

CAPÍTULO 1

Introdução aos Magmas e às Rochas Magmáticas

POR QUE ESTUDAR AS ROCHAS MAGMÁTICAS?

Os objetivos deste livro são despertar o interesse do leitor em rochas e processos magmáticos e desenvolver habilidades essenciais relativas à descrição, classificação e nomenclatura dessas rochas, revelando o quanto há a aprender sobre processos ígneos com base em uma interpretação criteriosa e fundamentada de texturas e características mineralógicas e geoquímicas. O público-alvo deste volume são os estudantes dos níveis intermediários da geologia, que já dominam os conteúdos elementares de rochas ígneas. Entretanto, os iniciantes descobrirão que o primeiro capítulo e os quadros de texto – além do Glossário – propiciam uma introdução adequada aos temas abordados nesta obra. Este livro foi escrito com ênfase na investigação prática, sobretudo no tocante às técnicas de análise que utilizam a microscopia de polarização. Logo, dados básicos sobre a identificação de minerais foram incluídos para reunir em uma única obra todo o aparato necessário durante uma aula prática típica sobre rochas e processos ígneos.

O ponto de partida de uma disciplina de petrologia ígnea consiste em responder a algumas perguntas. Qual é a missão do petrólogo, geólogo ou vulcanólogo em seus estudos sobre rochas ígneas? Por que nos dedicamos a essa tarefa? O que pretendemos aprender? Quais são as repostas que queremos encontrar? Essas questões devem nortear a mente do petrólogo que embarca em um estudo petrográfico ou geoquímico. Como ciência, a petrologia vem trilhando um longo caminho evolutivo, desde seus primeiros dias, quando a mera descrição de uma rocha ígnea era um fim em si mesmo. Contudo, hoje um petrólogo estuda uma suíte de rochas ígneas com um ou mais objetivos em mente, entre os quais:

- entender os *processos* eruptivos;

- avaliar o *risco* de um vulcão para comunidades adjacentes com base nos produtos de derrames passados;
- investigar a *evolução do magma* em uma câmara magmática subvulcânica;
- documentar a *estrutura* e a *formação* da crosta oceânica ou continental;
- deduzir acerca de *ambientes tectônicos* antigos (por exemplo, uma dorsal meso-oceânica ou um arco de ilhas) com base na composição de rochas ígneas contemporâneas a eles;
- compreender a formação de *depósitos minerais* associados a rochas ígneas;
- estabelecer a *idade absoluta* de uma sucessão de rochas sedimentares e vulcânicas (pois as rochas ígneas são mais fáceis de datar utilizando técnicas isotópicas, comparadas a rochas sedimentares);
- identificar a *fonte* de que um magma se originou e as *condições* em que se deu a fusão (investigando a “*gênese do magma*”, por exemplo);
- identificar o caráter e distribuição de *domínios geoquímicos* no manto subjacente e sua evolução no tempo com base no exame de rochas magmáticas eruptivas.

Nesses tipos de investigação, a descrição criteriosa das rochas ígneas tem papel importante, mas, em termos gerais, o intuito principal é conhecer os processos magmáticos ou as condições em que estes ocorrem. Essa meta – estudar rochas ígneas para aprender mais sobre processos – é recorrente neste livro, porque compreender o que acontece em sistemas magmáticos é o objetivo fundamental de todo petrólogo. As rochas ígneas são fontes de informação não somente sobre os processos que hoje ocorrem sobre a superfície da Terra, mas também:

- sobre processos ocorridos no passado ao longo da história da Terra, e
- sobre transformações em partes do planeta que são inacessíveis por via direta, como uma câ-

mara magmática originalmente posicionada 5 km abaixo de um vulcão ativo, mas cujos componentes – os produtos eruptivos – estejam hoje expostos na superfície.

Hoje o estudo de rochas ígneas requer uma gama de habilidades, como a análise das relações de campo, a identificação de amostras de mão no local em que são encontradas, a descrição e interpretação de lâminas delgadas, a atribuição de nomes de rocha informativos, a interpretação das análises de rochas e de minerais (muitas vezes incluindo elementos-traço e razões isotópicas), além da interpretação de curvas experimentais de equilíbrios e de diagrama de fases. Este livro apresenta uma introdução a todas as habilidades práticas e descritivas citadas, salvo a primeira. Nosso objetivo não é substituir obras sobre as teorias da petrogênese ígnea em nível avançado.

O restante deste capítulo é dedicado à introdução do vocabulário básico necessário para uma explicação detalhada sobre rochas ígneas.

O QUE É O MAGMA?

As rochas ígneas são aquelas formadas a partir da fusão no interior da Terra. Os petrólogos usam dois termos para se referir à rocha fundida. **Magma**¹ é o termo mais geral, que, descreve misturas de líquido e qualquer cristal que esse líquido contenha em suspensão. Um bom exemplo é uma lava fluindo, contendo **cristais** em suspensão no material fundido (Figura 1.1): o termo magma refere-se ao conjunto, incluindo os estados sólidos e líquidos da matéria presente na lava. O **líquido magmático**, por outro lado, diz respeito apenas ao material liquefeito, livre de qualquer material sólido que possa estar em suspensão ou associado a ele de alguma forma. A diferença fica mais clara se pensarmos como faríamos a análise química das diferentes composições do magma e do líquido magmático, após a solidificação do derrame de lava (Figura 1.1). A composição de um *magma* poderia ser estimada triturando uma amostra da lava solidificada, incluindo os fenocristais e a matriz (tomando cuidado para que estejam presentes em proporções representativas). Contudo, a análise da composição do *líquido magmático* exige que a matriz – o equivalente solidificado do material fundido entre os fenocristais – seja separada e analisada individualmente.

¹ Os termos em **negrito** são definidos (e, em alguns casos, têm uma explicação etimológica) no Glossário.

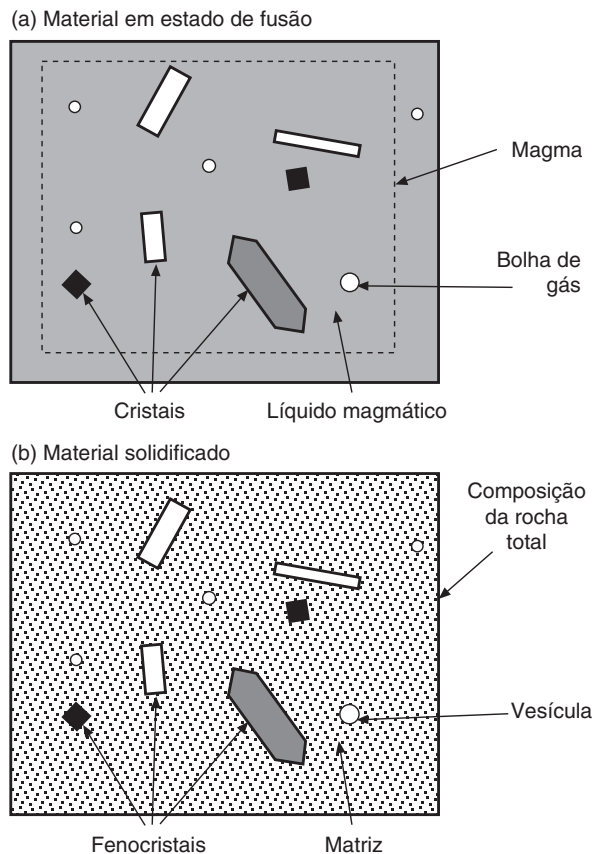


Figura 1.1 A terminologia utilizada para designar os diferentes elementos constituintes de (a) uma lava em estado de fusão e (b) a mesma lava, no estado sólido.

