos depósitos de ouro e urânico da Serra da Jacobina, na Bahia. A fonte de urânio são os minerais de uraninita e brannerita, enquanto que o ouro ocorre na sua forma nativa, só que possui uma característica específica com relação à sua forma: ele ocorre com um formato arredondado.

Modelo geológico do depósito de urânio e ouro da Serra da Jacobina (BA): A) Perfil geológico mostrando a distribuição da mineralização; B) Perfil estratigráfico do depósito; C) Legenda das rochas que formam o depósito ou estão associadas a ele



-  Rochas ultrabásicas
-  Formação Cruz das Almas
-  Formação do Rio do Ouro
-  Formação do Córrego
-  Embasamento do Gavião
-  Principais níveis mineralizados

Fonte: adaptada de Biondi (2003, p. 298).

Analisando a descrição apresentada acima, juntamente à figura, é possível concluir que o depósito de ouro e urânico da Serra da Jacobina é de natureza:

- a) Magmática.
- b) Sedimentar.
- c) Supergênica.
- d) Hidrotermal.
- e) Vulcano-exalativa.

Seção 4.3

Recursos energéticos

Diálogo aberto

Aluno, nesta última seção vamos estudar alguns assuntos ligados aos recursos energéticos, especialmente aqueles que são fonte de hidrocarbonetos, tanto convencionais como não convencionais, como é o caso do carvão, petróleo, gás, etc. Sobre isso, iniciaremos discutindo sobre o processo de formação do carvão, seus tipos e as principais características distintivas do ponto de vista formativo e energético. Abordaremos sobre a gênese do petróleo e do gás natural, destacando os fatores essenciais para sua formação, bem como os elementos e processos que interagem para a formação do sistema petrolífero, ou seja, quais são as etapas necessárias para a formação de uma acumulação de óleo e gás natural. Na sequência, trabalharemos os assuntos relacionados aos recursos energéticos não convencionais, mostrando quais são os principais tipos e as características básicas. Veremos como o calor natural que emana da Terra pode ser usado para a geração de energia em certos lugares, destacando as duas maneiras básicas de aproveitamento, e finalizaremos com uma breve discussão sobre os problemas ambientais associados à exploração dos recursos energéticos naturais.

Porém para que consigamos continuar o aprendizado, primeiramente, coloque-se na situação em que você trabalha numa empresa de exploração mineral que durante alguns anos desenvolveu um programa de prospecção mineral que culminou na seleção de um local para a implantação de uma mina de carvão e ouro. Você está responsável pela produção de um memorial descritivo que deverá orientar as etapas futuras para que a atividade saia do papel. A produção desse material, que deverá ser apresentado aos planejadores da empresa e aos potenciais investidores, foi dividida em três etapas. Na primeira, expôs alguns conceitos importantes a serem considerados antes da implantação da mina (*f.c.*, minerais de minério e ganga, etc.). Na segunda etapa, você descreveu o modelo

geológico que gerou a concentração de ouro. Agora, nesta última fase, você precisa incluir no memorial uma detalhada análise de diferentes processos relacionados desde a gênese do material a ser explorado e análise de qualidade do mesmo, até possíveis barreiras ambientais futuras, possivelmente geradas pela extração de carvão e ouro. Desse modo, você e sua equipe se mostrarão aptos a organizar os investimentos a serem recebidos para o desenvolvimento da atividade. Pensando nisso, para que o material fique adequado ao propósito, é imprescindível que sejam abordados alguns pontos: **Quais são os dois principais processos responsáveis pela formação do carvão encontrado na mina? Qual deve ser o tipo de carvão a ser preferencialmente explorado na mina? Antevendo possíveis problemas ambientais, qual o possível impacto ambiental causado pela extração de carvão (e ouro)?**

Agora vamos pôr a mão na massa! Reflita sobre como esses pontos devem ser resolvidos e incluídos no memorial e lembre-se: você não está sozinho. Para ajudá-lo nessa tarefa vamos apresentar como ocorre o processo de transformação da matéria orgânica vegetal em carvão e quais os principais processos responsáveis por isso. Além disso, veremos quais são os tipos de carvão que existem e quais são os melhores a serem explorados devido às características energéticas e composicionais. Por último, veremos o principal problema ambiental associado à exploração de minas de carvão (e também de ouro!), algo que deve ser tomado em conta antes da mina entrar em operação. Portanto, dedique um tempo a estudar o assunto e boa sorte!

Não pode faltar

Na seção anterior estudamos alguns exemplos de depósitos minerais formados em distintos ambientes geológicos. Agora, aprenderemos como alguns tipos de recursos energéticos - fundamentalmente aqueles formados à base de hidrocarbonetos - são formados, como se acumulam e qual sua importância energética. Apesar de muitos desses recursos apresentarem uma decadência na demanda, os recursos não renováveis ainda imperam em todo o globo devido, principalmente, ao nosso nível de conhecimento técnico sobre o assunto e a já estabelecida rede

