

21

RECURSOS MINERAIS

Jorge S. Bettencourt
João B. Moreschi



Sem os recursos minerais, a humanidade não teria como subsidiar seu crescente desenvolvimento tecnológico. A aplicação de técnicas modernas, por vezes altamente refinadas, permitiu-lhe descobrir, obter e transformar bens minerais em bens manufaturados que tornaram a vida mais confortável. Nos primórdios da civilização, nós, humanos, utilizamos lascas de quartzo para confeccionar nossos instrumentos rudimentares de caça ou luta e hoje ainda utilizamos este mineral para produzir objetos sofisticados como transistores ou fibras ópticas.

Daquela época até hoje, uma diversidade de tipos de minerais e rochas vem sendo usada em quantidade crescente. As substâncias minerais, sejam metálicas, não-metálicas, combustíveis fósseis ou pedras preciosas, passaram a fazer parte inalienável de nossas vidas. Essa dependência, às vezes imperceptível, mantém e aprimora nossa qualidade de vida.

Volumes gigantescos de bens minerais estão sendo rapidamente extraídos de seus depósitos, o que pode levar à escassez ou mesmo exaustão dos mesmos. A demanda de bens minerais pelas futuras gerações é pauta de estudos dos governos, pois as acumulações econômicas de substâncias minerais úteis constituem porções muito restritas da crosta terrestre. Além disso, para a formação de qualquer bem mineral é necessário um período de tempo muito maior do que aquele decorrido desde quando começamos a utilizar as primeiras lascas de quartzo.

A conservação do recurso mineral, ou seja, fazer dele um uso adequado no atendimento de nossas necessidades e evitar os excessos de um consumo ambicioso, é uma atitude necessária para garantir o suprimento de insumos minerais praticamente imprescindíveis à manutenção de uma forma de desenvolvimento sustentável. Dentro dessa perspectiva, muitos metais são atualmente obtidos por meio de técnicas de reciclagem, a partir de bens manufaturados sucateados, assim como outros, menos abundantes na natureza, são substituídos por metais mais abundantes. Essa atitude permitirá que preservemos por maior tempo os recursos minerais, diminuindo assim o impacto ao meio ambiente.

Neste capítulo abordaremos de forma ampla vários conceitos básicos relativos aos diferentes tipos de depósitos minerais. De início, procuraremos olhar o depósito mineral do ponto de vista essencialmente geológico, mostrando como e porquê ele se forma, diferenciando-o das demais rochas que o envolvem, caracterizado por quantidades elevadas de um ou mais minerais úteis. Veremos que os depósitos minerais são formados por processos geológicos comuns, discutidos em capítulos anteriores.

Prosseguiremos comentando seu papel importante como fonte comercial de minerais e materiais rochosos necessários à fabricação de uma infinidade de produtos industriais, assim como apresentando noções sobre sua extração e aplicações. Também descreveremos simplificada e como os depósitos minerais são gerados.

Certamente, a partir deste ponto estaremos convencidos de que as ocorrências de substâncias minerais úteis, além de poderem constituir porções muito restritas na crosta terrestre, estão bastante espalhadas ao redor de nosso planeta e constituem recursos naturais finitos. Dessa forma, indicaremos em linhas gerais as ações necessárias à procura, descoberta e reposição de novos recursos minerais.

Por fim, esboçaremos um panorama sobre a situação mineral brasileira, enfocando aspectos de reserva, produção e comércio de suprimentos minerais.

21.1 Depósito Mineral: Conceitos Básicos

21.1.1 Recursos e reservas minerais

A expressão **recursos minerais** qualifica materiais rochosos que efetiva ou potencialmente possam ser utilizados pelo ser humano. Costumeiramente, representam desde porções relativamente restritas até grandes massas de crosta terrestre e a própria rocha ou um ou mais de seus constituintes – minerais ou elementos químicos específicos – despertam um interesse utilitário.

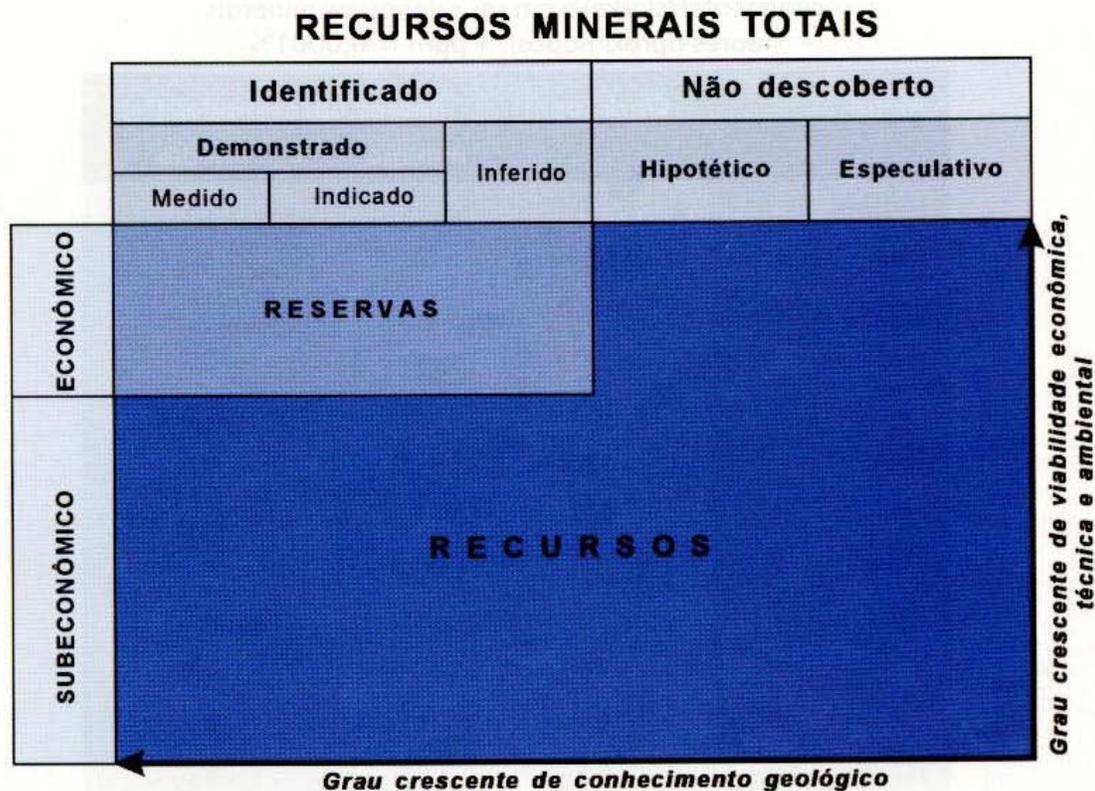


Fig. 21.1 Classificação de recursos minerais. Fonte: US Geological Survey Bull. 1450 A, 1976

Os recursos minerais podem ser distinguidos em diferentes classes, correspondentes a volumes rochosos discriminados de acordo com o grau de conhecimento geológico e técnico-econômico de suas diferentes porções (Fig. 21.1). Assim, a **reserva mineral**, como parte do recurso mineral, representa volumes rochosos com determinadas características indicativas de seu aproveitamento econômico. Por sua vez, a reserva mineral pode ser distinguida em três classes de reserva: inferida, indicada e medida, que refletem nesta ordem o nível crescente de pesquisa e conhecimento do depósito.

O estudo detalhado de um recurso ou reserva minerais pode levar à viabilidade técnica-econômica de um **depósito mineral**. Este, como um objeto geológico, é uma massa ou volume rochoso no qual substâncias minerais ou químicas estão concentradas de modo anômalo, quando comparadas com sua distribuição média na crosta terrestre, e em quantidade suficiente para indicar um potencial mineral econômico. Quanto maior for o **teor**, que é o grau de concentração dessas substâncias no depósito mineral, mais valioso será, pois somente a partir de um valor mínimo de teor é que suas substâncias úteis poderão ser extraídas com lucro. Assim, comumente se utili-

zam os termos **jazida mineral** e **minério** para designar o corpo mineral de onde suas substâncias úteis possam ser economicamente extraídas.

A identificação de um depósito mineral freqüentemente se inicia com o exame do **indício mineral** ou da ocorrência mineral. Essas expressões são praticamente equivalentes e, em essência, referem-se a concentrações usualmente superficiais de um ou mais minerais úteis para indicar a localização de um depósito mineral.

21.1.2 Como nasce um depósito mineral

As substâncias minerais, salvo raras exceções, estão presentes em seus depósitos em concentrações superiores àquelas com que participam na composição química média da crosta terrestre (Cap. 5), ou seja, acima de seu *clarke* (Tabela 21.1).

A razão entre o conteúdo (teor) de uma substância num minério e seu *clarke* é o chamado fator de concentração (f.c.).

f.c. = conteúdo no minério/*clarke*

Tabela 21.1 Conteúdos médios de alguns metais na crosta continental (*clarke*) e em seus depósitos minerais (teores aproximados). 1 ppm = 0,0001%

Metal	Clark (ppm)	Teores aproximados (%)	
		mínimo	médio
alumínio	82.300	17	22
ferro	56.300	20	40
titânio	5.650	3	7
manganês	1.000	7	20
zircônio	165	—	0,5
vanádio	120	0,12	0,2
cromo	102	7	30
níquel	84	0,25	1,1
zinco	70	1,5	4,5
cobre	60	0,35	1,0
cobalto	25	0,1	0,3
nióbio	20	0,34	0,6
chumbo	14	1,5	3,5
tório	9	0,01	0,05
urânio	3	0,005	0,13
estanho	2,3	0,1	0,4
arsênio	1,8	—	—
tungstênio	1,2	0,1	0,4
antimônio	0,2	0,5	1,2
ouro	0,004	1 (ppm)	6 (ppm)

Fonte: P. Laznicka, 1985.

Assim, nos casos do Al e do Pb, de acordo com os valores da Tabela 21.1, teríamos:

$$f.c._{Al} = 22\% / 8,2\% \approx 2 \text{ a } 3$$

$$f.c._{Pb} = 3,5\% / 14\text{ppm} \approx 2.500$$

Uma vez que a abundância dos elementos é variável na crosta terrestre, assim como há minérios que exigem maior ou menor conteúdo da substância útil, o valor do fator de concentração pode variar amplamente (Fig. 21.2).

O fator de concentração pode ser aplicado para estimar o grau de facilidade com que os depósitos minerais podem ser formados. Pelos valores dos fatores de concentração, podemos entender que,

para a formação de uma jazida de flúor ou de estanho, estes elementos deverão ser concentrados, respectivamente, em 200 e 2.000 vezes em relação às suas concentrações médias na crosta terrestre (*clarke*) ou a uma particular fonte com conteúdos de flúor e estanho iguais aos da crosta (Tabela 21.2).

Como diferentes tipos de rochas contêm diferentes quantidades de um mesmo elemento químico (ver Cap. 5), podemos dizer que as rochas onde o elemento está originalmente mais concentrado seriam as mais adequadas como fontes de depósitos minerais. Para a geração de um depósito de chumbo, por exemplo, cujo *clarke* é 14ppm, os fatores de concentração devem ser de cerca de 40.000 para

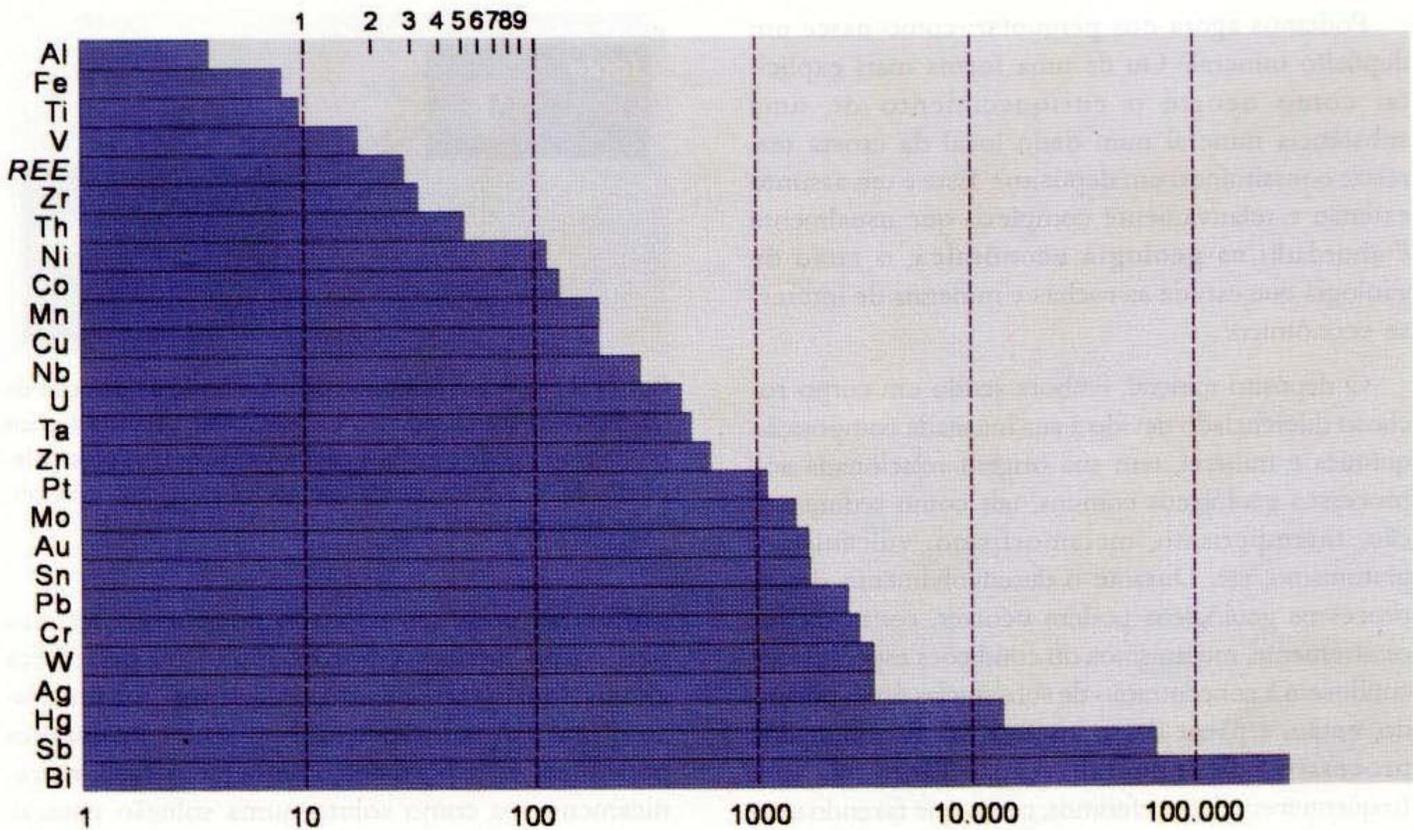


Fig. 21.2 Fatores de concentração necessários para a geração de minérios de alguns metais, baseados no clarke crustal. Escala logarítmica. Fonte: Laznicka, 1985.

uma rocha ultramáfica (teor médio de 1ppm de Pb), 2.000 para uma rocha granítica (que contém em média 19ppm de Pb) e 500 para argilas (com 80ppm de Pb em média). Os processos naturais responsáveis pela geração de minérios terão maior rendimento e eficiência partindo de fontes previamente enriquecidas.