Na verdade o termo “magma” pode ser utilizado de modo ainda mais amplo. Em geral, um corpo de lava em ascensão, ao se aproximar da superfície, contém bolhas de gás e fenocristais. As bolhas são formadas por gás que tende a escapar do líquido magmático devido à redução de pressão inerente ao movimento ascendente (ver Quadro 1.4). Com frequência, o termo “magma” descreve o líquido magmático, os cristais e quaisquer bolhas de gás presentes nele (Figura 1.1). Uma vez que chega à superfície e perde parte de seus gases para a atmosfera, o líquido magmático passa a ser mais adequadamente chamado de “lava”. Contudo, conduzir uma análise química representativa da composição original do magma que inclua seus componentes gasosos seria difícil: quando o líquido magmático solidifica e contrai ao esfriar, os conteúdos gasosos das vesículas escapam para a atmosfera. (Eles seriam perdidos de qualquer maneira, durante a fragmentação da amostra rochosa para análise.) Portanto, a determinação da concentração desses

constituintes **voláteis** do magma – a partir da rocha sólida, produto final do magmatismo – requer uma abordagem analítica diferente, discutida a seguir.

A origem dos magmas está na fusão dos materiais presentes nas profundezas da Terra (Capítulo 2). Na maioria das vezes, a fusão inicia no manto, embora a passagem de magma quente através da crosta continental possa provocar fusão adicional, desta vez do material da própria crosta, elevando a complexidade química e petrológica das rochas continentais. Em áreas oceânicas e continentais, os magmas derivados do manto podem esfriar e cristalizar parcialmente no interior das câmaras magmáticas, reservatórios existentes no interior da crosta em que se eles acumulam (Capítulo 3). Esses processos ampliam de modo considerável a diversidade de composições do magma que, em algum momento no futuro, entrará em erupção na superfície.

A DIVERSIDADE DAS COMPOSIÇÕES NATURAIS DOS MAGMAS

Qual é o significado da composição do magma (ou da rocha)?

A composição global de uma rocha ígnea pode ser expressa de duas maneiras:

- uma análise geoquímica quantitativa, que forneça os percentuais em massa de cada um dos seus principais constituintes *químicos* (Quadro 1.1);
- uma lista de *minerais* presentes na rocha e visualizados ao microscópio e que pode incluir uma estimativa qualitativa ou quantitativa de suas proporções relativas.

Embora essas duas maneiras estejam correlacionadas, elas não são totalmente equivalentes em termos das informações que produzem. Ao constituir uma evidência quantitativa da composição química que pode ser representada em gráficos (por exemplo, a Figura 1.2) e utilizada em cálculos, uma análise geoquímica fornece informações mais precisas. A **análise integral** (também conhecida por **análise de rocha total**) de uma rocha vulcânica dá uma estimativa muito próxima – exceto pela composição de seus componentes voláteis – da composição do magma do qual ela se originou, em um estágio anterior ao início de sua cristalização. Uma análise detalhada de dados geoquímicos revela muito sobre a *fonte* do líquido magmático e as *condições* (pressão, profundidade e extensão da fusão) em que ele originalmente se formou.

No entanto, existem também outras modalidades de análise de rochas que são mais práticas em condições específicas. Na maioria das vezes, as análises geoquímicas, que requerem um grau maior de sofisticação de instalações laboratoriais, não estão disponíveis em campo, quando é comum o geólogo perceber que observações sobre a mineralogia e a textura de amostras de mão representam um método mais prático de caracterizar e diferenciar os variados tipos de rocha presentes na área. Além disso, a ocorrência de certos minerais indicadores-chave – como quartzo, olivina, nefelina, aegirina-augita – em lâminas delgadas revela vestígios essenciais e prontamente observáveis da composição química do líquido magmático, sem a necessidade de recorrer a uma análise geoquímica. A mineralogia de uma rocha ígnea também gera informações sobre *processos pós-magmáticos* (como intemperismo e **alteração** hidrotermal) capazes de influenciar resultados, fazendo com que sua composição química não represente a composição do magma parental (Quadro 1.4).

A *petrografia* é a ciência que estuda a composição mineralógica e a textura de uma rocha, utilizando o microscópio petrográfico para o exame de lâminas delgadas. A análise petrográfica de uma rocha ígnea varia de uma simples lista dos materiais observados (e das relações texturais entre eles) a uma análise quantitativa completa de seus volumes relativos mensurados em lâmina delgada. O exame petrográfico qualitativo antecede a análise geoquímica, pois permite separar as amostras inadequadas ou não representativas de um conjunto de amostras e, assim, evitar análises químicas desnecessárias. Porém, um exame petrográfico revela muito mais sobre uma rocha do que sua adequabilidade para a análise geoquímica: o estudo detalhado da textura dessa rocha fornece um volume de informações sobre a *erupção e cristalização* do magma.

Depreende-se do exposto que uma análise geoquímica e uma análise petrográfica (da mineralogia) de uma rocha ígnea (com base no mineral) são fontes de informações que se complementam e que, isoladamente, não permitem a total compreensão da origem e da história dessa rocha.

Quanto varia a composição natural dos magmas?

A Figura 1.2 mostra um **diagrama de variação**, a representação gráfica das composições de diferentes rochas vulcânicas, originárias em uma variedade de ambientes geotectônicos, obtidas por

Quadro 1.1 As análises químicas de rochas e minerais

A maioria das rochas e dos minerais ígneos, bem como dos magmas dos quais se formam, cai na categoria de compostos químicos chamados de **silicatos** – formados por metais combinados com átomos de silício e oxigênio.

A composição química de materiais complexos contendo silicatos é mais facilmente compreendida se a considerarmos como uma mistura de óxidos: na maioria das vezes, o dióxido de silício (SiO_2 , a “sílica”) é o óxido mais abundante em rochas e minerais ígneos, embora também estejam presentes, em quantidades significativas, os óxidos de titânio (TiO_2), de alumínio (Al_2O_3), de ferro (Fe, que forma os óxidos férrico, Fe_2O_3 , e ferroso, FeO), de manga-

nês (MnO), de magnésio (MgO), de cálcio (CaO), de sódio, (Na_2O), de potássio (K_2O) e de fósforo (P_2O_5). Uma típica análise de silicatos, que gera a *porcentagem em massa* de cada um dos óxidos citados (tradicionalmente chamada de *análise em porcentagem em peso*, apesar de o termo não ser correto) é mostrada na tabela abaixo.* A vantagem de expressar uma análise em *porcentagem* de óxidos está na possibilidade de calcular a quantidade exata de oxigênio, sem precisar analisar o elemento diretamente. Os elementos listados, cujos óxidos são encontrados em teores acima de 0,1% em massa, são chamados de **elementos maiores**.

Tabela 1.1.1 Análise de um basalto típico

SiO_2	48,3
TiO_2	2,591
Al_2O_3	13,03
Fe_2O_3 (férrico)	6,84
FeO (ferroso)	7,72
MnO	0,23
MgO	5,46
CaO	10,91
Na_2O	2,34
K_2O	0,51
P_2O_5	0,26
H_2O^+	1,41
CO_2	0,49
Total	100,1

Observe que o ferro pode ser expresso tanto na forma de óxido férrico (ferro trivalente) quanto ferroso (ferro bivalente). A razão para isso é que o comportamento dos íons Fe^{+3} e Fe^{+2} em líquidos magmáticos difere do seu comportamento em cristais minerais, conforme explicado no Quadro 2.6. Mesmo assim, a maior parte das análises utilizadas hoje revela apenas a quantidade total de óxido de ferro, expressa como “ ΣFeO ” ou “ $\Sigma\text{Fe}_2\text{O}_3$ ”. A letra grega sigma (Σ) é o símbolo de somatório. As fórmulas usadas nesses cálculos são apresentadas no Quadro 2.6.