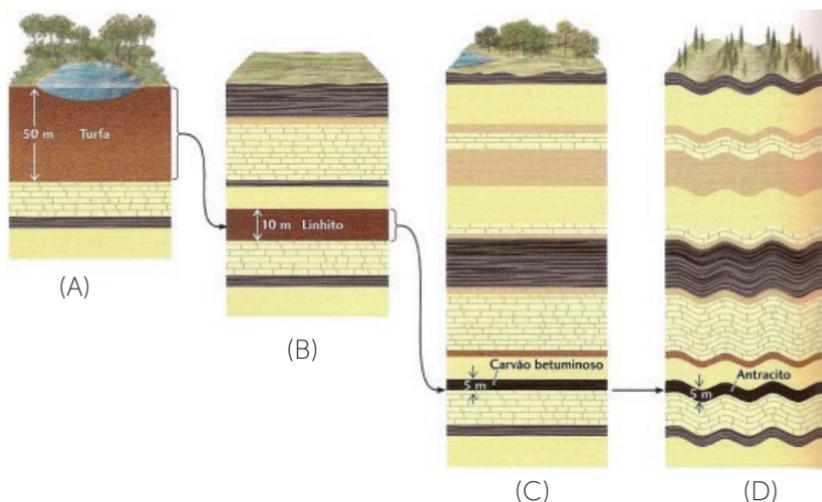
de produção e distribuição desses bens. Dessa forma, mesmo que as chamadas fontes renováveis (ou de baixo carbono) tendam a crescer exponencialmente, a exploração de grande parte dos hidrocarbonetos permanecerá sendo explorada pelas próximas décadas. Por isso, compreender a formação de carvão, petróleo (óleo), gás natural, *shale gas*, etc. ainda é muito importante.

Dentre esses recursos, vamos tratar, primeiramente, do carvão mineral. Atualmente tratado como vilão ambiental, o carvão permaneceu (e ainda permanece em alguns países, como China e Índia) como a principal fonte de energia das últimas décadas até a descoberta de extensas acumulações de óleo e gás. Sua formação está relacionada à concentração de matéria orgânica de origem continental e, portanto, predominantemente vegetal, que a partir do soterramento e da compactação em conjunto com os sedimentos em um ambiente anaeróbico (livre de bactérias), acaba sendo transformada em uma rocha sedimentar com diferentes porcentagens de carbono. A transformação que a matéria orgânica sofre deve-se ao aumento de pressão e temperatura, dois fatores que causam a quebra dos compostos orgânicos originais em produtos mais simplificados, já que uma grande concentração de elementos voláteis e água são expelidos nesse processo. Nesse sentido, a principal matéria-prima do carvão é a celulose ($C_6H_{10}O_5$), que representa o polissacarídeo estrutural fundamental das plantas.

Naturalmente, o carvão possui diferentes estágios formativos, que refletem o grau de maturação ou carbonificação (Figura 4.13): a) Na situação A, ocorre o acúmulo superficial de matéria orgânica vegetal, principalmente de restos de folhas, gravetos, galhos e outros fragmentos menores de matéria orgânica. Nessa configuração, há a formação de pântano, um local úmido com muita vegetação, que é, gradativamente, soterrado, formando a turfa; b) Na situação B, a turfa é comprimida e há uma perda relativamente significativa de elementos voláteis e água, ao passo que ocorre um enriquecimento de carbono. Nessa etapa forma-se o produto denominado **linhito**, que possui um poder calorífico mais elevado que a **turfa**; c) Na etapa C, quando o **linhito** encontra-se com centenas ou até mesmo milhares de metros de sedimentos sobrepostos, a matéria orgânica se transforma

num outro produto, denominado **carvão betuminoso**. Nesse momento, o carvão já possui um poder calorífico elevado, com grande porcentagem de carbono; e d) No estágio D, em uma situação mais avançada, o soterramento e a deformação (muitas vezes causadas pelo tectonismo) causam a alteração estrutural do carvão, metamorfolizando os componentes minerais. Nesse último estágio evolutivo, o carvão passa a denominar-se **antracito** e sua composição é quase que formada exclusivamente por carbono (até 96%).

Figura 4.13 | Principais estágios formativos do carvão, da turfa ao antracito



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

Como é possível perceber, essa classificação do carvão em quatro tipos é baseada em alguns fatores, como descritos acima, mas cada tipo também possui outros parâmetros que os diferenciam, como podemos observar no Quadro 4.3. A porcentagem de alguns compostos encontrados e o seu poder calorífico irão definir a qualidade do carvão como fonte de energia.

Quadro 4.3 | Características dos diferentes estágios de maturação do carvão

Parâmetros	Turfa	Linhito	Carvão	Antracito
Densidade (kg / m^3)	1.000	1.000 a 1.300	1.200 a 1.500	1.300 a 1.700

Parâmetros	Turfa	Linhito	Carvão	Antracito
Umidade (%)	65 a 90	15 a 45	1 a 3	----
Carbono (%)	± 55	65 a 75	75 a 90	90 a 96
Hidrogênio (%)	± 6	5	4,5 a 5,5	2 a 5
Oxigênio (%)	± 33	25	3 a 11	4 a 11
Compostos Voláteis (%)	± 60	± 40	10 a 45	3 a 10
Cinzas (%)	± 10	± 9	0,5 a 40	3 a 30
Poder calorífico (cal / g)	4.000 a 5.700	Até 5.700	5.700 a 9.600	8.200 a 9.200
Brilho	Fosco	Baixo	Moderado	Alto

Fonte: adaptado de Teixeira et al. (2003, p. 473).