Tabela 21.2 Comparação entre fatores de concentração

Elemento	Clarke (ppm)	Teor médio (%)	f.c.
Al	82.300	22	3
Fe	56.300	40	8
F	625	12	200
Sn	2,3	0,4	2000

Obs.: Os processos geradores dos depósitos de flúor ou estanho deverão ser mais eficientes que os de alumínio ou ferro para concentrar, num dado local da crosta terrestre, quantidades economicamente viáveis desses elementos.

Aparentemente, alguns depósitos minerais são gerados somente a partir de rochas fontes especiais, como é o caso dos depósitos de metais raros (elementos presentes na crosta em teores menores que 0,1% em peso), entre eles o estanho. Rochas fontes especiais são as que tiveram um modo particular de formação em relação às suas congêneres, tornando-se previamente enriquecidas em metais ou minerais úteis.

Assim, os depósitos primários de estanho estão associados a determinados granitóides que se distinguem dos demais por feições tectônicas, texturais, mineralógicas e químicas específicas. Os granitos estaníferos derivam de um magmatismo essencialmente silícico, típico dos estágios finais de um evento tectono-magmático (Cap. 6), ocorrendo junto às porções mais superiores de complexos rochosos intrusivos. Isto lhes confere feições químicas peculiares em relação a granitos normais, com aumento no conteúdo de elementos raros específicos como F, Rb, Li, Sn, Be, W, Mo e também em SiO_2 , Na_2O , e K_2O ; por outro lado, são mais pobres em MgO , CaO , Fe_2O_3 e TiO_2 que os granitos normais.

Podemos agora nos perguntar: como nasce um depósito mineral? Ou de uma forma mais explícita: como ocorre o enriquecimento de uma substância mineral num dado local da crosta terrestre constituindo um depósito? Este é um assunto extenso e relativamente complexo que usualmente é abordado na **geologia econômica**, o ramo da geologia que estuda as rochas e minerais de interesse econômico.

O depósito mineral, embora sendo um corpo rochoso diferenciado devido a sua inusitada composição química e mineral, tem sua origem relacionada aos processos geológicos comuns, tais como sedimentação, intemperismo, metamorfismo, vulcanismo, plutonismo, etc. Durante o desenvolvimento desses processos geológicos podem ocorrer, coeva ou sucessivamente, mecanismos ou condições especiais que conduzem à concentração de substâncias úteis, podendo, então, a partir desse instante ser denominados processos de mineralização. Tanto é que freqüentemente nos referimos, como que fazendo uma classificação de depósitos minerais, a depósitos sedimentares, intempéricos, metamórficos, hidrotermais etc., conforme a dominância de um desses processos na geração do depósito.

No entanto, não é no decorrer de todo processo geológico que depósitos minerais são formados. Ou seja, nem todo granito é portador de pegmatito estanífero, assim como nem todo folhelho contém depósitos sedimentares de cobre. Para ocorrer uma mineralização, deve estar presente uma fonte que forneça a substância útil e um local/ambiente para sua deposição de forma concentrada. A substância útil geralmente sofre um menor ou maior transporte, envolvendo energia (força-motriz), em um meio que permite sua migração (Fig. 21.3). Esses fatores deverão atuar de forma eficiente, convergindo cumulativamente para a elevação do conteúdo de um dado elemento químico, em determinado lugar da crosta terrestre, gerando um depósito mineral.

A fonte pode ser simplesmente uma rocha pré-existente particular, um sistema geológico mais complexo, como um magma, porções mais profundas da crosta terrestre, como o manto superior, ou águas retidas dentro de uma seqüência sedimentar ou vulcano-sedimentar. O transporte, usualmente promovido pela água (superficial ou



Fig. 21.3 Elementos essenciais de um modelo de geração de um depósito mineral, segundo Routhier, 1980. Usualmente mais de uma fonte pode contribuir com substâncias úteis para o depósito. M = substância útil (elementos químicos, minerais, fragmentos de rocha, etc.).

profunda), pode ser acionado por energia térmica (um corpo intrusivo, por exemplo) ou pela força gravitacional (carreamento de detritos por um fluxo d'água). A substância útil ou seus constituintes podem ser transportados, conforme o caso, mecanicamente ou como soluto numa solução natural. O ambiente de deposição, por outro lado, varia muito quanto à sua escala e natureza, podendo ser representado pelo manto de intemperismo, sistemas de fraturas, plataforma continental, etc.

A fixação da substância mineral útil comumente se faz em uma porção mais restrita do ambiente de deposição em consequência da ação de fatores que, agindo como armadilhas, favorecem, naquele local, sua maior acumulação em relação ao resto do ambiente de deposição. Tais fatores são designados de controles da mineralização ou metalotectos e são de naturezas diversas, tais como geoquímica, mineralógica, estrutural, paleogeográfica, etc. Assim, certos jazimentos do ambiente sedimentar ocupam volumes rochosos limitados dentro da seqüência sedimentar hospedeira. É o caso de alguns jazimentos de Pb, Zn ou Cu na forma de sulfetos, que ocorrem como estratos rochosos relativamente delgados, dentro de uma seqüência sedimentar mais ampla e espessa que constitui o ambiente de deposição. Também é o caso das concentrações aluvionares auríferas que preferencialmente se associam aos níveis conglomeráticos de um sistema sedimentar aluvionar.

Há muitas razões para se considerar um depósito mineral como um objeto rochoso especial quanto à sua natureza mineralógica e/ou geoquímica. Uma

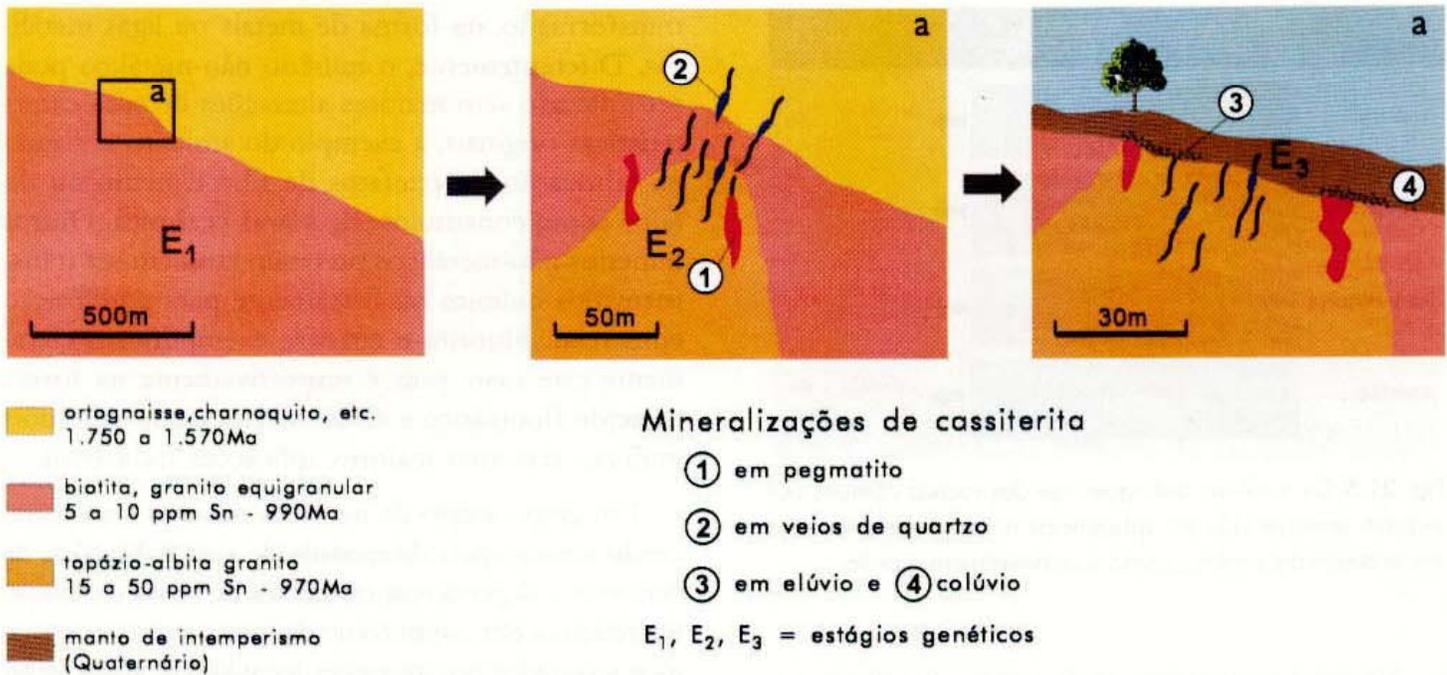


Fig. 21.4 Visão esquemática sobre a sucessão no tempo e no espaço de eventos geológicos, magmáticos e de intemperismo, convergindo para a geração de depósitos de cassiterita hospedados em elúvios ou colúvios. O esquema ilustra exemplos de mineralizações que ocorrem na Província Estanífera de Rondônia.

delas decorre da observação da composição química média da crosta continental (Cap. 5), na qual oito elementos, com abundância crustal acima de 1% (O, Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K), correspondem a aproximadamente 98% em peso da sua composição total. Um depósito mineral para os demais elementos menos abundantes, que perfazem cerca de 2% da composição da crosta continental, incluindo a maioria dos que são úteis ao ser humano, certamente é uma anomalia geoquímica.

Apesar de suas feições peculiares, os depósitos minerais resultam de processos naturais que se expressam paralela e/ou sucessivamente; são processos, em sua grande maioria, geológicos, mas também incluem processos climáticos (tal como nos depósitos gerados por intemperismo) e/ou biológicos (freqüentes nos depósitos sedimentares). Por exemplo, a gênese de depósitos estaníferos alojados no manto de intemperismo (Fig. 21.4) ou, mesmo, em sedimentos detríticos (Caps. 8 e 14) pode remontar à formação de magmas pré-enriquecidos em Sn (estágio 1), os quais tardiamente, em sua consolidação, geraram mineralizações de cassiterita hospedadas em rochas graníticas (estágio 2), que por sua vez foram alteradas e mobilizadas por intemperismo e erosão (estágio 3).

Nesse sentido, a gênese de um depósito mineral guarda um paralelismo com a maioria dos processos de preparação de minérios e de obtenção de metais, a qual não se realiza num único estágio, mas segundo uma seqüência progressiva de estágios, cada um deles contribuindo para o produto final, como por exemplo a obtenção do metal estanho a partir de um minério estanífero. Assim, a fonte inicial de um depósito mineral pode estar bastante afastada no tempo e no espaço e o depósito mineral é uma conseqüência da evolução geológica da área na qual ele ocorre.

21.1.3 Minerais e minérios

Associado ao conceito de depósito mineral, vimos que se utiliza o termo minério para designar a rocha da qual podem ser economicamente obtidas uma ou mais substâncias úteis. Como uma rocha, um minério tem uma composição mineral especial, pois nele estão presentes de forma concentrada minerais que usualmente ocorrem dispersos na maioria das outras rochas (Cap. 2). Assim, hematita (Fe_2O_3) pode ser mineral acessório em muitos tipos de rochas, como nos granitóides e gnaisses, mas num minério de ferro este mineral está altamente concentrado, podendo ser praticamente a única fase mineral presente (Fig. 21.5).

	MINERAIS DE GANGA	+	MINERAIS DE MINÉRIO	
Granito	feldspato quartzo mica	+	cassiterita (SnO_2)	minério de estanho
Pegmatito	feldspato quartzo mica	+	espodumênio ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$)	minério de lítio
Serpentinito	serpentina clorita talco	+	amianto ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)	minério de amianto
Aluvião	areia cascalho argila	+	ouro (Au)	minério de ouro

Fig. 21.5 Os minérios distinguem-se das rochas comuns por estarem enriquecidos em substâncias minerais úteis, ou seja em minerais de minério, como a cassiterita em granito.

No minério associam-se dois tipos de minerais: o **mineral de minério**, que é o mineral que lhe confere valor econômico, e o **mineral de ganga** ou, simplesmente, **ganga**, que não apresenta valor econômico. Assim, num minério de estanho em granito, a cassiterita (SnO_2) é o mineral de minério, enquanto os demais minerais presentes, como feldspatos, quartzo e mica, constituem a ganga (Fig. 21.5). Os conceitos de mineral de minério e de ganga não são absolutos, uma vez que um mesmo mineral pode passar de uma a outra categoria conforme o depósito mineral considerado ou até pertencer a ambas categorias em um mesmo minério. Assim, tanto o feldspato quanto o quartzo e a mica podem constituir minerais de minério importantes em muitos pegmatitos.

Distinguem-se os minérios em duas classes bastante amplas designadas **minérios metálicos** e **minérios não-metálicos**, conforme possam ser ou não fontes de substâncias metálicas ou, também, tenham ou não em sua composição minerais úteis de brilho metálico. Embora essas qualificações sejam freqüentemente utilizadas, elas refletem um certo artificialismo e, amiúde, esbarram em dificuldades para uma aplicação rigorosa. Podemos dizer que são expressões que surgiram espontaneamente na prática profissional para caracterizar de forma rápida, porém, superficialmente, as matérias-primas minerais. Minérios, por exemplo, constituídos por calamina, scheelita e malaquita não seriam considerados metálicos, uma vez que estes minerais de minério não possuem brilho metálico, embora sejam, respectivamente, minerais de zinco, wolfrâmio e cobre.

Para sua utilização, o minério metálico normalmente necessita ser trabalhado, profundamente

transformado, na forma de metais ou ligas metálicas. Diferentemente, o minério não-metálico pode ser utilizado sem maiores alterações de suas características originais, a exemplo do amianto utilizado na fabricação de artefatos de fibrocimento ou do talco como constituinte de massa cerâmica. Outros minérios não-metálicos precisam também ser transformados química ou fisicamente para a utilização comercial. Fluorita e enxofre exemplificam claramente este caso, pois é respectivamente na forma de ácido fluorídrico e ácido sulfúrico que estes dois minerais têm suas maiores aplicações industriais.