Os dois últimos itens na análise (Tabela 1.1.1) representam as porcentagens em massa dos dois principais constituintes **voláteis** da rocha (ver Quadro 1.3). A análise é finalizada com o cálculo de uma porcentagem total de todos os óxidos determinados, uma medida da exatidão dos cálculos que, se a análise tiver sido conduzida corretamente, está entre 99,5 e 100,5%, na maioria das vezes.

Diversos outros elementos estão presentes em magmas, em rochas e em minerais em concentrações menores do que 0,1%. Esses elementos menos abundantes são chamados de **elementos-traço**, e suas concentrações são expressas em partes por milhão em

massa ($\text{ppm} = \mu\text{g g}^{-1}$ = microgramas do *elemento* por grama de amostra) ou, no caso de elementos-traço mais raros, em partes por bilhão ($\text{ppb} = \text{ng g}^{-1}$ = nanogramas do elemento por grama da amostra). Apesar de estarem nessas concentrações baixas, os elementos-traço fornecem informações importantes sobre a fonte do magma e suas condições de formação.

Hoje, a espectrometria de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente (ICP-AES, sigla de *Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy*) e a espectrometria de fluorescência por raio X (XRFS, *X-Ray Fluorescence Spectroscopy*) são os métodos mais usados na análise de rochas. As duas técnicas são capazes de determinar os elementos maiores e alguns elementos-traço presentes em rochas ígneas. Os detalhes desses e de outros métodos, que vão além do escopo deste livro, são encontrados em Gill (1997), em que também é descrita a preparação da amostra para a análise.

* As análises de alguns minerais não silicatos (óxidos, carbonatos, fosfatos e sulfatos) podem ser conduzidas conforme apresentado. Nesses casos, o SiO_2 é um componente secundário.

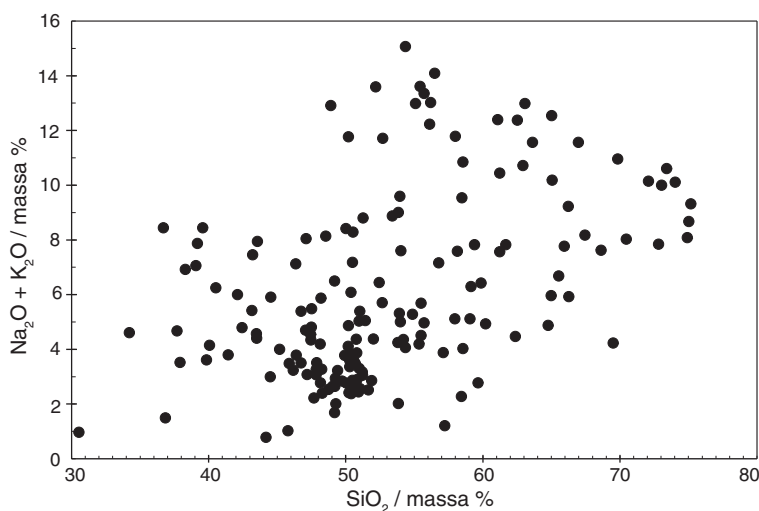


Figura 1.2 Gráfico do teor de álcalis totais ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) relativo ao teor de SiO_2 (ambos em % em massa) para uma gama representativa de análises de rochas vulcânicas terrestres (representando composições de líquidos magmáticos ígneos). Os dados foram obtidos por Wilson (1989) com algumas contribuições de Carmichael et al. (1974) e Cox et al. (1979). Todos os dados foram recalculados em base livre de voláteis (ver Quadro 1.3), exceto no caso das análises feitas por Wilson (1989), cujos dados sobre voláteis não foram fornecidos provavelmente porque os autores efetuaram tal correção.

análises geoquímicas. O eixo vertical é a soma dos teores de Na_2O e K_2O (expressos tanto para cada um dos óxidos individuais quanto para a soma de seus teores, em porcentagem em massa [% massa; ver nota de rodapé²], isto é, gramas de óxido por 100 g de rocha) de cada amostra. O eixo horizontal representa o teor de SiO_2 (também em % em massa) e cada ponto, ou par de coordenadas $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ e SiO_2 , indica o resultado da análise de uma rocha específica. Nesse tipo de diagrama, a análise de rocha representa a composição original do magma. Esse gráfico específico é chamado de diagrama “álcalis totais vs. sílica” (TAS, *total-alkalis vs. silica*) e é muito utilizado na classificação geoquímica de rochas vulcânicas (ver Figura 1.4).

A principal finalidade de apresentar um diagrama de variação neste ponto de nossa discussão é ilustrar o quanto varia a composição dos magmas naturais silicatados: os teores de SiO_2 variam de 31 a 76%, e os teores de álcalis totais oscilam entre 1 e 15%. (Essa faixa de variação vale apenas para magmas silicatados: se os magmas carbonatíticos fossem incluídos na análise, a variação composicional seria muito maior.) Uma variação dessa amplitude na composição pode ser atribuída sobretudo a quatro

fatores que desempenham um papel importante na gênese do magma:

- A composição e a mineralogia da fonte do magma (por exemplo, a crosta ou o manto)
- A profundidade em que ocorre a fusão
- A extensão (%) da fusão
- Os processos de fracionamento ocorridos em câmara magmática posicionada em pequena profundidade, como a **cristalização fracionada**

Os efeitos desses fatores serão discutidos nas seções subsequentes deste livro. Neste ponto, a conclusão relevante é que as composições de rochas vulcânicas (e magmas) se distribuem ao longo de um amplo intervalo de valores de álcalis totais- SiO_2 , sem quaisquer lacunas nessa distribuição, as quais indicam a necessidade de classificar essas rochas em subgrupos naturais. Em outras palavras, em seu curso a natureza cria um *continuum* de possibilidades para a composição magmática no interior da Terra, e qualquer tentativa de categorizar ou subdividir essa composição (com o estabelecimento de nomenclaturas, por exemplo) é arbitrária e artificial.

OS PARÂMETROS UTILIZADOS PARA CLASSIFICAR ROCHAS ÍGNEAS

A menos que os petrólogos dedicados ao estudo das rochas ígneas venham a desenvolver um méto-

² Neste livro, o termo “porcentagem em massa” é utilizado em lugar do termo mais comum, embora menos indicado, “porcentagem em peso”.

do puramente numérico para a classificação desses materiais, será necessária uma nomenclatura consistente que permita subdividir esse amplo espectro de composições em campos menores, com nomes específicos para as rochas neles contidas, a exemplo da divisão de um estado em municípios e distritos para fins administrativos.

A nomenclatura atual das rochas ígneas está fundamentada em três modalidades de observação, as quais podem influenciar o nome dado a uma rocha:

- As observações petrográficas *qualitativas* (por exemplo, a presença ou ausência de quartzo)
- Os dados petrográficos *quantitativos* (a porcentagem de quartzo na rocha)
- A composição *química* (a posição da rocha em um diagrama TAS – Figura 1.4)

Essas modalidades podem ser mais bem ilustradas utilizando três formas básicas de categorizar rochas ígneas.