Assimile

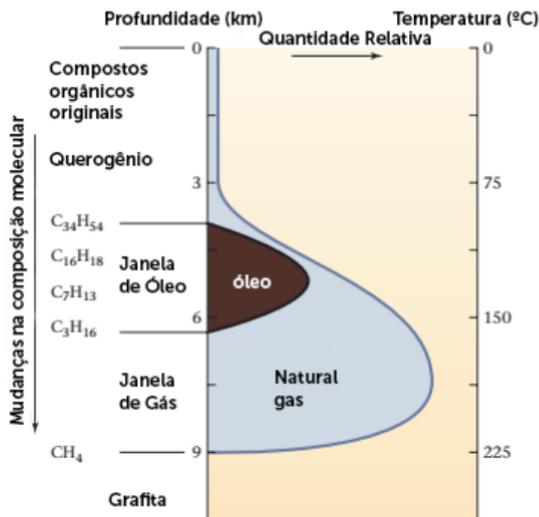
Embora 95% das reservas mundiais de carvões sejam formadas por matéria orgânica de fonte terrestre, dando origem ao **carvão húmico**, existe uma pequena quantidade de carvão formada pelo superaquecimento da matéria orgânica de origem marinha (principalmente algas marinhas), processo responsável pela formação do **carvão sapropélico**.

Diferentemente do carvão, no entanto, o petróleo (óleo) e o gás natural são majoritariamente formados pela acumulação e posterior modificação de matéria orgânica de origem marinha, principalmente do fitoplâncton e zooplâncton, que se referem, genericamente, a pequenas formas de vida (geralmente menores que 0,5 mm) vegetais e de animais marinhos, respectivamente. Esses organismos, quando mortos, afundam e se acumulam no fundo dos lagos, mares e oceanos, sob condições de baixa energia deposicional, isto é, em água calmas. Nessas situações, os grãos do tamanho silte e a argila também são sedimentados, formando um material lamoso rico em matéria orgânica, que sob condições anóxicas (sem a presença de oxigênio) fica preservado. A medida

que esse material é soterrado, muitas vezes, além dos 2 a 3 km de profundidade, a matéria orgânica presente começa a sofrer reações químicas, devido ao aumento de pressão e temperatura, gerando um material chamado **querogênio**.

O querogênio representa uma fração da matéria orgânica acumulada na rocha sedimentar que é insolúvel à maioria dos solventes orgânicos e sua composição é caracterizada pela presença de algas, pólenes, restos de vegetais, vitrinita e outros materiais sem estrutura. A rocha que contém esse tipo de material é chamada, em geologia do petróleo, de **rocha fonte** ou **geradora** (*source rock*), ou seja, a origem do óleo e do gás natural. Essa rocha fonte poderá produzir tanto óleo como gás natural, fator que irá depender da natureza da matéria orgânica ou melhor ainda, do tipo de querogênio. Por exemplo, querogênios do tipo I e II são mais propensos a gerarem óleo e gás (em menor proporção), enquanto o querogênio do tipo III gera, fundamentalmente, gás natural. O processo de geração, além de necessitar desses tipos específicos de matéria orgânica, precisa ocorrer em certos intervalos de temperatura, denominados janelas de geração de óleo (*oil window*) e gás (*gas window*), como demonstra a Figura 4.14. Se a temperatura atinge patamares maiores que 90 °C, as moléculas originais começam a se quebrar, formar óleo e um pouco de gás, enquanto em temperaturas acima de 160 °C, qualquer óleo remanescente (e o próprio querogênio) produz somente gás natural. Acima de 250 °C, toda a matéria orgânica é transformada em grafita.

Figura 4.14 | Representação das janelas de geração de óleo e gás e respectivos intervalos de temperatura



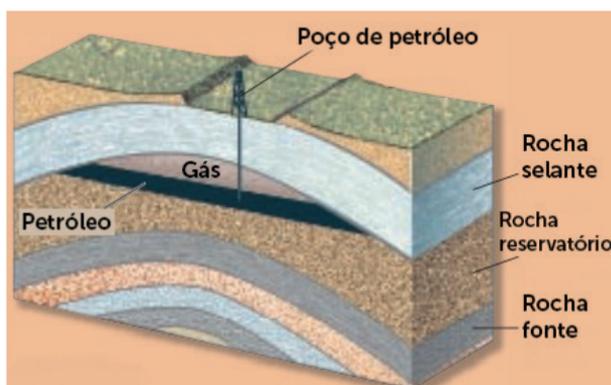
Fonte: Marshak (2008, p. 491).

Uma vez gerados, óleo e gás não permanecem na rocha fonte. Devido às suas características, esses dois fluidos tendem a deslocar-se para regiões de menor pressão, desenvolvendo uma trajetória primária de escape da rocha fonte para uma rocha adjacente, num processo que chamamos de **migração primária**. Em muitos casos, essa migração não é única e os fluidos continuam sua tendência ascendente por meio de passagem em rochas permeáveis ou até mesmo por falhas e fraturas geológicas. Nesse caso, referimo-nos ao processo de **migração secundária**. Essa última migração só irá cessar quando o óleo e/ou gás encontrarem uma barreira e ficarem acumulados em rochas com boa porosidade e permeabilidade (**rocha reservatório**), como um arenito quartzoso e um calcário fraturado, por exemplo.

Porém o acúmulo só ocorre quando acima da rocha reservatório existir uma **rocha selante**, a qual deve possuir pouca porosidade e permeabilidade quase nula ou inexistente (como um argilito não fraturado ou uma camada de sal). Além disso, para que os fluidos não espacem lateralmente, a configuração geométrica tridimensional dessas rochas deve envolver a ocorrência de uma estrutura de

fechamento proporcionada por uma **armadilha** (ou **trapa**). Todos esses elementos – rocha fonte, reservatório e selante – em conjunto com os processos – geração de óleo, migração e formação da armadilha – constituem um **sistema petrolífero**, ou seja, um conceito integrador que abrange todas as etapas necessárias para a formação de uma acumulação de óleo e gás natural (Figura 4.15). Além disso, cabe destacar que, para que um sistema petrolífero ocorra, é necessário um sincronismo entre as etapas, pois somente na ordem certa é que uma acumulação acontece.