Um grupo amplo de materiais minerais vem merecendo atenção pela diversidade de suas aplicações, da demanda e dependência crescentes de nossa civilização em relação a eles, assim como das perspectivas de novos usos solicitados por inovações tecnológicas atuais (cerâmica fina, fibras ópticas, supercondutores). Trata-se dos **minerais industriais** e **rochas industriais**, definidos simplificada e simplesmente como materiais minerais que, dadas suas qualidades físicas e químicas particulares, são consumidos praticamente sem alteração de suas propriedades originais, por terem aplicação direta pela indústria.

Os minerais e rochas industriais participam ativamente de nossa civilização, estando presentes em diversos segmentos industriais modernos: fabricação de fertilizantes fosfatados (fosforita, apatita) e potássicos (silvita, carnalita), indústria da construção civil (brita, calcário, quartzito, areia, cascalho), materiais cerâmicos e refratários (argilas, magnesita), papel (caulim), isolantes (amianto, mica), rochas ornamentais (granito, mármore), perfuração de poços para petróleo e gás natural (argila, barita), cimento (calcário, argila, gipsita), além da indústria de vidros, tintas, borrachas, abrasivos, eletro-eletrônicos, etc.

Em sua grande maioria, os minerais industriais são representados por minerais ou minérios não-metálicos, tais como o amianto e o talco nas aplicações citadas. Entre outros minérios metálicos, a cromita pode também ser considerada como mineral industrial quando é utilizada na fabricação de peças cerâmicas refratárias.

Nos países industrializados, a produção e o consumo dos minerais e rochas industriais superam, na maioria das vezes, os dos metais. A taxa de seu consumo constitui inclusive um dos indicadores do nível de desenvolvimento industrial de um país. No Brasil, a demanda e o consumo de minerais e rochas industriais é grande, principalmente no setor da construção civil, com forte tendência de aumento. As causas estão

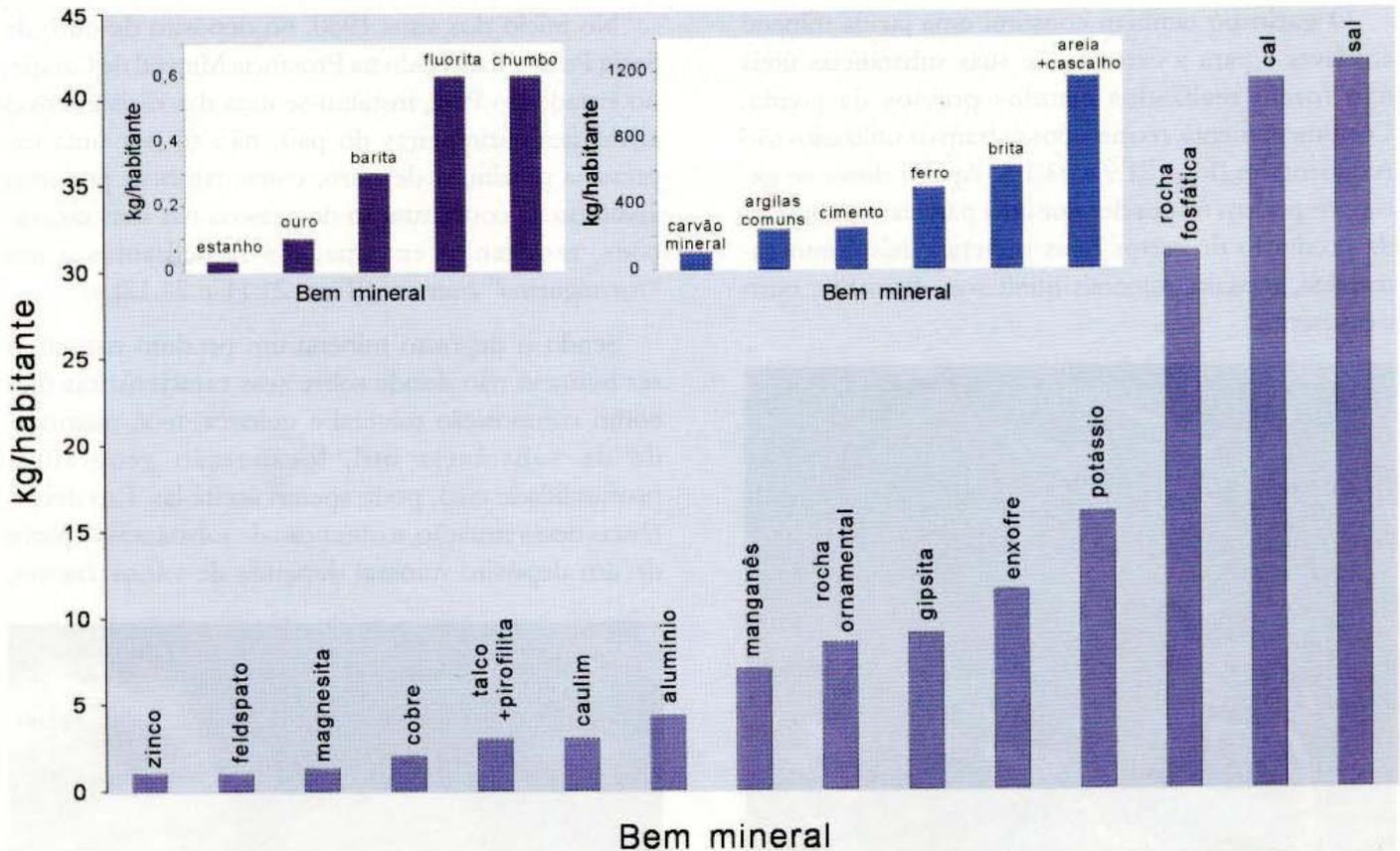


Fig. 21.6 Estimativa do consumo anual médio por habitante de alguns bens minerais metálicos e não-metálicos no Brasil. Dados do Sumário Mineral, Departamento Nacional da Produção Mineral, 1998.

relacionadas à industrialização, à melhoria da infra-estrutura social (saneamento básico, habitação, transporte), ao aumento da produtividade agrícola, mas, acima de tudo, ao aumento da renda *per capita* associado ao crescimento industrial e aumento populacional. A Fig. 21.6 ilustra uma comparação do consumo de alguns minérios não-metálicos/industriais e metálicos por habitante no Brasil.

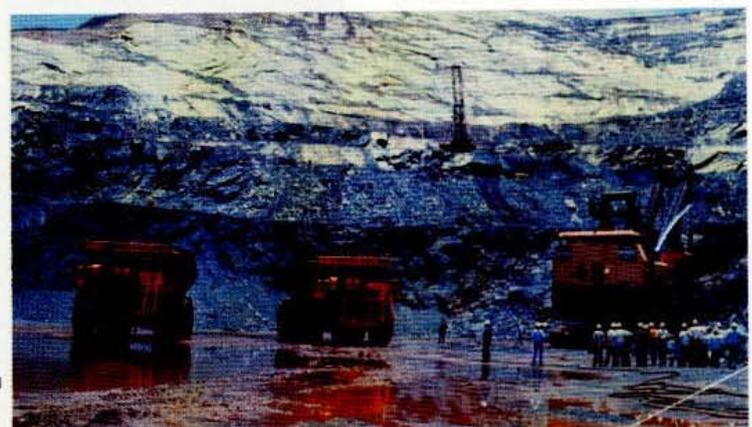
21.1.4 Extrair e utilizando minérios

O conjunto de operações que são realizadas visando à retirada do minério a partir do depósito mineral denomina-se **lavra**. O depósito mineral em lavra é denominado **mina**, e esta designação continua sendo aplicada mesmo que a extração tenha sido suspensa. A lavra pode ser executada de modo bastante simples, por meio de atividades manuais, ou até por meios altamente mecanizados e em larga escala, como ocorre nas grandes minerações (Figs. 21.7 e 21.8).

Fig. 21.8 Lavra a céu aberto de minério de ferro na mina Cauê (Itabira, MG). Foto: E. Ribeiro Filho.



Fig. 21.7 Lavra por desmonte hidráulico de depósito de cassiterita em aluviões (Oriente Novo, RO) Foto: J. S. Bettencourt.



O **garimpo** também constitui uma jazida mineral em lavra e para a extração de suas substâncias úteis não foram realizados estudos prévios da jazida. Costumeiramente, os métodos extrativos utilizados são rudimentares (Figs. 21.9 e 21.10). Apesar disso, os garimpos podem responder por uma parcela significativa da produção de certos bens minerais, tais como esmeralda, topázio, minerais litiníferos, diamante, ouro e cassiterita.

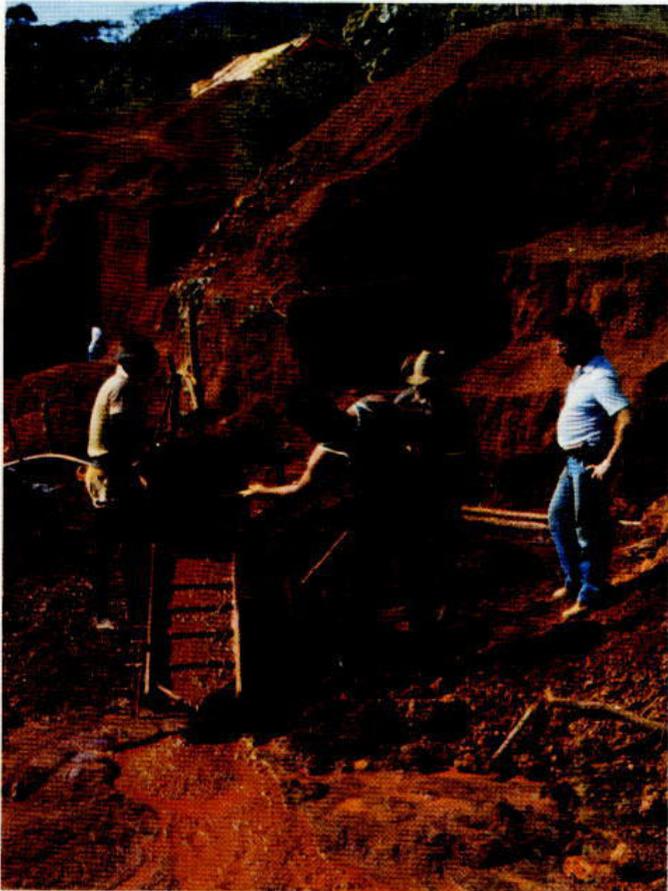


Fig. 21.9 O minério extraído do depósito é lavado com água no *sluice* (um tipo de calha usada pelos garimpeiros, também conhecida como “cobra fumando”), obtendo-se um concentrado da substância útil (ouro, cassiterita, diamante) que fica retida nas ripas transversais ao comprimento da calha. Foto: J. S. Bettencourt.

No início dos anos 1980, no depósito de ouro de Serra Pelada, localizado na Província Mineral de Carajás, no Estado do Pará, instalou-se uma das mais intensas atividades garimpeiras do país, não só por uma expressiva produção de ouro, como também por uma assombrosa concentração de pessoas nas suas escavações, resultando em imagens semelhantes a um “formigueiro” humano (Figs. 21.11 e 21.12).

Sendo o depósito mineral um produto natural, o ser humano não decide sobre suas características (tais como composição mineral e química, teor, quantidade da substância útil, localização geográfica, profundidade etc.), pode apenas aceitá-las. Em decorrência dessa situação, a obtenção de substâncias a partir de um depósito mineral depende de vários fatores,

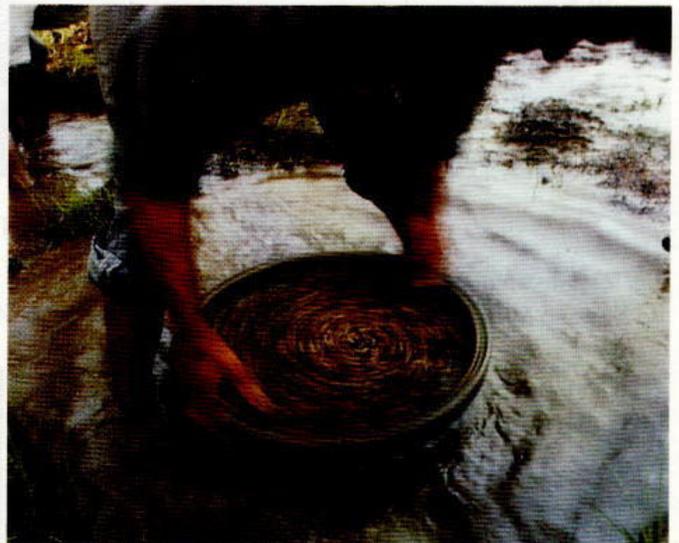


Fig. 21.10 Ilustração do processo mecânico para concentração de minerais pesados por meio de uma batéia. Foto: R. Falzoni.

Fig. 21.11 Visão geral da garimpagem de ouro em Serra Pelada (PA), no decorrer de 1982. Foto: E. Ribeiro Filho.

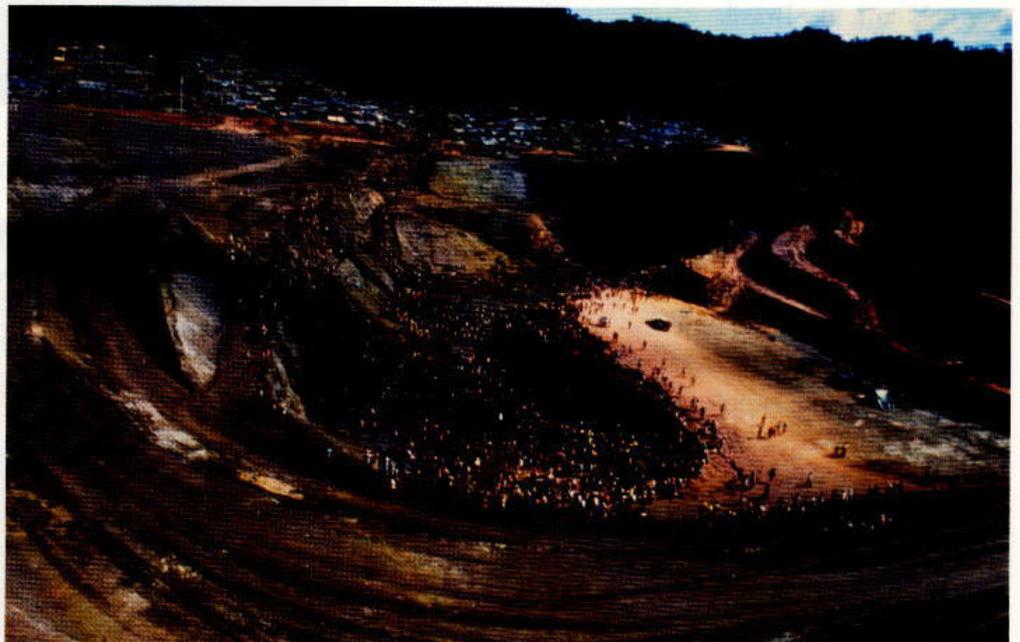




Fig. 21.12 Escavações por meio de trabalho manual rudimentar, utilizando-se ferramentas simples no garimpo de ouro de Serra Pelada (PA), no decorrer de 1982. Foto: E. Ribeiro Filho.

que incluem desde suas feições intrínsecas até os preços e modos de aplicação de suas substâncias úteis. A análise desses fatores é que indicará se a substância mineralizada pode ser lavrada e gerar produtos comerciais economicamente rentáveis. Assim, a quantidade da substância útil deve ser expressiva o bastante para garantir a lavra e suprimento adequado a longo prazo, assim como o teor da substância útil deve proporcionar uma extração lucrativa.