A classificação com base em critérios qualitativos – o tamanho de grão

A Figura 1.3a mostra que as rochas ígneas podem ser classificadas, em relação ao tamanho de grão, em grossa, média e fina. Essa classificação é obtida com base em uma estimativa qualitativa (ou semiquantitativa) do tamanho médio de grão da *matriz* da rocha (*não* do tamanho dos fenocristais presentes). Essa estimativa também pode ser feita por observação da amostra de mão ou, com maior confiabilidade, por exame de lâmina delgada. Dependendo da categoria de granulação em que é inserida (grão fino, médio, grosso), uma rocha de mineralogia basáltica, por exemplo, pode ser chamada de basalto, dolerito (no Reino Unido), diabásio (nos Estados Unidos)³ ou gabro.

Outro exemplo de observação qualitativa utilizada na classificação de rochas é a presença de quartzo ou de nefelina, a qual indica se a rocha analisada é **supersaturada** ou **subsaturada em sílica**.

A classificação com base na proporção de minerais – o índice de cor

Os adjetivos “ultramáfico” e “leucocrático”, consagrados no estudo de rochas ígneas, dizem respeito às proporções relativas de minerais escuros e claros presentes nelas. Os termos “escuro” e “claro” se referem à aparência dos minerais na amostra de mão,

conforme indica o lado esquerdo da Figura 1.3b. Os minerais escuros também são chamados de **máficos** ou **ferromagnesianos**, ao passo que os claros são denominados minerais **félsicos**. A porcentagem de minerais escuros constitui o **índice de cor** da rocha.

As mensurações quantitativas das proporções de minerais em uma lâmina delgada são executadas utilizando uma técnica denominada *contagem de pontos*. A técnica requer a colocação da lâmina delgada em estudo sobre um dispositivo especial fixado na platina de um microscópio que permite mover a lâmina a intervalos pequenos e predefinidos ao longo dos eixos *x* e *y* pressionando os botões específicos para a função. A observação começa próximo a um canto da lâmina, com a identificação do mineral sob o retículo graduado das objetivas enquanto a lâmina delgada é deslocada ao longo da platina, e prossegue com o registro do número de ocorrências de cada mineral presente na amostra. Após a aquisição de centenas de pontos de dados cobrindo uma área significativa da lâmina delgada, a porcentagem de cada mineral pode ser calculada com facilidade. Uma vez que as porcentagens calculadas são proporcionais à área de cada mineral na superfície da lâmina, métodos como esse permitem determinar as proporções relativas de minerais *por volume*, não por massa. Além disso, a maior parte dos minerais escuros é muito mais densa do que os minerais claros, o que introduz um viés que precisa ser considerado se as proporções do mineral determinadas de acordo com esse método forem comparadas com os resultados de uma análise geoquímica (que são expressos em porcentagem *por massa*).

Se forem interpretados rigorosamente, todos os descritores mostrados na Figura 1.3b refletem as proporções minerais *quantitativas* determinadas segundo o procedimento descrito, que é demorado. Contudo, na maioria das averiguações no dia a dia, esses termos podem ser aplicados com base em uma estimativa visual rápida das proporções de minerais escuros e claros.

O leitor poderá achar útil conhecer as origens de termos como **melanocrático** e **leucocrático**: eles derivam dos radicais gregos *melano-* (“escuro”, como em *melanoma* e *melancolia*), *leuco-* (“de cor clara”, como em *leucócito*, o termo médico que descreve os glóbulos brancos da corrente sanguínea) e *-crático* (“governado por”, como em *democrático* e *autocrático*). O termo **mesocrático**, apesar de contraditório (já que uma rocha não pode apresentar o predomínio de algo classificado entre um mineral claro e um escuro!), aplica-se a rochas com índices de cor no intervalo de 35-65.

³ A Subcomissão para a Sistemática de Rochas Ígneas da IUGS (Le Maitre, 2002) recomenda o uso de microgabro em lugar de dolerito ou diabásio.

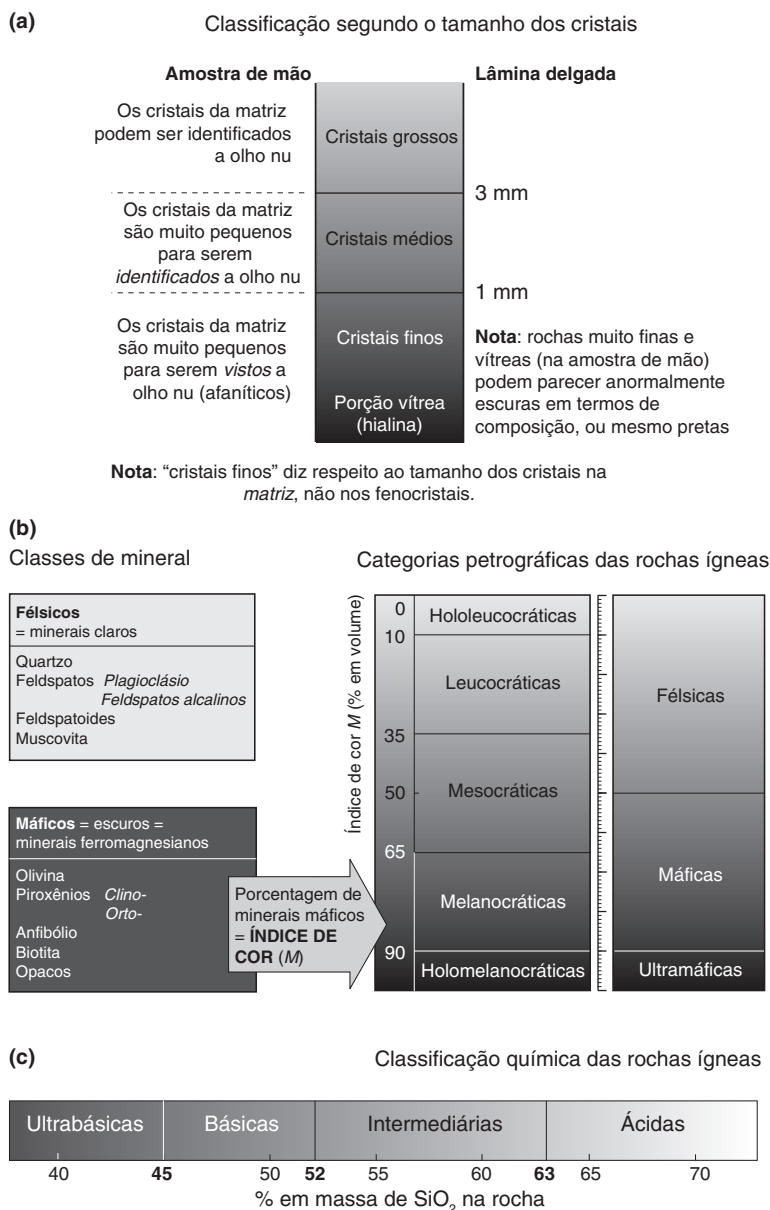


Figura 1.3 Três maneiras simplificadas de classificação das rochas ígneas: (a) por tamanho do grão na matriz. O limite entre granulação média e granulação grossa foi dado em 3 mm, de acordo com Le Maitre (2002); outras convenções (por exemplo, Cox et al., 1988) utilizam o limite de 5 mm; (b) por proporções em volume de minerais claros (félsicos) e escuros (máficos) observados ao microscópio; (c) por conteúdo de sílica (obtido por análise química). O limite entre intermediária e ácida é definido em 63% de SiO₂, em conformidade com Le Maitre (2002); convenções anteriores estipulavam o valor de 65%. Uma análise utilizada para determinar se uma amostra é ultrabásica, básica, intermediária ou ácida deve ser recalculada em base livre de voláteis (ver Quadro 1.3).