Figura 4.15 | Representação de um campo de óleo e gás contemplando todos os elementos do sistema petrolífero que convergiram para formação da acumulação



Fonte: Marshak (2008, p. 495).



Refleta

Sobre o sincronismo do sistema petrolífero, reflita: o que acontecerá se a migração secundária ocorrer antes da formação da rocha selante e da trapa?

Carvão, gás natural e petróleo, da maneira como apresentamos, compreendem uma gama de recursos denominados convencionais. No entanto, tem-se popularizado outros recursos, ditos não convencionais, que se constituem fontes alternativas de energia. São assim denominados por envolverem técnicas de extração mais difíceis, métodos não convencionais de produção de óleo ou gás natural e, geralmente, “atacam” outros elementos do sistema petrolífero que não a rocha reservatório. Além disso, também são

incluídos, nesse caso, os recursos energéticos cujos processos geológicos formativos são particulares, como é o caso dos hidratos de gás.

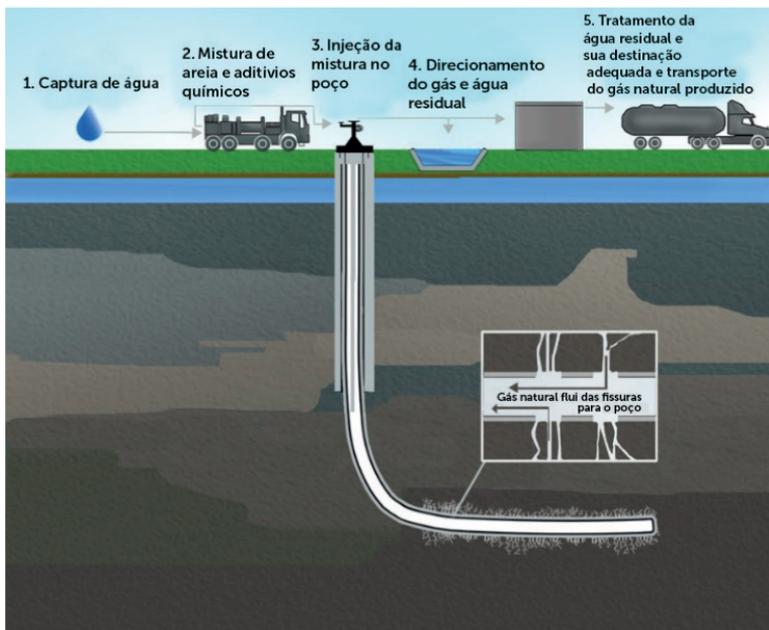
Dentro desse grupo é importante destacar o *shale gas* (ou gás de folhelho, como foi traduzido à língua portuguesa. Nota: o termo “gás de xisto” é totalmente errôneo, pois xisto é uma rocha metamórfica que não contém gás), um dos principais recursos energéticos mais debatidos atualmente, sendo desenvolvido em alguns países, como Estados Unidos e Argentina, e banido em outros, como França, Alemanha e Escócia. Esse recurso corresponde ao gás natural trapeado em formações geológicas de pouquíssima permeabilidade, como é o caso dos folhelhos ricos em matéria orgânica que atingiram a janela de geração de gás. Nesse caso, é como se a rocha geradora (fonte) do sistema petrolífero convencional não permitisse a migração primária do gás e todo o recurso ficasse aprisionado nela. Assim, desse modo, a extração do gás natural deve ser feita por meio da estimulação mecânica, por meio do faturamento hidráulico, da formação que contém o gás. Esse processo, conhecido como *fracking*, envolve a injeção de milhões de litros de água e outros aditivos minerais e químicos sob pressão nessas rochas, causando o seu faturamento induzido.



Exemplificando

O processo de *fracking* ocorre em, aproximadamente, cinco processos básicos, como demonstra no exemplo da Figura 4.16: **1º) Captura de água** (superficial ou subterrânea) para injeção; **2º) Mistura da água com areia** (para manutenção da abertura das fraturas geradas) e **químicos** (para indução do fluxo ascendente do gás, entre outras funcionalidades); **3º) Injeção da mistura no poço de produção**; **4º) Direcionamento do gás e da água residual**; e **5º) Tratamento da água residual, destinação da água e distribuição do gás produzido**.

Figura 4.16 | Etapas da produção do *shale gas* por meio do faturamento hidráulico (fracking)



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/73/Hydraulic_Fracturing-Related_Activities.jpg>. Acesso em: 27 dez. 2017.

Similarmente ao *shale gas*, no qual o processo de produção também é o *fracking*, temos o denominado *tight sand gas* (ou simplesmente *tight gas*), que corresponde ao gás natural aprisionado em rochas porosas, mas com permeabilidade extremamente baixa, tipicamente em arenitos e carbonatos. Portanto não se deve confundir com o *shale gas*, que é o gás natural acumulado em folhelhos, ou seja, rochas de granulometria fina. Outro depósito de gás é o CBM (*Coal Bed Methane*), encontrado em depósitos de carvão. Nesse contexto, o gás de metano (principal gás do CBM) permanece adsorvido nas superfícies dos grãos que formam o carvão. Assim, para produzir esse tipo de recurso é necessário liberar o metano adsorvido e favorecer o seu fluxo para captura do gás.