Além disso, a composição química, as feições mineralógicas e as características físicas do minério devem ser favoráveis às aplicações antevistas para a sociedade. Assim, os minérios de ferro devem ter baixos conteúdos em fósforo e a bauxita deve ser pobre em sílica; pirita, apesar de ser o mais comum dos sulfetos, não é mineral de minério de ferro, que é obtido em larga escala a partir de seus óxidos como hematita e magnetita, bem como quartzitos friáveis por intemperismo podem constituir excelentes fontes de areias quartzosas, em oposição ao quartzito compacto, não intemperizado.

Para muitos bens minerais, notadamente aqueles de baixo valor unitário (usualmente não-metálicos), a localização geográfica do recurso constitui um parâmetro crítico à vista de sua lavra. Uma das características inerentes do depósito mineral, tal como vimos, é que “ele está onde ele ocorre”, ou seja, não podemos alterar sua localização com o intuito de melhor lavrá-lo, da mesma maneira que um fazendeiro muda o local de pastagem de seu gado ou de cultivo de suas plantações a fim de obter uma melhor produtividade.

A irregularidade na distribuição geográfica dos recursos minerais, seja em regiões inóspitas, climaticamente agressivas ou deficientes em água e energia elétrica, constitui um fator limitante para a extração de muitos minérios ou, mesmo antes, para sua descoberta. Da mesma forma, a instalação das atividades de lavra ou o custo de transporte (frete) da substância útil, entre outras implicações, pode ser crítica para viabilizar a lavra de um recurso mineral distante dos centros industriais e/ou de consumo.

Ao mesmo tempo, fatores técnicos e econômicos devem ser considerados quanto ao aproveitamento de um recurso mineral. Eles podem viabilizar a utilização de substâncias minerais até então marginalizadas devido a características inadequadas de teor, composição mineral ou química, assim como condicionar a extração do minério em função de preço, mercado, demanda e oferta.

Designa-se minério bruto o minério tal como ocorre na natureza, porém, desmontado, deslocado, por uma operação qualquer de lavra. Na maioria dos casos, o minério bruto não se encontra suficientemente puro ou adequado para que seja submetido a processos metalúrgicos ou para sua utilização industrial. Assim, após a lavra, os minérios são submetidos a um conjunto de processos industriais, denominado tratamento/beneficiamento, que os torna aptos para a utilização.

O tratamento divide o minério bruto em duas frações: concentrado e rejeito. O concentrado é o produto em que a substância útil está com teor mais elevado ou as qualidades tecnológicas do minério estão aprimoradas. O rejeito é a fração constituída quase que exclusivamente pelos minerais de ganga e usualmente é descartado. Assim, por meio de métodos adequados de tratamento, um minério de berílio a 10% de berilo poderá produzir um concentrado composto predominantemente (80 a 90%) pelo mineral berilo; do

mesmo modo, um minério de ferro de alto teor, naturalmente friável, poderá ser tratado por simples lavagem, seguida por classificação granulométrica, produzindo, como concentrados, seus diferentes tipos comerciais.

Certos minérios de ouro, metais básicos, urânio, platina, fosfato, grafita e tantalita, em virtude de particular composição mineral ou baixos teores, exigem métodos de tratamento mais sofisticados, às vezes de alto custo, tais como químicos e elétricos, para preparar a substância útil com vista a sua utilização industrial.

Os usos e aplicações das substâncias minerais permitem avaliar sua importância para a humanidade e, ao mesmo tempo, constituem um critério para classificá-las. A classificação utilitária é uma proposta clássica de sistematização das substâncias minerais úteis, fundamentada nas suas aplicações (Tabela 21.3).

Os metais ferrosos distinguem-se dos metais não-ferrosos por sua utilização essencial na indústria do aço e na fabricação das demais ferroligas. As classes

dos não-metálicos são definidas notadamente em função do uso da substância mineral. Alguns minerais são colocados em mais de uma classe em virtude de terem duas ou mais utilizações distintas, como cromita metalúrgica e cromita refratária ou diamante industrial (para fabricação de ferramentas de corte) e diamante como pedra preciosa. As qualificações para as diferentes aplicações de uma substância mineral podem ser impostas pelas características naturais do minério ou elaboradas por métodos próprios de tratamento.

21.2 Os Principais Tipos Genéticos de Depósitos Minerais - feições essenciais

Tipo genético de depósito mineral corresponde a grupos de depósitos que tiveram um modo de formação semelhante. Como os depósitos minerais resultam da ação de processos geológicos comuns, tal como comentado anteriormente, o processo geológico dominante na geração do depósito confere-lhe sua classificação genética.

Tabela 21.3 Classificação utilitária simplificada das substâncias minerais: alguns exemplos

Metálicos		
Ferrosos	ferroligas	ferro, manganês, cromo, molibdênio, níquel, cobalto, wolfrâmio, vanádio
Não-ferrosos	básicos	cobre, chumbo, zinco, estanho
	leves	alumínio, magnésio, titânio, berílio
	preciosos	ouro, prata, platina
	raros	berílio, céσιο, lítio, etc.
Não-metálicos		
	materiais de construção	areia, cascalho, rochas industriais, brita
	materiais para indústria química	enxofre, fluorita, sais, pirita, cromita
	fertilizantes	fosfatos, potássio, nitrato
	cimento	calcário, argila, gipsita
	cerâmica	argilas, feldspato, sílica
	refratários	cromita, magnesita, argilas, sílica
	abrasivos	córrindon, diamante, granada, quartzito
	isolantes	amianto, mica
	fundentes	carbonatos, fluorita
	pigmentos	barita, ocre, titânio
	gemas	diamante, rubi, turmalina

Supérgeno

Inclui um grupo de depósitos cuja geração se relaciona às alterações físicas e químicas sofridas pelas rochas submetidas ao intemperismo. A geração desses depósitos depende em primeira instância da existência prévia de uma rocha adequada, designada de rocha inalterada, parental ou rocha-mãe, sobre a qual agirá a alteração supérgena. De acordo com seu comportamento geoquímico supérgeno (Cap. 8), alguns constituintes da rocha-mãe são imobilizados no manto de intemperismo enquanto outros são eliminados. Concentra-se ao final do processo um resíduo químico constituído essencialmente por substâncias pouco solúveis nas condições de intemperismo, donde serem também designados depósitos residuais (Fig. 21.13). Quimicamente, as substâncias mineralizadas se apresentam principalmente na forma de oxiânions, tais como silicatos, fosfatos e carbonatos e, também, como óxidos e hidróxidos.

Clima, vegetação, relevo e drenagem igualmente influem na formação do depósito supérgeno, governando a alteração química dos minerais da rocha-mãe, retendo a fase química insolúvel ou promovendo a eliminação da fase solúvel. Sendo gerados no manto de intemperismo, portanto próximos da superfície, podem ser facilmente erodidos. Por isso a maior parte dos depósitos conhecidos e lavrados desta classe é relativamente jovem (pós-Mesozóico) e com maior frequência ocorrem na região intertropical, onde os

processos intempéricos são mais intensos. Como tal, são comuns e importantes economicamente no Brasil, onde os climas equatorial e tropical favorecem sua formação.

O alumínio em depósitos de bauxita (Cap. 8), é um dos bens minerais obtidos a partir de depósitos deste tipo genético. Além deste, também são conhecidos depósitos supérgenos significativos de manganês, níquel, fosfatos, urânio, caulim, areia quartzosa, etc. Volumosos depósitos de cobre viabilizaram-se economicamente graças ao enriquecimento supérgeno atuante sobre suas mineralizações disseminadas a baixo teor, tal como nos depósitos de cobre porfírico, com muitos exemplos na cadeia andina.

Sedimentar

Dois grandes grupos de depósitos minerais sedimentares são diferenciados: os detríticos, também conhecidos como plácer, e os químicos. Esses depósitos decorrem, tal como uma rocha sedimentar (Cap. 14), do transporte de substâncias úteis pelos agentes geológicos superficiais e da subsequente deposição mecânica (depósitos sedimentares detríticos) ou da precipitação química (depósitos sedimentares químicos) das substâncias transportadas em lagos, deltas, linhas de praia, planícies aluvionares, plataforma continental, etc. (Fig. 21.13). Daí podermos também qualificar os depósitos minerais sedimentares de acordo com o ambiente de deposição, por exemplo, lagunares, deltaicos, marinhos, aluvionares, etc.

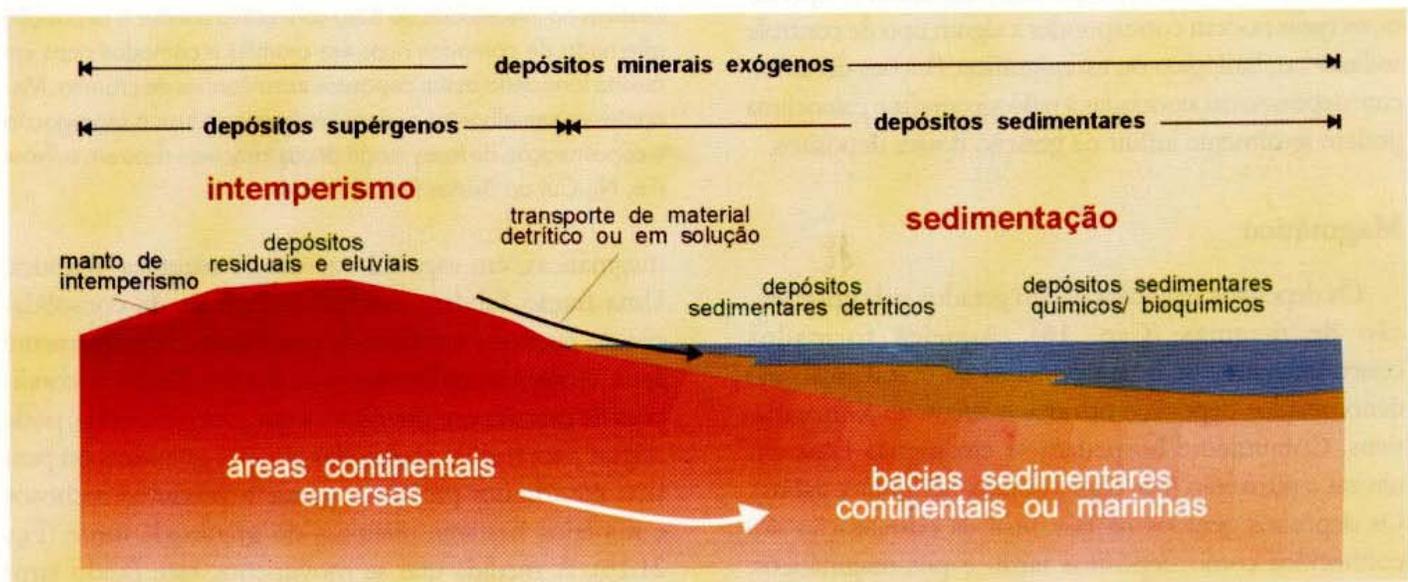


Fig. 21.13 Alguns tipos de depósitos minerais exógenos (formados junto à superfície terrestre), dependentes do intemperismo e da sedimentação. Os depósitos supérgenos freqüentemente se limitam ao manto do intemperismo sobre a rocha-mãe. Os depósitos sedimentares envolvem também um transporte da substância útil, seguido de deposição mecânica da fração sólida (depósitos detríticos) ou precipitação química da fração solúvel (depósitos químicos/bioquímicos).

Representam um grupo economicamente importante e diversificado de substâncias que incluem ferro, manganês, metais básicos, rochas carbonáticas, evaporitos, ouro, fosfato, gipsita, cassiterita, etc. Podem também ser incluídos os chamados combustíveis fósseis (petróleo, carvão, gás natural), gerados em ambientes sedimentares.

Os mecanismos envolvidos na acumulação das substâncias úteis na seqüência sedimentar são bastante distintos. Nos pláceres, onde se concentram minerais usualmente de dureza e densidade elevadas, variações na capacidade de transporte do meio aquoso podem condicionar a deposição do material que está sendo transportado em suspensão ou por arrasto. Nos pláceres aluvionares, por exemplo, a deposição pode ser conseqüência da diminuição da velocidade da água do rio. Assim, partículas finas de minerais bastante densos, como cassiterita, podem estar disseminadas na fração sedimentar de granulação maior e menos densa, como em areias grossas ou em cascalhos. Mecanismos de natureza química mais complexa, freqüentemente interagindo com a atividade biológica, governam a deposição de substâncias previamente dissolvidas na fase aquosa de um ambiente sedimentar. Condições redutoras ou oxidantes e ácidas ou básicas reinantes num sítio deposicional podem, conforme o caso, acarretar a insolubilidade de espécies químicas dissolvidas e condicionar a deposição de metais na forma de sulfetos, carbonatos, hidróxidos, sulfatos, cloretos, etc.

Os depósitos sedimentares, tanto detríticos como químicos, costumeiramente se alojam em horizontes rochosos particulares da seqüência sedimentar hospedeira, os quais podem corresponder a algum tipo de controle sedimentar, litológico ou estratigráfico. Feições do ambiente deposicional associadas à paleogeografia e paleoclima podem igualmente influir na geração desses depósitos.

Magmático

Os depósitos magmáticos são gerados pela cristalização de magmas (Cap. 16). Aqueles formados concomitantemente à fase principal da cristalização são denominados depósitos ortomagmáticos ou sinmagmáticos. Comumente hospedam-se em rochas ricas em olivina e piroxênio (tais como dunito, peridotito, gabro). Os depósitos gerados na fase final da cristalização são conhecidos como depósitos tardi- e pós-magmáticos. Ocorrem freqüentemente em rochas enriquecidas em quartzo e feldspatos (tais como granito e granodiorito).