A classificação com base na composição química – rochas ácidas e básicas

O primeiro sistema de classificação de rochas ígneas estudado é aquele que as divide em rochas *ultrabásicas*, *básicas*, *intermediárias* e *ácidas*. Essa

classificação é baseada no teor de SiO₂ presente na rocha, como mostra a Figura 1.3c (de acordo com os valores adotados pela União Internacional das Ciências Geológicas, **IUGS**). O teor de SiO₂, o primeiro parâmetro da análise geoquímica mostrado

no Quadro 1.1, é determinado apenas por análise em laboratório. Essa é a principal desvantagem dessa classificação: ela não pode ser empregada para descrever rochas em campo ou no exame ao microscópio.

É importante distinguir corretamente o teor de sílica de uma rocha (que em regra está entre 40 e 75%) e o teor de quartzo (raras vezes acima de 30%, quando não é nulo). A sílica (SiO_2) é um *componente* químico presente em todos os minerais silicatados, ao passo que o quartzo (que tem a mesma composição, SiO_2) é um *mineral* com uma composição e uma estrutura cristalina específicas. O quartzo representa o excesso de SiO_2 , isto é, o teor remanescente após todos os outros minerais silicatados terem sequestrado suas respectivas cotas de sílica disponíveis no líquido magmático.

O termo “silícico”, menos preciso e amplamente adotado nos Estados Unidos, é muito utilizado como sinônimo de “ácido”.

A CONCEPÇÃO DE UMA NOMENCLATURA PETROGRÁFICA PARA ROCHAS ÍGNEAS

O tópico principal inicial deste livro é a nomenclatura de rochas com base em observações petrográficas qualitativas, porque estas são mais relevantes para as aulas práticas e viagens a campo em cursos de graduação.

De modo geral, os nomes de rochas ígneas são compostos por um **nome raiz** (como *basalto*, *andesito* e *traquito*), antecedido por um ou mais **qualificadores** que indicam características de textura e composição que diferenciam a rocha em estudo (por exemplo, *olivina* basalto, *andesito porfirítico* com *fenocristais de plagioclásio* e *traquito afanítico*).

O que é um basalto?

Um célebre dicionário de petrologia define basalto da seguinte forma:

*De acordo com o uso atual, o basalto é uma rocha vulcânica composta essencialmente de labradorita, piroxênio e minério de ferro, com ou sem vidro ou clorita intersticial.*⁴

Embora não deixe dúvida de que se trata de uma definição de basalto, esta tem alguns problemas que precisam ser esclarecidos:

- 1 Tal como vulgarmente conhecido, o termo “vulcânico” (que lembra uma erupção na superfície da Terra) pode, em alguns casos, ser difícil de provar em campo. Ainda que em sua maioria os basaltos sejam, na verdade, os produtos de erupções na superfície, os petrólogos preferem embasar a nomenclatura de rochas ígneas em critérios *descritivos* relacionados à amostra em estudo, independentemente de interpretações feitas em campo. Em outras palavras, uma nomenclatura precisa gerar os subsídios para nomear uma rocha desconhecida encontrada em uma gaveta, sem a necessidade de conhecer a massa rochosa em que foi coletada. A principal característica descritiva que diferencia o basalto do dolerito ou do gabro é que ele é o integrante de *granulação fina* dessa família de rochas. Uma rocha básica de grão fino que integra a borda de resfriamento de um dique (uma rocha hipabissal), ou mesmo de uma inclusão de grande porte (uma rocha plutônica), qualifica-se como um basalto da mesma maneira que um derrame de lava básica. Por outro lado, o núcleo de um derrame espesso de lava básica pode ter granulação média (que o qualifica como dolerito) ou, em casos extremos, granulação grossa, apesar de ter origem vulcânica comprovada.
- 2 “Piroxênio” não é um termo específico o bastante: o piroxênio rico em cálcio característico do basalto (como do dolerito e do gabro) de modo geral é chamado de augita (Quadro 2.1). Os basaltos *podem* também conter um piroxênio com baixo teor de cálcio – a enstatita, nunca desacompanhado de um piroxênio rico naquele elemento. Logo, uma definição precisa de basalto necessita especificar a *augita* (ou o piroxênio rico em cálcio) como piroxênio essencial em sua composição.
- 3 “Labradorita” ($\text{An}_{50}\text{-An}_{70}$, ver Quadro 1.2), por outro lado, é um termo muito restritivo. Em alguns basaltos terrestres e gabros, os núcleos de plagioclásio ficam na faixa mais cálcica da bytownita ($\text{An}_{70}\text{-An}_{90}$), enquanto basaltos lunares contêm até mesmo anortita ($\text{An}_{90}\text{-An}_{100}$). À luz dessa ampla variação de composição de plagioclásios em basaltos naturais, o melhor a fazer é simplesmente estipular “plagioclásio cálcico” (no sentido de qualquer plagioclásio com teores de anortita acima de 50%) como o plagioclásio essencial em um basalto.

⁴ Tomkeieff et al. (1983).

- 4 A expressão “com ou sem vidro intersticial” é uma redundância em uma definição concisa.
- 5 A clorita é um filossilicato hidratado que nunca cristaliza diretamente do magma nem ocorre em rochas ígneas. Quando detectada em uma rocha ígnea, a clorita é sempre um produto **secundário** da **alteração hidrotermal** de minerais ígneos como o piroxênio, ou um constituinte dos veios hidrotermais. Como produto de processos hidrotermais tardios ou metamórficos de baixo grau (ou seja, pós-magmático), afetando apenas alguns basaltos, a clorita não deve ser incluída na definição de uma rocha ígnea.

Uma definição petrográfica mais precisa e sucinta de basalto é:

O basalto é uma rocha ígnea, de granulação fina, formada pelos minerais cálcicos essenciais plagioclásio e augita.

De que modo é possível afirmar o caráter cálcico ou sódico de um plagioclásio ao microscópio? Uma técnica simples para responder a essa pergunta é descrita no Quadro 4.1, mas os detalhes práticos desse procedimento não são discutidos neste ponto do livro.

Os minerais magmáticos “essenciais”, “qualificadores”, “acessórios” e “pós-magmáticos”

A definição de basalto apresentada se fundamenta na presença de dois minerais principais: o piroxênio rico em cálcio e o plagioclásio cálcico. Qualquer rocha ígnea de granulometria fina contendo esses dois minerais pode ser classificada utilizando o termo “basalto” como **nome raiz**. No entanto, os petrólogos dividem o basalto em subgrupos, de acordo com os outros minerais que apresentam. Por exemplo, a ocorrência de olivina em um basalto, além da augita e do plagioclásio cálcico, insere-o em um importante subgrupo, chamado de “olivina basalto”. Porém, nem todos os minerais presentes em uma rocha são úteis a esse propósito. Para dar um nome simples e informativo a uma rocha, é importante considerar os minerais que ela contém com base em quatro conceitos principais:

- 1 **Minerais essenciais**: são os minerais cuja presença na rocha determina seu nome raiz. Por exemplo, a prevalência de plagioclásio cálcico e augita em uma rocha de *granulação grossa* leva, inevitavelmente, ao nome raiz “gabro”. A ausência de um desses minerais essenciais invalidaria esse nome. Se a olivina estivesse presente em lugar

da augita, por exemplo, a rocha seria denominada troctolito (Capítulo 4).