Existem, também, outras fontes alternativas de petróleo, como o *shale oil* e as *tar sands*. O *shale oil* refere-se, na verdade, à rocha geradora (fonte) que não atingiu a janela do óleo, mas possui uma quantidade de querogênio que permite sua produção. Assim, o processo de produção envolve a indução do aquecimento de forma artificial (pirólise), que converte a matéria orgânica em líquido dentro de retortas. No Brasil, existe uma única unidade de produção de *shale oil*, na cidade de São Mateus do Sul (Paraná). Já os depósitos de *tar sands*, ou areias betuminosas, referem-se às acumulações naturais de areia e argila com água e betume (asfalto). Apesar de pouco comum, depósitos de areias betuminosas são intensamente explorados na Bacia de Athabasca (Canadá) e também na Venezuela (*Faja Petrolífera del Orinoco*). O último recurso de hidrocarbonetos que abordaremos é o hidrato de gás, um composto cristalino no qual as moléculas de água encapsulam as de gás metano e carbônico (CO_2). Esse tipo de material é encontrado no fundo oceânico, em que a espessura da lâmina d'água é superior a 500 m (CLENNELL, 2000).



Pesquise mais

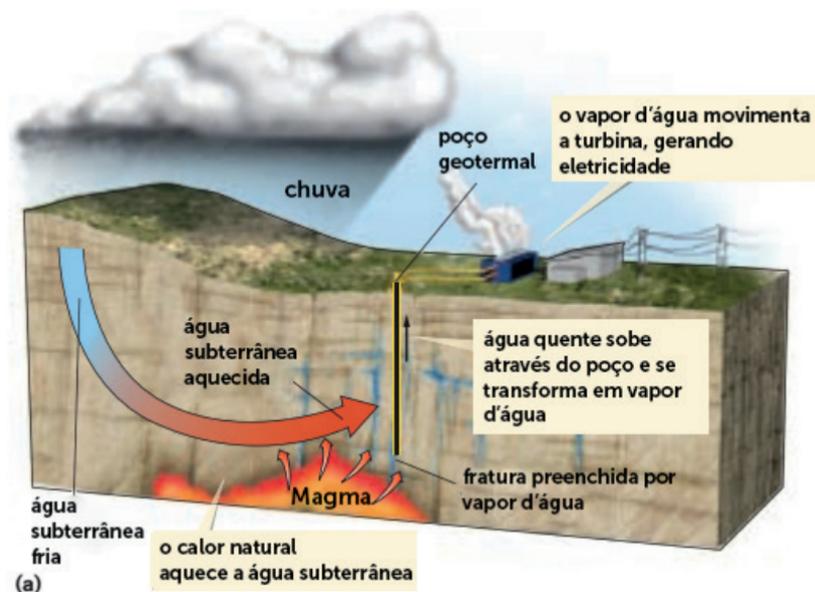
Para aprender mais sobre os hidratos de gás, leia o artigo publicado na *Brazilian Journal of Geophysics*, que trata do tema de forma mais aprofundada.

CLENNELL, M. B. Hidrato de gás submarino: natureza, ocorrência e perspectivas para exploração na margem continental brasileira. **Brazil. Journal of Geophysics**, v. 18, n. 3, ago. 2000. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbgj/v18n3/a13v18n3.pdf>>. Acesso em: 27 dez. 2017.

Outra forma de aproveitamento da energia terrestre é por meio do fluxo de calor geotérmico. Nesse sentido, muitos países, como Quênia e Islândia, tem aproveitado seu posicionamento geotectônico para a geração de energia. Nesses locais, o gradiente geotérmico é elevado (isto é, o incremento de temperatura com a profundidade é grande) devido à contínua atividade vulcânica. Nesse contexto, é possível gerar energia por meio da utilização do vapor gerado pela circulação da água subterrânea próximo ao magma, como mostra a Figura 4.17, ou por meio da injeção artificial de água

superficial para zonas próximas à câmara magmática. Em ambos os casos, o vapor movimentada as turbinas que gerarão energia elétrica.

Figura 4.17 | Esquema simplificado do sistema de geração de energia elétrica devido à existência de um sistema geotermal



Fonte: Marshak (2008, p. 512).

Todos os recursos naturais, quando explorados, causarão um determinado impacto ambiental. A extração de carvão, além de causar a degradação da vegetação, que deve ser retirada para o desenvolvimento da mina, também causa o aumento de emissão de material particulado para a atmosfera e pode dar origem à Drenagem Ácida de Mina (DAM), um dos problemas mais comuns em minas com presença de minerais sulfetados, como depósitos de ouro e carvão. Outros tipos de recursos, como petróleo e gás natural, apesar de serem explorados de fontes pontuais, possuem a propensão de causar enormes derrames de óleo e gás em ambientes marinhos, onde ocorrem os principais campos petrolíferos. Os procedimentos de faturamento hidráulico para obtenção do *shale gas* também podem impactar a qualidade das águas subterrâneas e gerar (micro)sismos, caso as medidas

mínimas de segurança não sejam adotadas. Até mesmo as usinas geotérmicas, ditas ambientalmente corretas, podem causar impactos ambientais significativos. Isso porque existem usinas que usam um sistema de “ciclo aberto” no qual os rejeitos voláteis da geração de energia são emitidos para a atmosfera, causando aumento de sulfeto de hidrogênio (H_2S), CO_2 , amônia, metano e boro em circulação pelo ar. A qualidade da água subterrânea também pode ser afetada devido ao processo de reinjeção de água em poços geotérmicos para aproveitar a água residual que é utilizada no sistema de produção. Essa água, rica em enxofre, pode causar um desequilíbrio ecológico e na saúde pública, se não houver monitoramento.