Durante a cristalização do magma, devido à queda da temperatura, alguns dos seus constituintes tornam-se

pouco solúveis na fusão e segregam-se como minerais (por exemplo, cromita) ou mesmo como fases ainda fundidas imiscíveis (por exemplo, sulfetos de ferro e níquel). Essas fases, no decorrer da consolidação, podem se concentrar gerando porções de rocha magmática enriquecidas que podem ser substâncias úteis (Fig. 21.14). Esse processo de geração de depósitos minerais é chamado de segregação magmática. Dessa forma, um minério ortomagmático é a própria rocha ígnea, assemelhando-se a ela em sua textura e estrutura, porém com uma composição mineral especial que lhe confere um valor econômico. São importantes os depósitos associados a rochas básicas e ultrabásicas (cromita, metais do grupo da platina, níquel, cobalto), rochas alcalinas (elementos de terras raras, zircônio, urânio), carbonatito (fosfato, nióbio, elementos de terras raras, barita), e rochas granitóides (estanho, wolfrâmio).

As mineralizações tardi- a pós-magmáticas ocorrem durante as fases terminais de cristalização de rochas

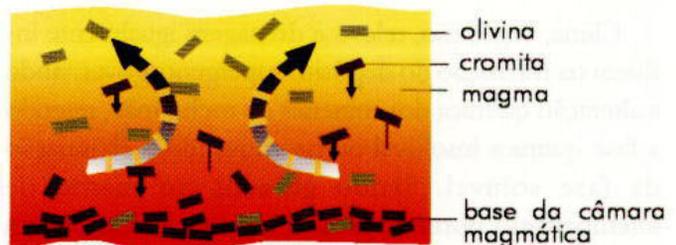


Fig. 21.14 Separação e deposição de cromita dentro de uma câmara magmática. A baixa viscosidade do magma básico ou ultrabásico, submetido a temperaturas elevadas ($\sim 1.200^{\circ}\text{C}$), permite a atuação de um movimento convectivo. Variações sucessivas na intensidade do fluxo convectivo conduzem à deposição alternada de camadas ricas em cromita e camadas ricas em olivina formando assim depósitos estratiformes de cromita. Mecanismos semelhantes podem também conduzir à segregação e concentração de fases magmáticas imiscíveis ricas em sulfetos (Fe, Ni, Cu) ou óxidos (Fe, Ti).

magmáticas, em especial aquelas de natureza granítica. Uma fração fundida residual decorrente da consolidação do magma é enriquecida em voláteis, principalmente água, o que lhe confere bastante fluidez. Dadas as condições de pressão e temperatura a que está submetida, pode migrar para regiões apicais das cúpulas graníticas ou para suas encaixantes próximas, gerando produtos rochosos e minérios bastante distintos do granitóide-fonte (Fig. 21.15). À medida que se movimenta, este fluido também promove transformações químico-mineralógicas nas rochas percoladas. A deposição dos metais comumente mostra um zoneamento, ou seja, das regiões albitizadas



- rochas encaixantes
 - rocha granítica
 - albitos
 - pegmatitos
 - depósitos em veios
 - greisens
 - escarnitos
- fluxo do fluido aquoso

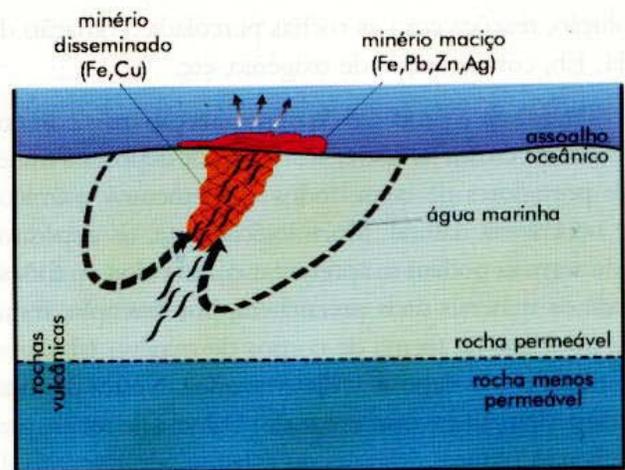
Fig. 21.15 Diagrama esquemático resumindo os principais tipos de depósitos minerais tardi e pós-magmáticos.

até os veios hidrotermais, podem concentrar-se sucessivamente Sn, Mo, Be, W, Bi, Zn, Pb, Ag.

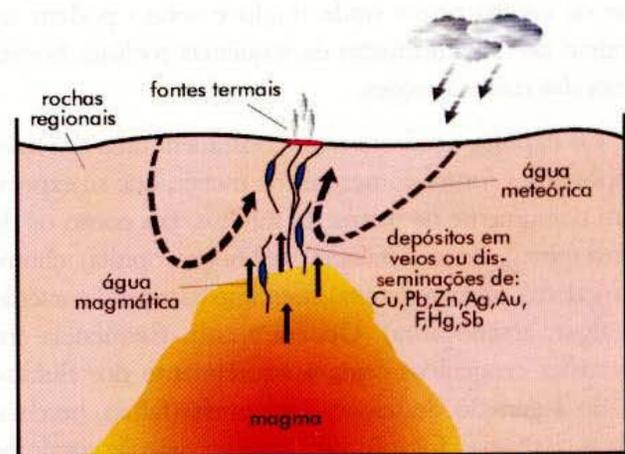
A partir dessa fase magmática residual e fluida, como também de sua interação com a rocha já cristalizada ou com suas encaixantes, poderão surgir mineralizações geoquimicamente especializadas, tais como pegmatitos, albitos, escarnitos, greisens e depósitos hidrotermais de filiação magmática. A diversificação e variedade mineralógicas nesses depósitos são notáveis e incluem bens minerais, entre outros, de metais raros, fluorita, mica, feldspato, quartzo, sulfetos e sulfossais de vários metais e, praticamente, todas as pedras preciosas.

Hidrotermal

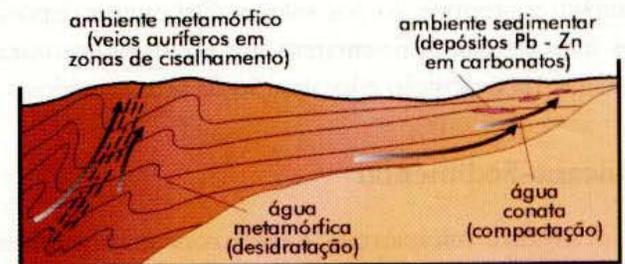
Depósitos hidrotermais são produzidos pelas soluções hidrotermais. Estas, de um modo simples, podem ser entendidas como soluções aquosas aquecidas (usualmente acima de 50°C), caracterizadas por composição química complexa dada por diversas substâncias dissolvidas. Essas soluções ou fluidos podem ser gerados em diversos sistemas geológicos, donde a fase aquosa e seus solutos terem fontes diversas, tais como magmática, metamórfica, meteórica de circulação crustal profunda, sedimentar, entre outras (Fig. 21.16). Nestes diferentes ambientes geológicos, a água pode ser progressivamente aquecida e reagir quimicamente com os minerais e rochas percolados, transformando-se então numa solução/fluido mineralizador. A deposição das substâncias transportadas e a geração do minério decorrerão, conforme o caso, da intervenção combinada de fatores, tais como resfriamento e queda de pressão da



a



b



c

Fig. 21.16 Esquemas ilustrativos de situações geológicas onde podem ocorrer depósitos minerais hidrotermais, por percolação de fluidos na crosta oceânica (a) ou continental (b, c). De início, a água tem uma circulação descendente, difusa, envolvendo grandes volumes de rocha. Ocorre a lixiviação de metais transportados como solutos. A circulação ascendente ocorre usualmente de forma canalizada ao longo de fraturas, falhas, planos de acamamento ou de foliação, onde também pode ocorrer a precipitação das substâncias transportadas. A situação (a) pode estar associada ao vulcanismo intermediário e félsico em zonas de subducção; a situação (b) pode ser encontrada em zonas de rifts continentais, e os exemplos da situação (c) em seqüências sedimentares de margens continentais passivas e em cinturões metamórficos ao longo de zonas de colisão de placas.

solução, reações com as rochas percoladas, variação de pH, Eh, concentração de oxigênio, etc.

Talvez seja o processo de mineralização mais comum atuante na crosta terrestre, ilustrado por depósitos minerais portadores de quase todos os elementos químicos de ocorrência natural. Morfologicamente, os depósitos hidrotermais podem se apresentar como **veios** ou **filões**, onde os minerais úteis preenchem, por exemplo, fraturas ou falhas na forma de corpos de minério tabulares, ou ainda como depósitos disseminados. Nestes últimos, a mineralização envolve um maior volume de rocha, preenchendo fraturas delgadas ou substituindo minerais da rocha hospedeira, como carbonatos. Um dos exemplos comuns são os depósitos de ouro hospedados em zonas de cisalhamento, onde fluido e soluto podem ter origem no metamorfismo da seqüência rochosa hospedeira das mineralizações.

Os depósitos hidrotermais constituem uma das mais importantes fontes comerciais de metais, que se expressam comumente na forma de sulfetos, tais como os de ferro (pirita), zinco (esfalerita), cobre (calcopirita), chumbo (galena), prata (argentita), mercúrio (cinábrio) e arsênio (realgar, arsenopirita). Ocorrem com freqüência em cinturões orogênicos onde o aquecimento dos fluidos, aliado à geração de feições estruturais (falhas, brechas, faixas cisalhadas, foliação, etc.), que servirão de condutos para a circulação das soluções, facilitam a interação fluido-rocha. Ao longo dessas estruturas poderá ocorrer também a precipitação dos solutos. Daí muitos depósitos hidrotermais apresentarem um controle estrutural evidente na deposição e localização de seus minérios.

Vulcano-Sedimentar

A atividade vulcânica que se instala concomitantemente ao processo sedimentar, por meio de seus fluidos e exalações que atingem o assoalho do sítio deposicional usualmente marinho, pode gerar os depósitos vulcano-sedimentares.

Esse processo de mineralização pode ser atualmente observado junto aos sistemas de *rifts* das dorsais meso-oceânicas. Equipamentos e veículos submersíveis, próprios para atuar em grandes profundidades, puderam registrar e filmar a atividade vulcânica exalativa nessas dorsais, bem como amostrar materiais já mineralizados de uma jazida em formação a partir da precipitação dessas soluções (Caps. 13 e 17), constituídas pela própria água do mar que, infiltrando-se profundamente na crosta oceânica, aquece-se e interage quimicamente com suas rochas,

mineralizando-se e retornando ao assoalho oceânico como uma salmoura hidrotermal. A percolação descendente e ascendente da água configura um sistema hidrotermal no qual a água percolante, inicialmente de natureza marinha, sofre modificações físicas e químicas, tornando-se em diferentes graus mais ácida, mais reduzida, enriquecida em solutos e, evidentemente, quente. A instabilização química dessas soluções, em níveis mais rasos do assoalho oceânico ou sobre o próprio assoalho oceânico, conduz à precipitação dos metais carreados em solução, junto à atividade vulcânica e ao processo sedimentar (Fig. 21.16a). A descarga do fluido sobre o assoalho oceânico pode levar à construção de estruturas em forma de chaminé (tais como os *black smokers* e *white smokers*), constituídas de substâncias químicas (sulfatos e sulfetos) precipitadas em contato com a água do mar (Cap. 17).

Essas mineralizações não são somente visualizadas nas atuais bordas de placas divergentes. Exemplos dessas mineralizações são conhecidos desde o Arqueano. Os principais depósitos são de metais básicos (tais como cobre, zinco, chumbo), níquel e ouro, correspondendo a importante parcela dos recursos mundiais desses bens minerais.

Metamórfico

Os depósitos metamórficos mais evidentes decorrem da recristalização de rochas ou minérios pré-existentes por ação da pressão e temperatura. Entre as transformações impostas, o aumento da granulação e cristalinidade das fases minerais iniciais comumente confere ao minério melhor qualidade para sua utilização, a exemplo dos mármore e grafita, também designados depósitos metamorfizados. O mármore é o equivalente metamórfico de rochas sedimentares calcárias e a grafita, de sedimentos carbonosos.

Os fluidos metamórficos, gerados em condições de temperatura e pressão elevadas (Cap. 18), podem conter substâncias passíveis de serem precipitadas em resposta a mudanças químicas, físicas, geomecânicas ou devidas a reações com as rochas percoladas. A deposição ocorre durante a percolação desses fluidos através de rochas mais permeáveis ou de estruturas tectônicas favoráveis como foliações, planos de falha ou zonas de cisalhamento, conduzindo à formação de depósitos hidrotermais de filiação metamórfica.

A maioria dos depósitos dessa classe origina-se da ação de eventos regionais usualmente progressivos.

Durante esses eventos, pelo menos parte das substâncias mineralizadas é transportada por fluidos devolatilizados concomitantes ao metamorfismo e interagentes com as rochas percoladas. Mineralizações de ouro, freqüentemente na forma de filões, são alguns dos exemplos desse processo genético constituindo os valiosos *lodes* auríferos (Fig. 21.16c).

Além do metamorfismo regional, o de contato pode formar depósitos específicos, ditos depósitos metassomáticos de contato ou escarnitos, que se associam à zona de contato entre intrusões magmáticas, usualmente de natureza granítica, e seqüências rochosas carbonatadas. Minerais neoformados tais como de wolfrâmio, ferro, ouro, cobre, wollastonita, granada, etc. podem se tornar enriquecidos dentro da auréola de contato com a rocha encaixante.

21.3 Tectônica Global e Depósitos Minerais

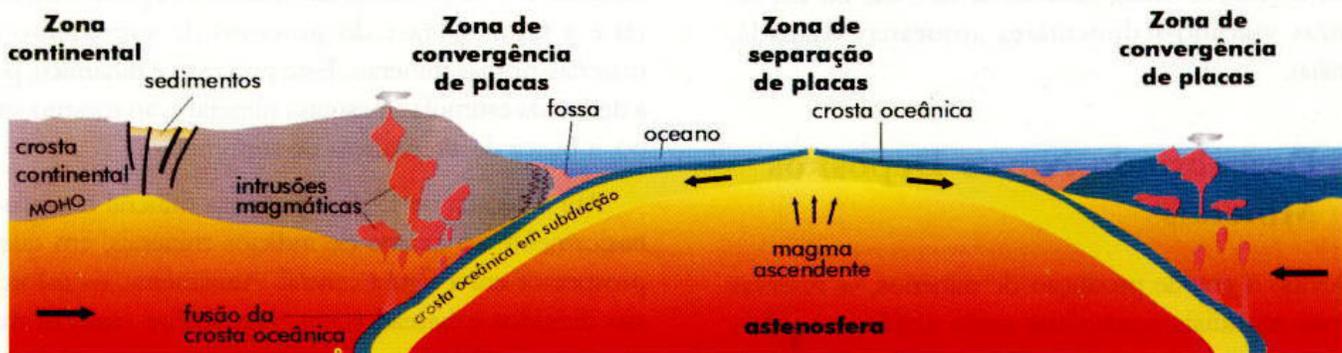
Como já sabemos, a superfície da Terra é constituída por um número finito de placas oceânicas e continentais que se movem a taxas da ordem de alguns centímetros por ano (Cap. 6). Os processos tectônicos, magmáticos, termais e sedimentares que se instalam ao longo dos limites de placas podem conduzir à geração de depósitos

minerais (Fig. 21.17). As margens de placas tectônicas de maior interesse metalogenético são as convergentes, divergentes e as margens passivas, conforme exemplificado na Tabela 21.4.