- 2 **Minerais qualificadores**: são os minerais cuja presença não afeta o nome raiz, mas permite a subdivisão qualitativa de um tipo de rocha. Por exemplo, um *olivina gabro* contém olivina, além do plagioclásio cálcico e da augita. Os minerais escolhidos como minerais qualificadores de modo geral dão informações acerca da composição da rocha. Por exemplo, a presença de olivina indica que um gabro é relativamente deficiente em SiO_2 , ao passo que a aegirina em um sianito sugere que ele é **peralcalino**.
- 3 **Minerais acessórios**: são os minerais presentes em uma rocha (muitas vezes em teores reduzidos) que nos dizem pouco sobre suas características químicas. Por essa razão, não contribuem com uma nomenclatura de rochas ígneas. Exemplos de minerais acessórios são a cromita, a magnetita, a apatita e a ilmenita.
- 4 **Minerais pós-magmáticos**: são os minerais formados *após* a cristalização completa do magma:

- Os minerais **hidrotermais**, que preenchem os veios e outros vazios de uma rocha (por exemplo, uma zeolita).
- Os minerais **secundários**, que substituem os minerais originais (por exemplo, um epidoto).

Uma vez que os minerais pós-magmáticos são formados por processos hidrotermais tardios, não ígneos, não desempenham papel algum na nomenclatura. Contudo, devido à possibilidade de que sua formação tenha sido acompanhada por alterações químicas expressivas, a presença desses minerais nunca pode ser desprezada.

Além disso, é preciso lembrar que um mineral considerado essencial em uma rocha pode ser um mineral qualificador em outra, ou um mineral acessório em uma terceira.

A Tabela 1.1 mostra alguns exemplos de minerais essenciais que definem os tipos comuns de rochas vulcânicas, assim como seus principais minerais qualificadores. A tabela é uma simplificação da nomenclatura quantitativa apresentada em Le Maitre (2002). Hoje, o procedimento mais comum, se dispomos da análise química de elementos maiores, consiste em encontrar o nome raiz de uma rocha de granulação fina a partir de sua composição química, conforme representada na Figura 1.4, não com base em critérios petrográficos. Uma vez que a Figura 1.4 foi elaborada

Quadro 1.2 A expressão da composição de um mineral como solução sólida

A olivina e o plagioclásio estão entre os muitos minerais formados por **soluções sólidas**: toda olivina natural é uma mistura – em escala molecular – de dois componentes, Mg_2SiO_4 (a forsterita, comumente abreviada por Fo) e o Fe_2SiO_4 (a faialita, abreviada por Fa).

A Tabela 1.2.1 mostra uma análise simplificada da olivina, expressa em porcentagens em massa de SiO_2 , FeO e MgO (Quadro 1.1). Uma maneira mais concisa de descrever a composição de um mineral com solução sólida toma como base as porcentagens de moléculas de **membro extremo**, nesse

caso o Mg_2SiO_4 e o Fe_2SiO_4 . Para termos uma ideia de como essa descrição é elaborada, antes é preciso reescrever a forma alternativa de cada fórmula, $(MgO)_2(SiO_2)$ e $(FeO)(SiO_2)$. Isso mostra que *uma* molécula de forsterita (Mg_2SiO_4), por exemplo, é composta pela combinação de *duas* moléculas de MgO e *uma* molécula de SiO_2 . Esses cálculos ficam mais fáceis quando a análise original é expressa em números que representem o número de *moléculas* (ou mols) de cada membro extremo presentes, não a massa em *gramas*.

Tabela 1.2.1 Cálculo dos membros extremos em uma análise simplificada de uma olivina

	Análise simplificada da olivina, % em massa ^a	MMR do óxido	Mols disponíveis por 100 g da amostra ^b	Mols alocados a $2FeO.SiO_2$ ^c	Mols alocados ao $2MgO.SiO_2$	Total de mols alocados	Resíduos
SiO_2	39,58	60,09	0,6588	0,1157	0,5414	0,6571	0,0017 ^d
FeO	16,63	71,85	0,2315	0,2315		0,2315	0,0000
MgO	43,66	40,32	1,0828		1,0828	1,0828	0,0000
Total	99,87		1,9731				
		Mols de X_2SiO_4		0,1157	0,5414	0,6571	
		% molar de Fa e Fo		17,61%	82,39%	100,00	

^a “% de massa de óxido” pode ser vista como *gramas de cada óxido por 100 g da amostra*.

^b Cada número da coluna 1 dividido pela MMR correspondente na coluna 2 dá o número de *mols por 100 g da amostra*.

^c Se n mols de FeO estão disponíveis, eles se combinam com $0,5n$ mols de SiO_2 para formar $0,5n$ mols de faialita.

^d O pequeno excesso de SiO_2 (que totaliza 1 parte em 400 partes do SiO_2 disponível) pode representar o erro analítico ou o fato de que pequenas quantidades de CaO e MnO presentes na análise original foram negligenciadas na versão simplificada acima.

com base em uma grande compilação de rochas vulcânicas muito bem caracterizadas do ponto de vista petrográfico (Le Maitre, 2002), para a maioria delas a correlação entre a nomenclatura petrográfica e a nomenclatura química é consistente.

O leitor que tentar memorizar nomes raiz e suas definições não encontrará dificuldade em reduzir as definições dadas na Tabela 1.1 a um código simplificado. Por exemplo, um nefelinito pode ser representado por “cpx+ne”. Uma rocha equivalente, com granulação grossa (por exemplo, um ijolito, Tabela 9.3) é representada pelo mesmo código escrito em letras maiúsculas.

A concepção de um nome petrográfico completo

A hierarquia dos minerais constitui a base para atribuir nomes petrográficos para todas as rochas ígneas. Ela permite conceber nomes informativos, como

*olivina gabro, hornblenda andesito e muscovita biotita microgranito**. Em cada um desses nomes compostos, um **nome raiz** é precedido por um ou mais **qualificadores**. Os qualificadores mais importantes indicam os minerais qualificadores presentes (que, com frequência, dão indícios sobre a composição do magma). A forma geral do nome petrográfico de rocha é:

(*mineral qualificador 3*) (*mineral qualificador 2*) (*mineral qualificador 1*)... nome raiz

* N. de R.T: Na atribuição de nomes petrográficos para rochas ígneas, o mais usual é a inserção de hífens entre os minerais qualificadores de uma rocha, se houver mais de um e se cada um deles contribuir com mais de 5% da mineralogia observada. Assim, um microgranito hipotético contendo 6% de muscovita e 8% de biotita será denominado muscovita-biotita microgranito. O mineral qualificador mais abundante será listado sempre por último, de forma a ficar mais próximo do nome da rocha, assim como recomendado neste livro. Observe, no entanto, que não há hífen entre o último mineral listado (o qualificador mais abundante) e o nome da rocha.

Essa transformação é conseguida dividindo a porcentagem em massa de cada óxido (% em massa = *massa em g de cada óxido por 100 g de olivina*) na coluna 1 pela massa molecular relativa (“MMR” na coluna 2). O resultado, exibido na coluna 3, representa o número de *mols de cada óxido por 100 g de olivina*. O número de mols de FeO (0,2315) pode ser combinado com o número de mols de SiO₂ (0,2315 ÷ 2 = 0,1157 mols) para dar o número de mols de (FeO)₂SiO₂ (0,1157 mols, ver a tabela). Da mesma forma, 1,0828 mols de MgO podem ser combinados com 1,0828 mols ÷ 2 = 0,5414 mols de SiO₂ para formar 0,5414 mols de (MgO)SiO₂. A divisão de cada um desses números pela sua soma (0,6571) e multiplicação por 100 dá a *porcentagem molar* de cada **membro extremo** nessa amostra de olivina. O resultado mostrado na tabela pode ser reescrito na forma reduzida Fo₈₂, a maneira mais concisa de expressar a composição de uma olivina.