Sem medo de errar

Para que consigamos resolver a situação apresentada no início da seção, é importante lembrá-la brevemente. Sobre isso, expusemos um contexto hipotético em que você trabalha para uma empresa de exploração mineral que desenvolveu ao longo de alguns anos um projeto de prospecção que resultou na descoberta de um jazimento de ouro e outro de carvão, ambos relativamente próximos. Agora o projeto encontra-se na fase de viabilidade de desenvolvimento de mina e você ficou responsável pela confecção de um memorial descritivo que orientará os projetos futuros para que a atividade saia do papel, sendo que esse material deverá ser apresentado aos planejadores da empresa e aos potenciais investidores. Pensando nisso você dividiu seu trabalho em três etapas, das quais duas primeiras já foram apresentadas anteriormente. Agora, nesta última, você deve apresentar uma breve descrição do processo de formação dos depósitos de carvão, destacando alguns aspectos importantes, dentre eles: **Quais são os dois principais processos responsáveis pela formação do carvão encontrado na mina? Qual deve ser o tipo de carvão a ser preferencialmente explorado na mina? Antevendo possíveis problemas ambientais, qual o possível impacto ambiental causado pela extração de carvão (e ouro)?**

Para responder ao seu primeiro questionamento, devemos nos lembrar, primeiro, de como ocorre a acumulação de matéria orgânica para formar o carvão. Com relação a isso, vimos que o

ambiente ideal de formação do carvão é uma região úmida, com muita vegetação terrestre, isto é, a base do carvão são restos de folhas, gravetos, galhos e outros fragmentos menores de matéria orgânica. Esse material, com o passar do tempo, vai sofrendo soterramento pelos sedimentos, o primeiro processo fundamental para formação do carvão. Esse fato faz com que, geralmente, seja expulso o oxigênio, deixando o ambiente em condições anaeróbicas, prevenindo o desenvolvimento de bactérias que causam a degradação da matéria orgânica. O aumento da espessura de sedimentos causa a compactação (o segundo processo fundamental), e quanto mais profundamente a matéria orgânica vai sendo soterrada e compactada, maior a pressão e temperatura à que fica submetida a turfa (o primeiro estágio de maturação do carvão). Gradualmente, a turfa vai sendo transformada em linhito, depois em carvão betuminoso e, por último, em antracito. Essa tendência representa uma diminuição da espessura do carvão, mas um enriquecimento na qualidade energética.

Com relação ao segundo ponto a ser abordado, vimos ao longo do livro didático que existem quatro tipos básicos de carvão, ou melhor, de estágios de maturação ou carbonificação. A turfa é o estágio inicial, com grande concentração de umidade, teor de oxigênio e compostos voláteis. Sua porcentagem em carbono é aproximadamente de 50 a 55% e possui uma boa quantidade de biomassa original (Figura 4.18A). O linhito representa o segundo estágio formativo do carvão e já apresenta menos compostos voláteis e menor teor de oxigênio e umidade. Além disso, o poder calorífico (energético) já é bem maior do que o da turfa e o aspecto do carvão já se assemelha a uma rocha (mais compacta), conforme mostra a Figura 4.18B. Os dois estágios de maturação principal do carvão são os seguintes, o carvão betuminoso (Figura 4.18C) e o antracito (Figura 4.18D) – os dois principais alvos de exploração dentro de uma mina de carvão. Isso porque esses dois possuem uma quantidade mínima de umidade, oxigênio e compostos voláteis, além de poder contar com uma grande concentração de carbono (até 96% no caso do antracito), podendo atingir um poder calorífico de 9.200 cal/g, o que o torna excelente para utilização em usinas termelétricas, por exemplo.

Figura 4.18 | Estágios de maturação do carvão: A) Turfa; B) Linhito; C) Carvão betuminoso; D) Antracito

(A)



Fonte: <<https://www.flickr.com/photos/jsjgeology/16207616053>>. Acesso em: 30 dez. 2017.

(B)



Fonte: <<https://www.flickr.com/photos/jsjgeology/16827552535>>. Acesso em: 30 dez. 2017.

(C)



Fonte: <<https://www.flickr.com/photos/jsjgeology/8513510976>>. Acesso em: 30 dez. 2017.

(D)



Fonte: <<https://www.flickr.com/photos/jsjgeology/16941787095>>. Acesso em: 30 dez. 2017.

Sobre o último questionamento, como a preocupação ambiental tem aumentado e até mesmo as leis ambientais têm ficado cada vez mais rigorosas, faz-se necessário saber, antes de colocar a mina em operação, dos possíveis problemas a serem enfrentados. Nesse sentido, vimos que tanto nas minas de carvão como de ouro, pode ocorrer a chamada Drenagem Ácida de Mina (DAM), um dos problemas mais comuns devido à oxidação de minerais sulfetados (como pirita), que acaba sendo lixiviado para os cursos hídricos.

Agora, levando em conta que resolvemos todas as etapas relacionadas ao serviço hipotético que lançamos a você no início da unidade, comece a colocar no papel todas as informações aprendidas para que o memorial descritivo possa ser elaborado

e, em seguida, entregue aos planejadores e investidores do empreendimento.