O impacto da tectônica global na geologia econômica possibilita entendermos melhor o ambiente tectônico, as associações litológicas e a metalogênese correlata no ambiente da evolução continental, o que, por sua vez, facilita a elaboração de modelos e programas exploratórios dirigidos à procura e descoberta de novos recursos minerais.

A maior parte dos exemplos de depósitos minerais fanerozóicos (Cap. 15) mostra uma clara relação espacial e genética com a tectônica global, a qual, por meio de seus mecanismos e processos, atuou de forma mais evidente até hoje conhecida e registrada. Ela é considerada a causa maior, evidentemente não exclusiva, da proliferação abundante e variada de depósitos minerais durante o Fanerozóico.

Vários tipos de depósitos proterozóicos, ou mesmo arqueanos, vêm sendo também interpretados à luz de mecanismos semelhantes à tectônica global, atuantes nessas épocas mais antigas. Entre eles, podem ser citados: formações ferríferas paleoproterozóicas (portadoras dos importantes depósitos de minério de ferro do Quadrilá-



rifts	arco magmático	bacia de ante-arco	assalho oceânico	dorsal meso-oceânica	bacia de ante-arco	arco de ilha
estanho nióbio urânio carbonatito kimberlito depósitos sedimentares e sedimentar-exalativos (Pb,Zn,Cu)	depósitos porfíricos de cobre, molibdênio; depósitos de metassomatismo de contato (Cu,Fe,W,Au); veios hidrotermais	chumbo, zinco, cobre	nódulos plurimetálicos (Fe,Mn,Ni,Co)	depósitos de sulfetos maciços (Cu,Zn,pirita) depósitos de segregação magmática (cromita podiforme)	pláceres auríferos	depósitos de sulfetos maciços (Cu,Zn,Pb,Ag,Au)

Fig. 21.17 Exemplos de depósitos minerais freqüentemente associados a ambientes da tectônica global.

Tabela 21.4 Tipos de margens tectônicas e mineralizações associadas

Ambientes Tectônicos	Depósitos Minerais
Margens Divergentes	
área oceânica	mineralizações de sulfetos nas cadeias meso-oceânicas atuais: exalações na dorsal do oceano Pacífico, lama metalífera do mar Vermelho mineralizações em ofiolitos: sulfetos vulcanogênicos de Cu - Zn (Canadá) e cromita (Turquia) nódulos polimetálicos (Fe, Mn, Ni, Cu) no assoalho oceânico
área continental	depósitos de Ni e Cu em lavas basálticas (Rússia) mineralizações em rochas magmáticas associadas a <i>riff</i> continental: granitos estaníferos (Brasil), carbonatitos com Nb, apatita e elementos de terras raras (Brasil)
Margens Convergentes	
com subducção	depósitos de sulfetos polimetálicos (Cu, Pb, Zn) vulcanogênicos (Japão) mineralizações de Cu porfíricas (Chile e outros países ao longo dos Andes) depósitos hidrotermais de Sn, W, Bi, Pb, Zn, Ag (Bolívia, Peru)
com colisão	mineralizações a metais raros (Sn, W): Província estanífera do sudeste asiático (Malásia, Indonésia, Tailândia) depósitos de Pb - Zn em rochas carbonáticas: EUA
Margens Passivas	
	petróleo, gás natural, evaporitos, fosfato: bacias marginais brasileiras (Sergipe-Alagoas, Recôncavo-Tucano, Campos)

tero Ferrífero em Minas Gerais), mineralizações de Sn mesoproterozóicas (Província Estanífera de Rondônia), minérios (Cr, Ni, Cu, platinóides) em complexos máficos/ultramáficos arqueanos ou paleoproterozóicos (África do Sul, Canadá), sulfetos de Zn, Cu, Ni em seqüências vulcano-sedimentares arqueanas (Canadá, Austrália).

21.4 Descobrimo Novos Depósitos Minerais

Devido à grande produção de minérios, as reservas minerais mundiais conhecidas estão sendo exauridas, podendo no futuro tornar-se escassos os depósitos com concentrações econômicas de elementos ou substâncias minerais úteis. Dessa forma, descobrir novos depósitos minerais significa acima de tudo assegurar o suprimento de metais e insumos minerais não-metálicos para benefício geral da humanidade e também proporcionar meios para estabelecer novas minas, vilas mineiras, cidades e atividades comerciais inerentes.

O que é a **pesquisa mineral**? Significa a execução de uma seqüência contínua de atividades, quando novos depósitos e recursos minerais são descobertos. Essas atividades vão desde a procura de indícios de mineralização, passando pelo estudo localizado dos mesmos, delinea-

mento do corpo de minério, até a determinação de seu aproveitamento econômico. Ela é, em si, um negócio de alto risco mas de retorno atraente. É um exercício de criatividade intelectual e científica, envolvendo geração de idéias e teste contínuo das mesmas. A pesquisa mineral é a primeira fase do processo de suprimento de matérias-primas minerais. Este processo é dinâmico, pois a demanda estimula a pesquisa mineral e, ao mesmo tempo, a busca de alternativas de suprimento.

Até a década de 1950, a pesquisa mineral resumia-se basicamente ao exame de indícios minerais, em que o prospector era a figura central. Atualmente, os esforços são dirigidos e baseados em uma análise regional mais ampla, na qual os programas de pesquisa mineral constituem operações sincronizadas ou negócios de organizações, e não ações individuais, envolvendo a análise de áreas e alvos favoráveis à existência de minérios.

No Brasil, nas últimas décadas, muito pouco se fez em relação à pesquisa mineral, embora, recentemente, novas áreas estejam sendo pesquisadas para ouro, diamante, platinóides, rochas e minerais industriais. Novas técnicas de pesquisa são aplicadas para avaliar o potencial mineral principalmente em áreas mais favoráveis à ocorrência de novos depósitos minerais.

21.4.1 Os objetivos e as atividades na pesquisa mineral

A descoberta, caracterização e avaliação de substâncias minerais úteis existentes no interior ou na superfície da Terra constituem os objetivos essenciais da pesquisa mineral. Ela procura descobrir corpos minerais que possam ser colocados em produção lucrativa no menor intervalo de tempo possível, ao menor custo e, freqüentemente, em situação econômica e tecnológica diferente da época em que a pesquisa foi executada (geralmente alguns anos depois). O modelo econômico utilizado na programação da pesquisa vale naquela época, naquela região e naquele caso, podendo exigir reformulação e adaptações à medida que o tempo passa.

Qualquer programa de pesquisa mineral segue uma seqüência lógica de atividades e é parte essencial de um empreendimento mineiro (Tabela 21.5). O sucesso caracteriza-se por um aumento crescente de favorabilidade da área a pesquisar. O caráter progressivo e a redução do tamanho da área são características intrínsecas de um programa bem sucedido.

Para direcionar a escolha de áreas de pesquisa e descoberta de novos depósitos minerais, o prospector usa métodos e técnicas que possibilitam uma análise previsional do sucesso ou não do empreendimento.

Hoje faz-se uso intensivo do chamado modelo de depósito mineral, que consiste em um arranjo sistemático de informações que descrevem os atributos essenciais de uma dada classe de depósito mineral. Ambiente geológico de formação, ambiente deposicional, idade do evento gerador e feições do depósito (tais como as referentes a mineralogia, controles da mineralização, assinaturas geoquímica e geofísica, tamanho e teor de elementos ou substâncias úteis) são alguns exemplos de atributos essenciais.

A utilização criteriosa do modelo de depósito mineral pode conduzir ao reconhecimento, em uma nova área de pesquisa, de atributos semelhantes ou idênticos àquelas já descritos em áreas onde são conhecidos ou lavrados depósitos minerais. Assim, as novas descobertas, mesmo de corpos não imediatamente reconhecíveis junto à superfície, decorrem da seleção de áreas onde a ocorrência mineral ou depósito mineral resultaram de levantamentos científicos e técnicos planejados.

21.5 Panorama dos Recursos Minerais do Brasil

Uma visão geral sobre a situação reinante em bens minerais de um país pode ser avaliada observando-se as suas reservas minerais disponíveis e a produção realizada, assim como o comércio exterior que mantém com importadores e exportadores de bens minerais.

Tabela 21.5 Etapas de uma seqüência de atividades de um empreendimento mineral

Etapas	Objetivos
1. Análise regional	Seleção de áreas favoráveis à ocorrência de mineralizações de interesse; investigação do conhecimento e de trabalhos eventualmente já realizados nas áreas selecionadas; procura de indícios de mineralização; seleção de áreas prioritárias para estudo de detalhe nas etapas seguintes.
2. Levantamento regional	Procurar alvos dentro das áreas selecionadas favoráveis à ocorrência de depósitos minerais.
3. Prospecção	Investigar os indícios de mineralização superficiais e subsuperficiais; hierarquizar ou classificar os indícios por ordem de prioridade para posterior estudo de detalhe.
4. Avaliação de depósito	Caracterizar o depósito mineral (forma, extensão, profundidade, quantidade das substâncias úteis, teores, etc.) para decisão se ele é ou não viável economicamente.
5. Lavra	Estabelecer métodos de lavra e de beneficiamento, definir equipamentos para essas atividades e estudar a viabilidade econômica do empreendimento mineiro.
6. Controle e recuperação do meio ambiente	Coletar dados que permitam conciliar os trabalhos de mineração versus a proteção do meio ambiente, recuperando áreas já degradadas por essas atividades.

Algumas das principais reservas minerais brasileiras estão relacionadas na Tabela 21.6, ordenadas conforme suas participações percentuais (acima de 4%) na disponibilidade mundial da matéria-prima mineral.

O nióbio confere ao Brasil a posição de maior detentor de reservas desse bem mineral e mantém essa posição há alguns anos no quadro mundial das reservas minerais. O depósito localizado no carbonatito do Barreiro (Araçá, MG) é o principal responsável pelas nossas reservas e também pela maior produção. Outros bens minerais listados na Tabela 21.6 representam frações importantes da disponibilidade mundial. Os bens minerais com participação percentual pequena, mas ocupando posição de destaque, comumente correspondem àqueles com distribuição geográfica heterogênea, onde poucos países detêm a maior parte das reservas mundiais conhecidas.

Estudos recentes têm mostrado que parece haver uma relação entre a área de um país e a quantidade de substâncias minerais produzidas (Fig. 21.18). Para os chamados países mais desenvolvidos, esta correlação é bastante evidente: aqueles de maior área produzem mais, certamente como decorrência de maior possibilidade de encontrar substâncias minerais e por serem regiões geologicamente bem conhecidas.

Na Tabela 21.7 estão alguns dos principais bens minerais metálicos e não-metálicos produzidos, ordenados de acordo com a oferta mundial da matéria-prima mineral, a exemplo de cerca de 90% do nióbio ofertado no mundo.

As principais produções físicas (produção expressa em termos de quantidade) correspondem, em boa parte, a minérios com reservas igualmente importantes internacionalmente. Alguns depósitos minerais brasileiros com reserva e/ou produção expressivas, com exceção das substâncias combustíveis, estão indicados na Fig. 21.19.

A quantidade de bens minerais produzida por uma nação é fundamental para o atendimento de suas necessidades internas e para a geração de divisas através de exportação. A razão produção/consumo, que pode ser expressa em porcentagem, permite qualificar os bens minerais de um país como excedente, suficien-

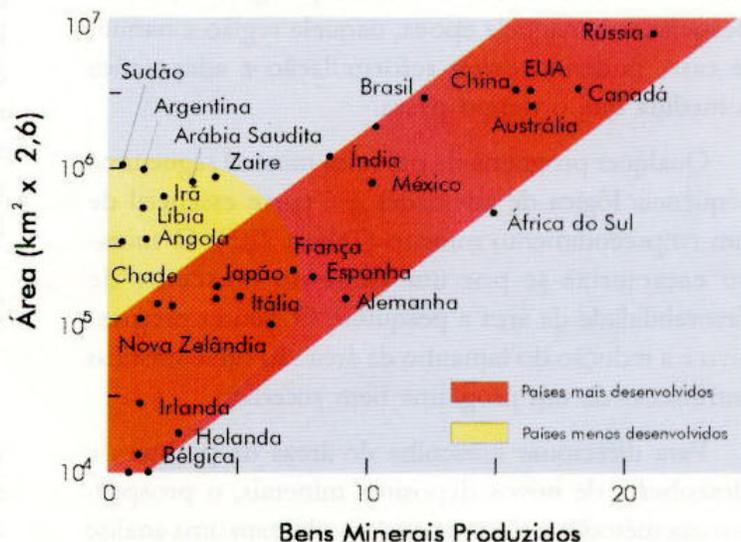


Fig. 21.18 Relação entre área e substâncias minerais produzidas em países mais desenvolvidos (boa correlação) e países menos desenvolvidos (sem correlação). Fonte: Kesler, 1994.

Tabela 21.6 Principais reservas minerais brasileiras.