Cálculos semelhantes permitem expressar as composições de plagioclásios em termos de porcentagem molar da molécula de anortita (por exemplo, An₅₆ para um plagioclásio com porcentagens molares de 56% de An e 44% de Ab). Os nomes a seguir são amplamente empregados para variações específicas de composição:

Anortita	An ₁₀₀ –An ₉₀ (também se refere ao membro extremo puro CaAl ₂ Si ₂ O ₈)
Bytownita	An ₉₀ –An ₇₀
Labradorita	An ₇₀ –An ₅₀
Andesina	An ₅₀ –An ₃₀
Oligoclásio	An ₃₀ –An ₁₀
Albita	An ₁₀ –An ₀ (também se refere ao membro extremo puro NaAlSi ₃ O ₈).

Nos piroxênios, a solução sólida é mais complexa, pois a representação da composição de um piroxênio requer *três* membros extremos: Mg₂Si₂O₆, Fe₂Si₂O₆ e Ca₂Si₂O₆ (conforme explicação no Quadro 2.1). A presença de pequenas quantidades de Al₂O₃ e TiO₂ na maioria dos piroxênios naturais complica um pouco o cálculo, mas para nossos objetivos essas dificuldades podem ser ignoradas. A composição de uma granada é ainda mais intrincada, pois exige *seis* membros extremos (Quadro 5.2). Esses “cálculos com fórmulas” são explicados em detalhe em Gill (1996, Capítulo 8).

Observe que a convenção (Le Maitre 2002) diz que, se diversos minerais qualificadores são listados em um nome de rocha, o mais abundante é listado por último (isto é, o mais próximo do nome raiz). Portanto, um granito contendo mais biotita do que muscovita seria chamado de *muscovita-biotita granito*, não biotita muscovita granito. A lógica nessa convenção é que a muscovita atua como qualificador menos importante, indicando o tipo de *biotita granito* que temos em mãos.

A decisão acerca de quais minerais devem ser rotulados como minerais qualificadores envolve um julgamento de natureza petrográfica. A experiência, em conjunto com os dados apresentados na Tabela 1.1, indica os minerais que têm importância na definição da composição de uma rocha ígnea, em cada caso. Porém, uma regra é válida em todas as circunstâncias: nenhum mineral com status de essencial em uma dada rocha (indispensável na determinação do

nome raiz) pode entrar na classificação dela como mineral qualificador. Um *augita basalto*, por exemplo, seria uma redundância, já que a presença de augita é condição essencial para que uma rocha possa ser chamada de basalto e, por essa razão, o termo não precisa fazer parte da designação.

Contudo, no caso de um andesito, em que o mineral máfico pode ser a augita, um piroxênio pobre em cálcio, uma hornblenda e/ou uma biotita (Tabela 1.1), *seria* apropriado especificar a augita como o mineral qualificador. Enquanto hornblendas e biotitas são características em magmas andesíticos mais **evoluídos**, hidratados e de temperatura baixa, o termo *augita andesito* indica um magma andesítico relativamente **primitivo**, anidro ou de temperatura alta.

A inclusão de minerais qualificadores no nome de uma rocha fornece elementos qualitativos úteis (além dos dados informados pelo nome raiz ape-

Tabela 1.1 Nomes raiz e minerais essenciais à identificação petrográfica das principais rochas ígneas de granulação fina. As porcentagens especificadas representam estimativas de % em volume que podem ser baseadas na avaliação qualitativa visual de uma lâmina delgada. Alguns minerais mencionados podem ser desconhecidos ao leitor neste estágio (por exemplo, um **feldspatoide**) e serão apresentados em capítulos subsequentes. LCP = piroxênio com baixo teor de cálcio que inclui a enstatita e a pigeonita (ver Quadro 2.1), plag = plagioclásio, plag cálcico = An_{50-100} , plag sódico = An_{0-50} , foid = **feldspatoide**

Nome raiz	Minerais essenciais necessários	Possíveis minerais qualificadores
Basalto	Augita + plag cálcico	Olivina, LCP (\rightarrow basalto toleítico ¹ , pouca nefelina (+ olivina \rightarrow basalto alcalino ¹))
Basanito	Augita + plag cálcico + foid (>10%) + olivina (>10%)	Nefelina, leucita ou analcita (de acordo com o foid dominante)
Tefrito	Augita + plag cálcico + foid (>10%) (olivina <10%)	Nefelina, leucita ou analcita (de acordo com o foid dominante)
Nefelinita	Augita + nefelina	Olivina, melilita
Leucitita	Augita + leucita	Olivina, melilita
Traquibasalto	Plag cálcico + augita + feldspato alcalino <i>ou</i> foid	
Andesito	Plag sódico ² + um mineral máfico (piroxênio, hornblenda <i>ou</i> biotita)	Piroxênio, hornblenda ou biotita, dependendo do mineral máfico dominante presente na rocha
Latito	Plag sódico + feldspato alcalino	Quartzo (<20%)
Traquito	Feldspato alcalino ³ \pm plag sódico	Quartzo (<20%), foid (<10%), aegirina-augita, biotita
Fonolito	Feldspato alcalino ³ \pm plag sódico + foid (>10%)	Aegirina, riebeckita, biotita; é comum especificar também o foid dominante, quando não é a nefelina (p. ex., “leucita fonolito)
Dacito	Plag sódico ⁴ + feldspato alcalino + quartzo (>20%)	Hornblenda, biotita
Riolito	Feldspato alcalino ³ \pm plag sódico + quartzo (>20%)	Biotita, aegirina

¹ Esses tipos de basalto geralmente são diferenciados segundo critérios químicos, não mineralógicos. Os conceitos usados nessa diferenciação são explicados no Capítulo 2 (Quadro 2.4).

² Fenocristais de plagioclásio, abundantes na maioria das andesitos, muitas vezes encontram-se zonados com núcleos cálcicos; contudo, a composição *média* em feldspatos é $An < 50$.

³ O feldspato alcalino excede o plagioclásio.

⁴ Em regra, os riolitos apresentam matriz vítrea.

nas) sobre a composição química do magma de que ela cristalizou, como ficará claro em capítulos posteriores. Os minerais qualificadores permitem ao petrólogo diferenciar rochas de tipos semelhantes. O mesmo é válido para diversos outros tipos de qualificadores que possam ser úteis em dada circunstância e que informem sobre processos eruptivos e o histórico de cristalização de uma rocha.

- Talvez seja importante salientar as características texturais em um nome de rocha se, por exemplo, as diferenças de textura observadas permitirem discriminar dois subgrupos: as condições de erupção ou os históricos de cristalização podem ser semelhantes para representantes de uma

mesma massa de magma, mas diferentes das condições e do histórico de outra.