Avançando na prática

Minerando para obter óleo e gás

Descrição da situação-problema

Imagine-se numa situação em que você, como responsável pela elaboração e pelo acompanhamento do plano de fogo de algumas minas para as quais sua empresa oferece consultoria, teve que se deslocar para uma unidade de exploração de *shale oil* no Brasil. Nesta unidade, que desenvolve a mineração dos folhelhos betuminosos pelo método de mineração convencional a céu aberto com utilização de explosivos, você se encontrou com o gerente encarregado de operação. Após fazer o seu trabalho, o gerente notou que você possuía um domínio sobre o tema, especialmente sobre os tipos de recursos não convencionais de obtenção de óleo e gás natural. Como a empresa receberia a visita de um grupo de alunos de uma universidade no dia seguinte, ele o convidou para ficar na empresa e auxiliar os técnicos nas explicações. Nesse contexto, sua tarefa era abordar outros tipos de recursos, além do *shale oil*, e após sua explicação, vários visitantes se mostraram interessados: por que, no caso do *shale gas*, é necessário realizar o faturamento hidráulico? Qual a diferença entre *shale gas* e *tight gas*? Por que é preciso conduzir a rocha que produz o *shale oil* a um reator (retorta)?

Resolução da situação-problema

Para que você consiga responder aos questionamentos levantados pelos visitantes da universidade que vieram à empresa, é necessário relembrar alguns conceitos importantes. Primeiramente, para responder à questão inicial, vimos que a realização do faturamento hidráulico (*fracking*) dos folhelhos que contém gás é imprescindível para a liberação do gás acumulado nos poros da rocha, já que, naturalmente, devido à baixa permeabilidade,

esse gás não pode sofrer migração primário e permaneceu na rocha geradora (fonte). Diferentemente do *shale gas*, o *thight gas* refere-se ao gás que fluiu da rocha geradora para uma rocha com pouquíssima permeabilidade, sendo esta, normalmente, de natureza sedimentar clástica (como o arenito). Nesse caso, apesar do gás ter sofrido migração primária, ele permanece em rochas adjacentes à rocha geradora e não consegue mais fluir até o reservatório. Nesse sentido, também se utiliza o *fracking* para a obtenção do gás. Por último, vimos que o *shale oil* é nada menos que a rocha geradora, rica em matéria orgânica, que não atingiu a janela do óleo, mas possui uma quantidade de querogênio que permite sua produção. Por isso, o processo para produzir o recurso energético envolve a introdução da rocha dentro de retortas, induzindo o aquecimento de forma artificial (pirólise), convertendo a matéria orgânica em líquido.

Faça valer a pena

1. No ano de 2016, segundo dados da Associação Brasileira do Carvão Mineral (ABCM), o Brasil produziu mais de 11 milhões de toneladas de carvão, sendo o setor energético o seu principal consumidor, gerando um faturamento anual superior a 1 bilhão de reais. Esses dados mostram que, apesar da fama de vilão que o carvão adquiriu nos últimos anos, seu consumo ainda é expressivo.

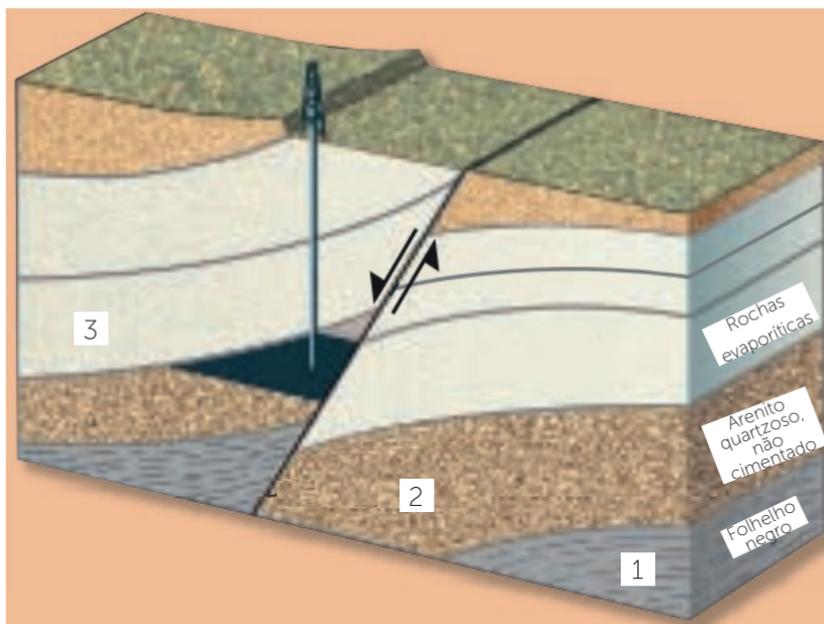
Fonte: <http://www.carvaomineral.com.br/conteudo/gm_estatisticas/estatisticas_2016.pdf>. Acesso em: 29 dez. 2017.

Sobre o carvão mineral, seu processo formativo e suas características, assinale a alternativa correta:

- a) O linhito é o último estágio de maturação do carvão mineral.
- b) A concentração de carbono na turfa é maior que no carvão betuminoso.
- c) A porcentagem de compostos voláteis no antracito é menor que no linhito.
- d) A origem da matéria orgânica que forma o carvão é, predominantemente, de origem marinha.
- e) A espessura das camadas de carvão possui uma tendência crescente da turfa ao antracito.

2. O sistema petrolífero é um conceito integrador que surgiu a partir da análise dos elementos e processos geológicos responsáveis pela acumulação de petróleo e gás. Nesse sentido, esse conceito vem sendo usado em todo o mundo, principalmente durante a fase exploratória, isto é, quando estudos prévios para a descoberta de petróleo e gás são conduzidos. Sobre isso, e supondo que os estudos geológicos chegaram à conclusão para o início da produção de um campo hipotético, analise a figura a seguir.