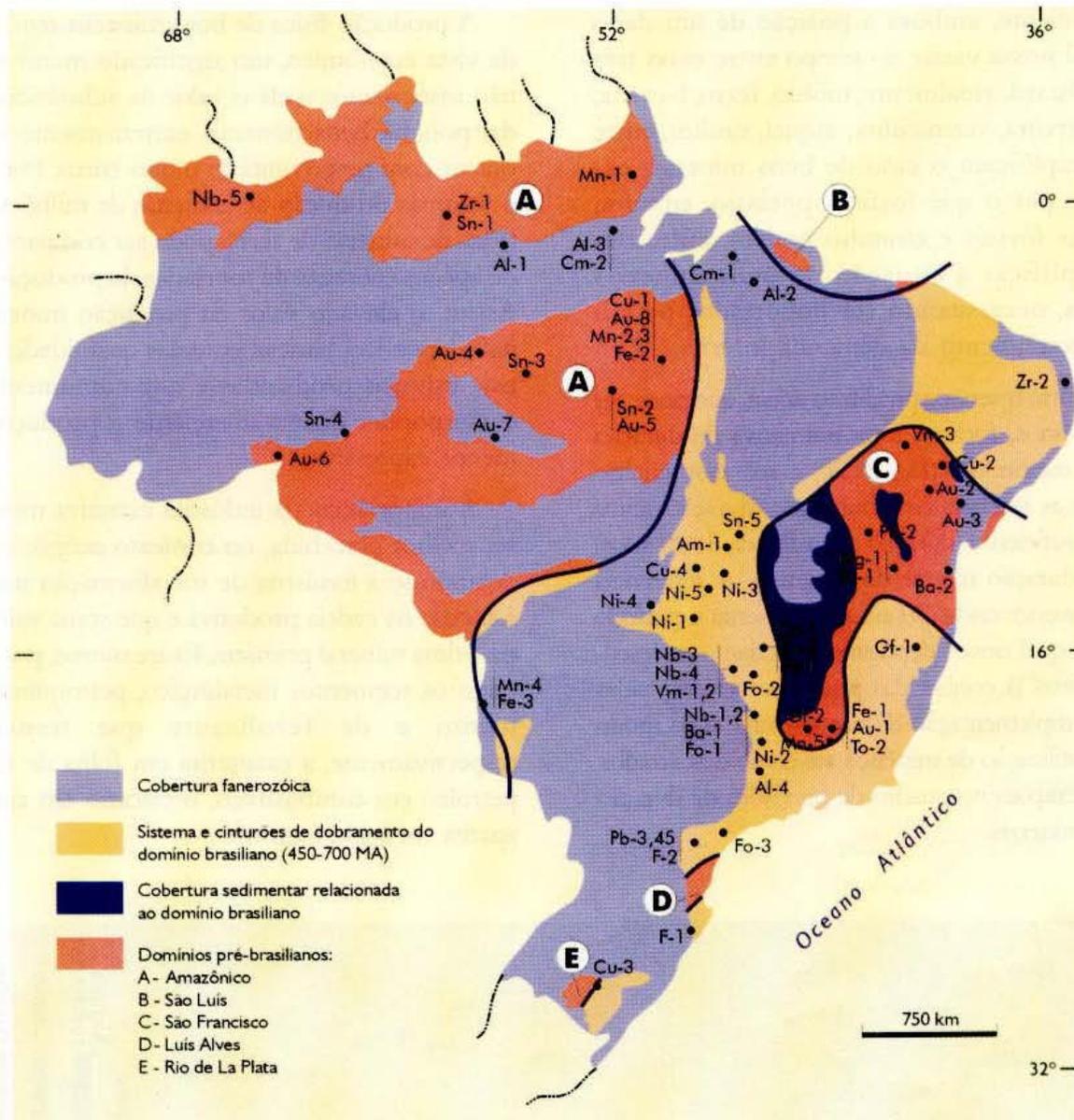
Bem mineral	Reserva medida + reserva indicada (10 ⁴ t)	Reserva mundial (%)	Posição
Nióbio (Nb ₂ O ₅)	3,7	86,0	1
Grafita	95,0	20,1	2
Talco	178,0	19,0	3
Caulim (reserva total)	1.524,0	14,7	2
Vermiculita	16,4	8,3	3
Estanho ⁽¹⁾	0,6	8,0	5
Ferro	20.000,0	7,3	7
Alumínio	1.809,0	6,6	5
Magnesita (MgO)	180,0	5,2	4
Níquel ⁽¹⁾	6,0	4,4	9
Ouro(em t)	1.900,0	4,1	6
Zircônio (ZrO ₂)	2,5	4,0	6

Tabela 21.7 Principais produções minerais brasileiras.

Bem mineral	Produção (10 ³ t)	produção mundial (%)	Posição
Nióbio (Nb ₂ O ₅)	26,0	92,9	1
Ferro	186.700,0	18,1	2
Manganês ⁽¹⁾	956,0	12,5	4
Magnesita calcinada	295,0	10,4	3
Alumínio (bauxita)	11.671,0	9,9	4
Amianto (fibra)	208,0	9,1	5
Estanho ⁽¹⁾	18,0	9,0	4
Caulim	1.280,0	6,7	3
Talco	452,0	5,5	6
Vermiculita	23,0	5,3	4
Cal	6.469,0	5,2	6
Grafita	27,0	4,8	4

Fonte: Sumário Mineral, Departamento Nacional da Produção Mineral, 1998.

(1) metal contido



Alumínio	Al-1 - Trombetas Al-2 - Paragominas Al-3 - Almeirim Al-4 - Poços de Caldas	Ferro	Fe-1 - Quadrilátero Ferrífero Fe-2 - Distr. Min. de Carajás Fe-3 - Urucum	Ouro	Au-1 - Dist. de Nova Lima Au-2 - Serra da Jacobina Au-3 - Maria Preta Au-4 - Província Tapajós Au-5 - Província Xingu-Araguaia Au-6 - Província Rio Madeira Au-7 - Alta Floresta Au-8 - Serra Pelada
Amianto	Am-1 - Minaçu	Fluorita	F-1 - Distr. de Sta. Catarina F-2 - Cerro Azul	Fosfato	Fo-1 - Araxá Fo-2 - Patos de Minas Fo-3 - Jacupiranga
Barita	Ba-1 - Araxá Ba-2 - Camamu	Grafita	Gf-1 - Pedra Azul Gf-2 - Itapeçerica	Talco	To-1 - Brumado To-2 - Nova Lima
Caulim	Cm-1 - Rio Capim Cm-2 - Rio Jari	Magnesita	Mg-1 - Brumado	Vermiculita	Vm-1 - Catalão Vm-2 - Ovidor Vm-3 - Paulistana
Chumbo	Pb-1 - Morro Agudo Pb-2 - Boquira Pb-3 - Panelas Pb-4 - Canoas Pb-5 - Perau	Manganes	Mn-1 - Serra do Navio Mn-2 - Azul Mn-3 - Buritirama Mn-4 - Urucum Mn-5 - Cons. Lafaiete	Zinco	Zn-1 - Morro Agudo Zn-2 - Vazante
Cobre	Cu-1 - Salobo Cu-2 - Caraiíba Cu-3 - Camaquã Cu-4 - Mara Rosa	Nióbio	Nb-1 - Araxá Nb-2 - Tapira Nb-3 - Ovidor Nb-4 - Catalão Nb-5 - Sete Lagos	Zircônio	Zr-1 - Pitinga Zr-2 - Mataraca
Estanho	Sn-1 - Pitinga Sn-2 - Rio Xingu Sn-3 - Rio Tapajós-Jamanxim Sn-4 - Província Estanífera de Rondônia Sn-5 - Província Estanífera de Goiás	Níquel	Ni-1 - Americano do Brasil Ni-2 - Fortaleza de Minas Ni-3 - Niquelândia Ni-4 - Santa Fé Ni-5 - Barro Alto		

Fig 21.19 Localização de distritos e depósitos minerais mais importantes do Brasil.

te ou insuficiente, embora a posição de um dado bem mineral possa variar no tempo entre essas três classes. No Brasil, atualmente, nióbio, ferro, bauxita, manganês, grafita, vermiculita, níquel, caulim, entre outros, exemplificam o caso de bens minerais excedentes, ao passo que fosfato, potássio, enxofre, combustíveis fósseis e chumbo podem, entre outros, exemplificar a situação de bens minerais insuficientes, necessitando ser importados para o completo atendimento da demanda interna.

A razão entre reserva e produção anual, que pode ser expressa em anos, fornece uma estimativa de duração das reservas conhecidas (Fig. 21.20) e sob esse critério qualificam-se as reservas em abundante (duração acima de 20 anos), suficiente (duração aproximada de 20 anos) ou carente (duração menor de 20 anos). A referência temporal convencionada (20 anos) representa o período de tempo no qual novos depósitos poderiam ser descobertos ou minas já conhecidas poderiam ser ampliadas ou, ainda, a implementação de novas técnicas de modo a permitir a utilização de minérios até então descartados, levando a alterações no quadro de previsões de duração de reservas minerais.

A produção física de bens minerais tem, do ponto de vista econômico, um significado muito relativo se não associarmos a ela o valor da substância produzida, pois há bens minerais extremamente valiosos e outros com preço unitário muito baixo. Por exemplo, o valor da produção de centenas de milhões de toneladas de minério de ferro pode ser comparável àquele de apenas centenas de toneladas de produção de ouro. Assim, o elevado valor da produção mineral de um país dependerá basicamente das quantidades de minérios valiosos produzidas e que comumente podem corresponder quantitativamente a produções físicas menos expressivas.

A importância da indústria extrativa mineral pode ser melhor percebida, no contexto econômico, considerando-se a indústria de transformação mineral que a sucede na cadeia produtiva e que soma valor à matéria-prima mineral primária. Entre outros, por exemplo, estão os segmentos metalúrgico, petroquímico, de cimento e de fertilizante que transformam, respectivamente, a cassiterita em folha de flandres, o petróleo em combustíveis, o calcário em cimento e a apatita em ácido fosfórico.

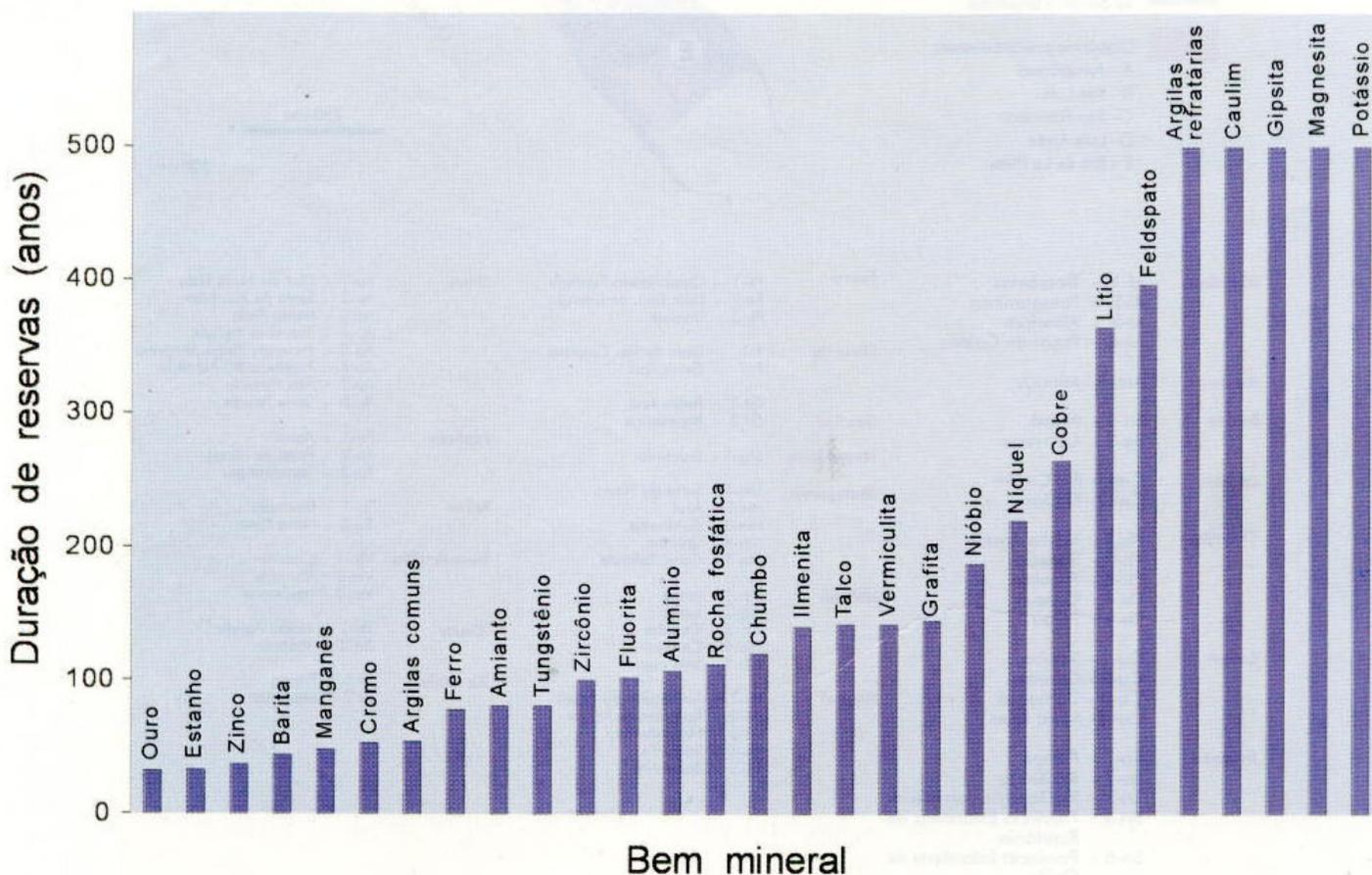


Fig. 21.20 Duração estimada de reservas brasileiras de alguns bens minerais, com base na razão reserva/produção anual. Dados de Anuário Mineral Brasileiro, 1997 e Sumário Mineral, 1998, Departamento Nacional da Produção Mineral.

O Brasil vende e compra diversos produtos de origem mineral que são agrupados em quatro classes (Tabela 21.8), constituindo o denominado setor mineral, conforme sistematização do Departamento Nacional da Produção Mineral.

O País possui uma pauta diversificada de exportações de bens minerais primários, na qual destacam-se o minério de ferro, além de bauxita, rochas ornamentais, manganês, caulim, amianto, diamante e magnésita. Por outro lado, o consumo doméstico depende em diferentes graus da importação de vários produtos de origem mineral, dos quais o petróleo tem sido o item mais oneroso, apesar dos avanços na produção interna com base em novas descobertas realizadas pela Petrobrás. Produção insuficiente ou ausência de recursos minerais economicamente viáveis implicam pesada dependência externa de outros bens minerais, tais como carvão metalúrgico, cobre, fertilizante potássico, enxofre, gás natural, fosfato, titânio e chumbo.

21.6 Recursos Minerais e Civilização

O estilo de vida que herdamos, praticamos e que certamente passaremos para as próximas gerações é inegavelmente dependente do uso e de aplicações de recursos minerais. São muitos os exemplos de situações cotidianas que se viabilizam à base da extração de recursos minerais. Basta olharmos atentamente ao redor de nosso ambiente de trabalho, em nossa casa, na escola e mesmo no lazer para que identifiquemos equipamentos, aparelhos, móveis, utensílios – uma série de objetos – cuja fabricação envolve uma variedade de produtos derivados de bens minerais de todas as classes (metais, não-metálicos, combustíveis fósseis, metais preciosos, gemas, etc.).