Imagem hipotética de um campo de óleo e gás exibindo os principais componentes do sistema petrolífero.



Fonte: adaptado de Marshak (2008, p. 495).

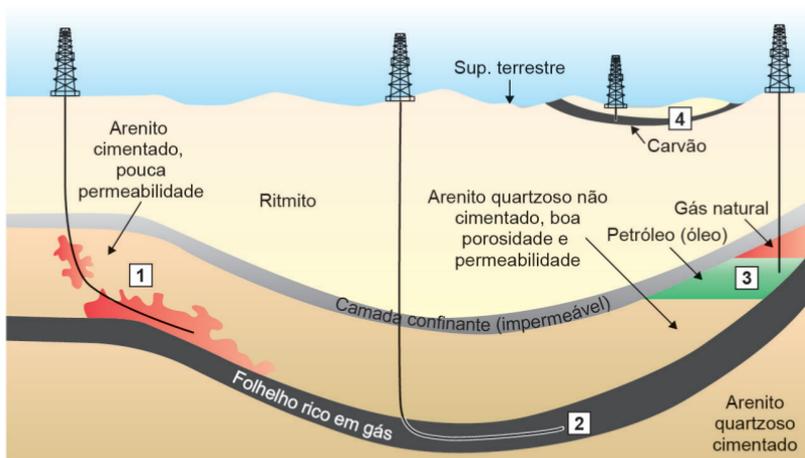
Considerando a imagem acima e todas as características de um sistema petrolífero, assinale a opção verdadeira:

- a) O número 1 corresponde à rocha reservatório de um sistema petrolífero convencional.
- b) O número 2 indica a rocha geradora ou fonte, isto é, a rocha de onde provém o petróleo e gás.
- c) O número 2 indica a rocha reservatório de um sistema petrolífero não convencional, com pouca porosidade.

- d) O número 3 representa a rocha selante, também denominada de capeadora, sendo o sal um exemplo.
- e) O desenvolvimento da falha geológica é posterior à acumulação de óleo e gás.

3. Os recursos energéticos não convencionais têm surgido como uma alternativa a muitos países para a manutenção ou, até mesmo, a reativação da indústria de hidrocarbonetos. Nesse cenário, mantém-se a produtividade e o fornecimento cada vez mais crescente de óleo e gás em todo o mundo, muito embora o consumo de energias “limpas” tenha também aumentado. Sobre esse assunto, analise a figura a seguir e as alternativas abaixo.

Ilustração de alguns dos tipos de recursos energéticos convencionais e não-convencionais.



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5d/Schematic_cross-section_of_general_types_of_oil_and_gas_resources_and_the_orientations_of_production_wells_used_in_hydraulic_fracturing.jpg>. Acesso em: 29 dez. 2017.

- I- Considerando as características descritivas da rocha, o número 1 simboliza um campo de *tight gas*.
- II- Analisando a descrição apresentada na imagem, o número 2 representa um campo de *shale gas*.
- III- O número 3 representa um campo de *tar sands* com presença de óleo e gás.

IV- A indicação simbolizada pelo número 4 indica um campo de produção de gás, principalmente metano, extraído por meio de um depósito de carvão (*Coal Bed Methane*).

Analisando as alternativas descritas acima, é possível concluir que:

- a) Estão corretas as alternativas I e II, apenas.
- b) Estão corretas as alternativas II e III, apenas.
- c) Estão corretas as alternativas III e IV, apenas.
- d) Estão corretas as alternativas I, II e IV, apenas.
- e) Todas as alternativas estão corretas.

Referências

- BIONDI, J.C. **Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. p. 377-423.
- CLENNELL, M. B. Hidrato de gás submarino: natureza, ocorrência e perspectivas para exploração na margem continental brasileira. Brazil. **Journal of Geophysics**, v. 18, n. 3, ago. 2000. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbg/v18n3/a13v18n3.pdf>>. Acesso em: 27 dez. 2017.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). **Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas**. Brasília: DNPM, 2016. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/anuario-mineral-brasileiro-2016-metalicos>>. Acesso em: 9 dez. 2017.
- MARSHAK, S. **Earth portrait of a planet**. 3. ed. Nova Iorque: W. W. Norton & Cia, 2008.
- PRESS, F.; GROTZINGER, J.; SIEVER, R.; JORDAN, T. H. **Para Entender a Terra**. Tradução de Rualdo Menegat (coord.). 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- SOTERO, A. M.; LAMARAO, C. N.; MARQUES, G. T.; RODRIGUES, P. R. S. Quartzo magmático e hidrotermal do depósito de ouro São Jorge, Província Aurífera do Tapajós, Pará: petrografia, microscopia eletrônica de varredura-catodoluminescência e implicações metalogenéticas. **Brazilian Journal of Geology**, v. 45, n. 4, p. 591-607, 2015.
- SOUZA, K. G.; MARTINS, L. R. S.; CAVALCANTE, V. M. M.; PEREIRA, C. V.; BORGES, L. Recursos Não-Vivos da Plataforma Continental Brasileira e Áreas Oceânicas Adjacentes. **Gravel**, Porto Alegre, p. 1-77, mar. 2009.
- TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T.R.; TOLEDO, M.C.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. 557 p.



ISBN 978-85-522-0733-7



9 788552 207337 >