As atividades industriais modernas em diferentes áreas de metalurgia, química, fertilizante, cimento, construção civil, elétrica, etc. usam e transformam bens minerais, gerando produtos manufaturados, inimagináveis pelos nossos antepassados, que permitem a execução de nossas atividades com eficiência e certo conforto.

Se analisarmos os usos que a humanidade faz dos diversos bens minerais, perceberemos a dependência que temos deles e, se somarmos as quantidades utilizadas, poderemos chegar a números no mínimo curiosos em termos do consumo *per capita* desses bens (Fig. 21.21), em particular nos países altamente industrializados.

Tabela 21.8 Classificação e exemplos de produtos de origem mineral comercializados pelo Brasil.

Classes	Produtos - Exemplos
Bens minerais primários	minério bruto ou beneficiado, mas ainda substância mineral: minério de ferro (hematita), concentrado de minério de cobre (calcopirita)
Semi-manufaturados	produtos da indústria de transformação mineral: ferroligas, cátodos de cobre.
Manufaturados	produtos comerciais finais: tubos de aço, chapas de cobre.
Compostos químicos	produtos específicos da indústria de transformação mineral da área química: óxido férrico, cloreto de cobre.

Diferentemente de outros recursos naturais, tais como os de origem vegetal ou animal, a maioria dos recursos minerais não é renovável, e a extração se dá numa velocidade bem maior do aquela com que eles se formam (milhares ou mesmo milhões de anos). Uma vez lavrados e utilizados, eles podem não mais se formar na escala de tempo da vida humana. Decorre daí a disponibilidade finita de bens minerais, pelo menos em termos dos tipos de depósitos que atualmente conhecemos e que estamos habituados a lavar. Uma estimativa de duração de reserva de um dado bem mineral pode ser visualizada, de uma forma simples, pela razão entre sua reserva e sua produção atuais (Fig. 21.22).

Os aproximadamente seis bilhões de habitantes da Terra estão progressivamente procurando o bem-estar que o consumo mineral pode proporcionar e pressionam para que sejam encontrados e produzidos cada vez mais bens minerais. No entanto, notamos uma distribuição desequilibrada do consumo dos bens minerais, cabendo a maior fatia aos países industrializados, ao passo que um menor consumo caracteriza os menos desenvolvidos. Para estes países é lógico prever que, com o aumento do padrão de vida, passarão a consumir sua parte

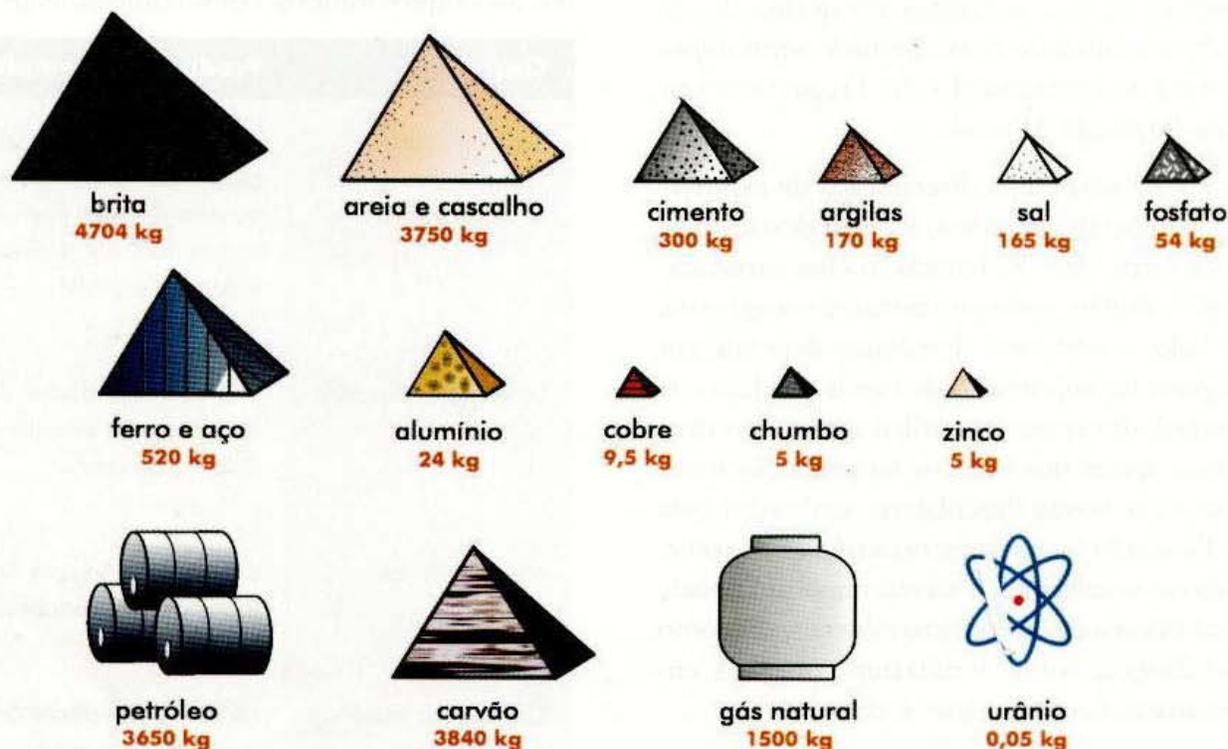


Fig. 21.21 Consumo anual médio de alguns recursos minerais por pessoa nos E.U.A. Fonte: Craig, Vaughan, & Skinner, 1996.

de minerais, necessária a seu desenvolvimento, levando o consumo mineral *per capita* a crescer mais rápido e implicando a intensificação da produção mineral. O crescimento populacional é também um fator de aceleração da produção mineral. Embora a taxa de expansão demográfica venha diminuindo globalmente, é evidente que o consumo de vários bens minerais tem crescido mais rápido que a população, tal como é observado com o petróleo (Fig. 21.23).

Essa situação delega, em particular aos geólogos, uma grande responsabilidade, pois eles têm a missão de procurar e identificar depósitos minerais, assim como avaliar suas características com vistas à obtenção do bem mineral. Nesse contexto pode-se perguntar: será possível descobrir novos depósitos minerais parecidos com os de hoje, quanto a porte, teor e viabilidade técnica e econômica? Boa parte dos bens minerais, notadamente aqueles de elementos menos abundantes, é historicamente lavrada com teores decrescentes e com isso os custos energéticos são cada vez mais elevados para transformar esses minérios em produtos manufaturados.

Fisicamente, os recursos minerais são praticamente inesgotáveis, pois a crosta terrestre dispõe de gigantescas quantidades de substâncias minerais úteis, porém, ocorrem em concentrações menores do que aquelas atualmente exigidas para que sejam lavradas. No entanto, a utilização de recursos minerais a teores progressivamente decrescentes, implicando maiores custos energéticos, será viável somente se dispusermos de fontes abundantes e baratas de energia, pois esta é um insumo essencial na extração e tratamento de bens minerais, assim como na fabricação de seus produtos derivados.

Além disso, estamos nos tornando cada vez mais conscientes de que sua produção e uso devem ser conduzidos preservando o meio ambiente. A produção e uso inadequados do bem mineral podem direta ou indiretamente levar a diferentes formas da degradação ambiental, outrora de efeitos locais ou regionais, agora amplos (aquecimento global, chuva ácida, deterioração da camada de ozônio, poluição de reservatórios de água etc.). Assim, não só a provável futura escassez do bem mineral nos aflige, mas também as conseqüências nocivas e, às vezes, desastrosas de sua lavra e utilização.

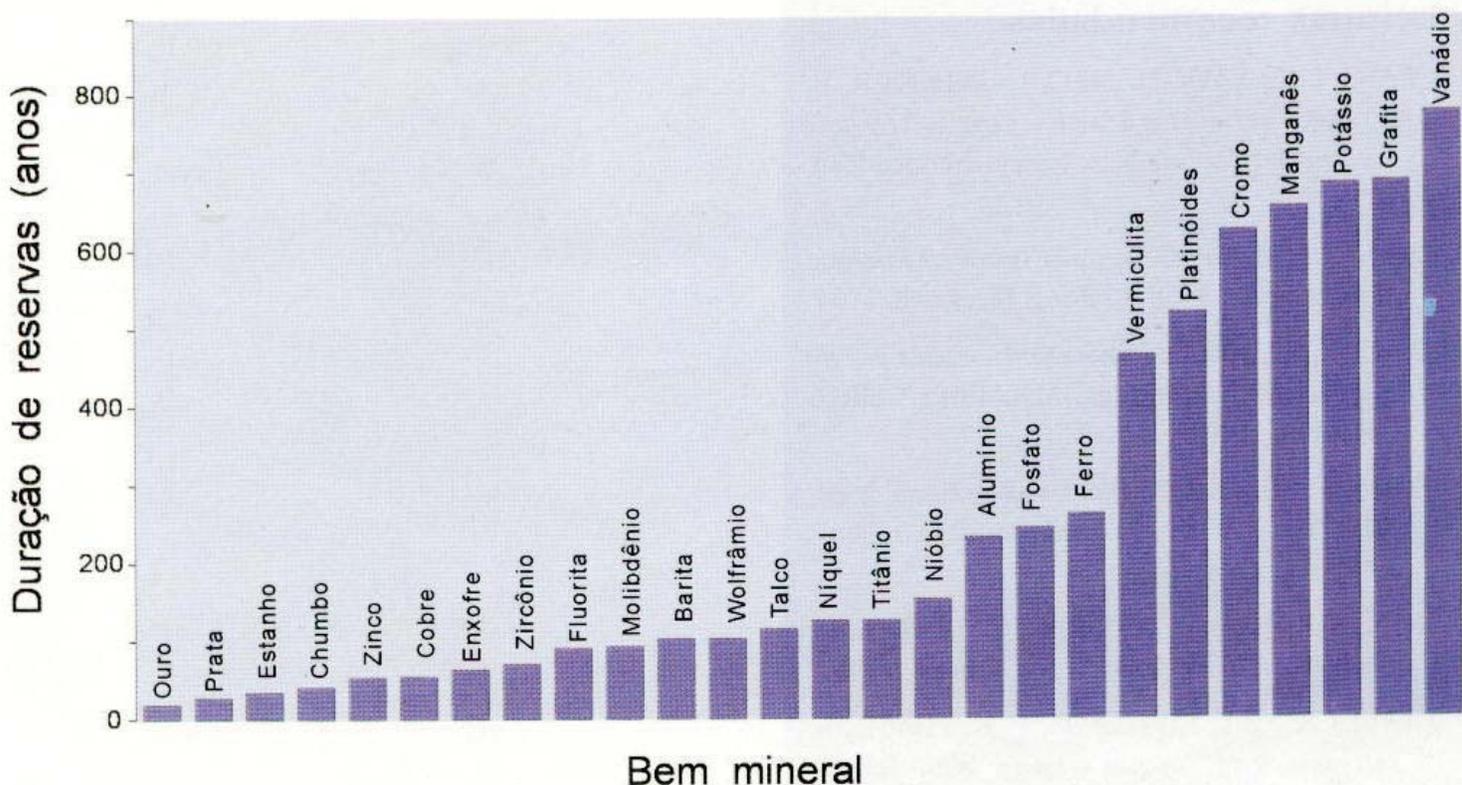


Fig. 21.22 Estimativa de duração das reservas mundiais para alguns bens minerais com base na razão reserva/produção anual. Dados do Sumário Mineral, Departamento Nacional da Produção Mineral, 1998.

A pressão exercida por esses fatores levou à elaboração do conceito de conservação do recurso como sendo o uso adequado do bem mineral (“sabendo usar, não vai faltar”): evitar o excesso e atender às necessidades de melhoria das condições de vida da nossa geração e da futura.

Apesar dessa complexidade, a perspectiva é otimista. Cremos que a engenhosidade do ser humano levará ao surgimento de novas tecnologias em suas diversas atividades, paralelamente ao crescimento contínuo da população, ainda acelerado em certas regiões do nosso planeta. Em particular na indústria extrativa mineral e na indústria de transformação mineral, as inovações tecnológicas incidiriam em suas diferentes fases ou etapas, levando, por exemplo, a um melhor aproveitamento dos recursos minerais já conhecidos, ao incremento da reciclagem de produtos manufaturados ou à viabilização de recursos outrora marginalizados.

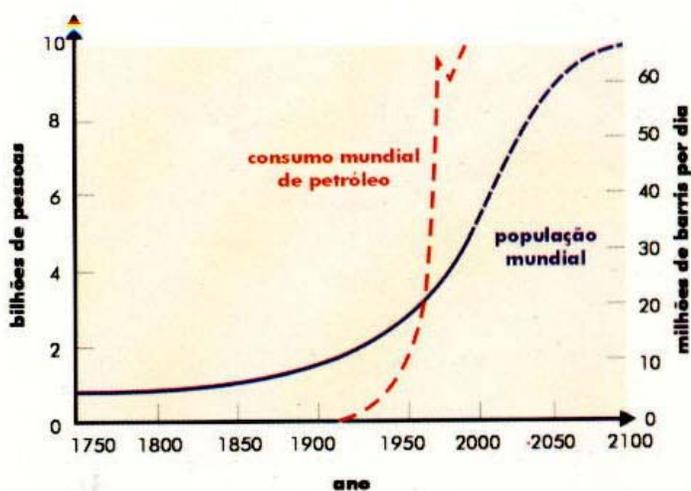


Fig. 21.23 Relação entre o crescimento da população mundial e o consumo de petróleo: este aumenta mais rapidamente que a população. Fonte: Kesler, 1994.

Leituras recomendadas

CRAIG, J. R.; VAUGHAN, D. J.; SKINNER, B. J. *Resources of the Earth - Origin, Use and Environmental Impact*. New Jersey: Prentice-Hall, 1996.

EVANS, A. M. *Ore Geology and Industrial Minerals: an Introduction*. 3ª ed. Oxford: Blackwell, 1994.

KESLER, S. E. *Mineral Resources, Economics and the Environment*. Cambridge: MacMillan College Publishing, 1994.

PRESS, F.; SIEVER, R. *Understanding Earth*. 2ª ed. New York: W. H. Freeman and Company, 1998.

SKINNER, B. J.; PORTER, S. C. *The Dynamic Earth*. New York: John Wiley & Sons, 1995.

TARBUCK, C. J.; LUTGENS, F. K. *Earth - An Introduction to Physical Geology*. New Jersey: Prentice-Hall, 1996.