- Termos qualificadores de textura, como **vesicular**, **porfirítica**, **seriada**, **esferulítica**, **soldada**, **ofítica** e **poiquilítica** fornecem informações sobre os processos em pequena escala do magma ou sobre as condições de cristalização.
- A identidade dos fenocristais deve ser informada pelo acréscimo do adjetivo “porfirítico”, seguido do complemento “com fenocristais de”. Por exemplo, um andesito contendo fenocristais de plagioclásio imersos em uma matriz com hornblenda será chamado de *hornblenda andesito porfirítico com fenocristais de plagioclásio*. Observe que, embora a presença de plagioclásio já esteja

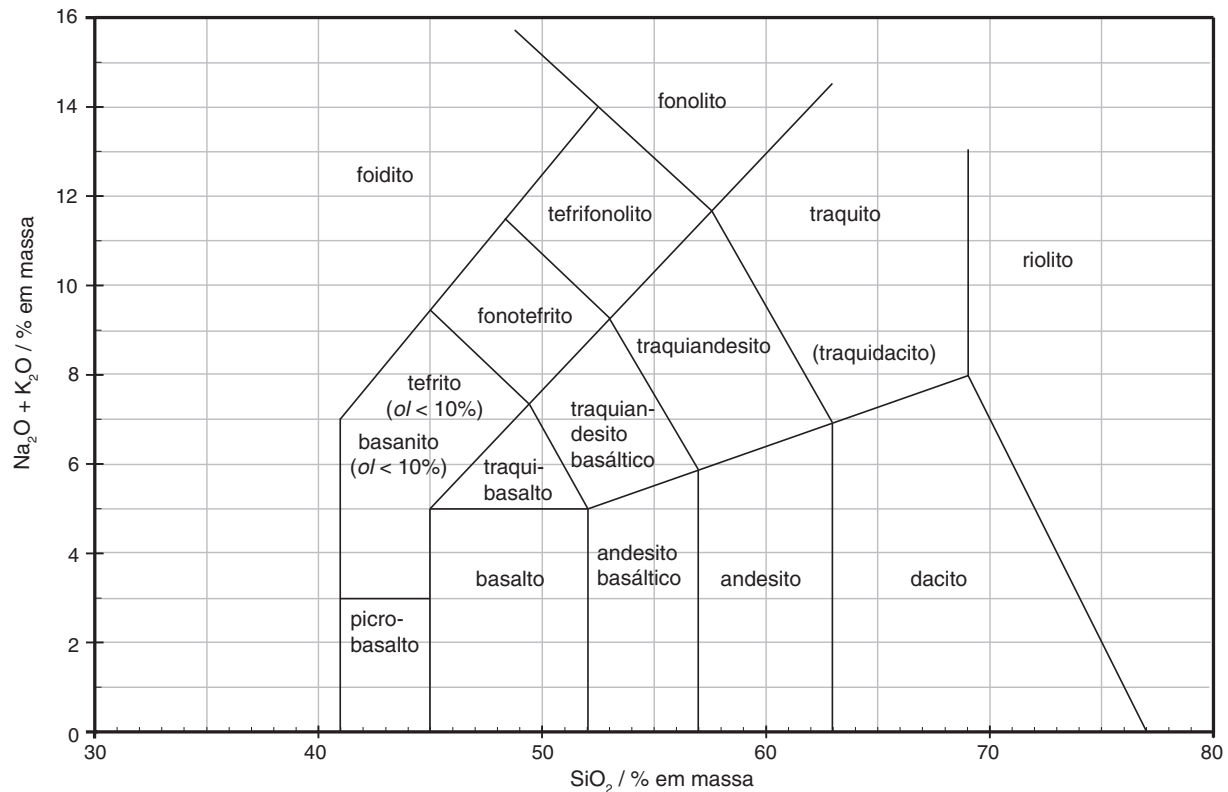


Figura 1.4 Diagrama TAS mostrando os campos para os tipos de rochas comuns designados pela Subcomissão para a Sistemática de Rochas Ígneas da IUGS (Le Maitre, 2002). * Todas as análises exigem uma correção em base livre de voláteis (Quadro 1.3) antes da elaboração do diagrama.

* O símbolo "ol" representa o teor de olivina **normativa** (explicado no Quadro 2.4). As composições de rocha no campo do traquito podem receber o nome de traquidacito se o teor de quartzo representar mais do que 20% do total de minerais félsicos **normativos** (quartzo + feldspatos). Esses detalhes não são discutidos neste capítulo.

implícita na simples atribuição do nome andesito, o fato de ele ocorrer como fenocristais precisa ser destacado no nome da rocha.

- Como mostra a Figura 1.1, a identidade dos fenocristais em uma rocha vulcânica é fonte de informações sobre os minerais que cristalizaram antes da erupção (por exemplo, em uma câmara magmática subvulcânica).
- Os petrólogos também utilizam uma variedade de termos qualificadores químicos (por exemplo, teor baixo ou alto de K, peralcalino, peraluminoso) para refinar nomes de rochas específicas. Esses parâmetros químicos são descritos na próxima seção.

A SUBDIVISÃO QUÍMICA DE ROCHAS ÍGNEAS E MAGMAS

Existem circunstâncias em que a nomenclatura petrográfica fundamentada na microscopia de pola-

rização não basta para descrever uma rocha, como ocorre com uma rocha que contém uma quantidade significativa de vidro. Por exemplo, a maioria dos basaltos submarinos apresenta pequenas quantidades de cristais de olivina e de plagioclásio (cristais de augita são raros) imersos em uma matriz vítrea. O vidro vulcânico representa um líquido magmático que, por alguma razão (resfriamento rápido, por exemplo) não teve tempo suficiente para cristalizar. Por essa razão, uma porção dos componentes químicos que *teriam cristalizado* (sob diferentes condições) formando cristais minerais reconhecíveis – nos quais um nome petrográfico se embasaria – são retidos na fase vítrea, cuja composição não pode ser estabelecida ao microscópio. Para essa rocha, ou uma rocha cujos cristais da matriz são muito finos para serem identificados por microscopia, o nome de rocha precisa ser atribuído tomando como base uma análise geoquímica.

Não causa surpresa o fato de a composição mineralógica de uma rocha, em que a nomenclatura petrográfica é baseada, ter forte correlação com sua composição química. Logo, como alternativa para atribuir nomes raiz, é possível representar as divisões entre os tipos petrográficos das rochas discutidas (mostrados na Tabela 1.1) em diagramas apropriados de variação de elementos maiores. A Figura 1.4 mostra um diagrama TAS em que uma grade de campos classificatórios e linhas limite foi construída de acordo com as recomendações da União Internacional das Ciências Geológicas (Le Maitre, 2002). As linhas limite foram traçadas empiricamente, de maneira a permitir a sobreposição mais exata possível da distribuição de minerais de um grande conjunto de amostras de rocha identificadas pela via petrográfica (ver Le Maitre, 1976). Ao representar informações nesse tipo de diagrama, é importante garantir que elas tenham sido re-

calculadas em base livre de voláteis, para eliminar ao máximo distorções resultantes de alteração ou intemperismo (Quadro 1.3).

Entretanto, é preciso esclarecer duas restrições. A primeira é que a correlação entre mineralogia e composição química não é perfeita e, portanto, um nome raiz concebido com base na Figura 1.4 para uma rocha cristalina pode, em alguns casos, diferir de seu nome petrográfico. Logo, um nome de rocha deve ser gerado com base em critérios petrográficos, sempre que possível. A segunda restrição diz respeito ao fato de os metais alcalinos Na e K estarem entre os elementos mais **móveis** nos processos hidrotermais pós-magmáticos e, por isso, suas concentrações podem variar durante tais processos de alteração (Quadro 1.4). Isso limita a confiabilidade da Figura 1.4, mesmo após as análises terem sido refeitas em base livre de voláteis (Quadro 1.3).

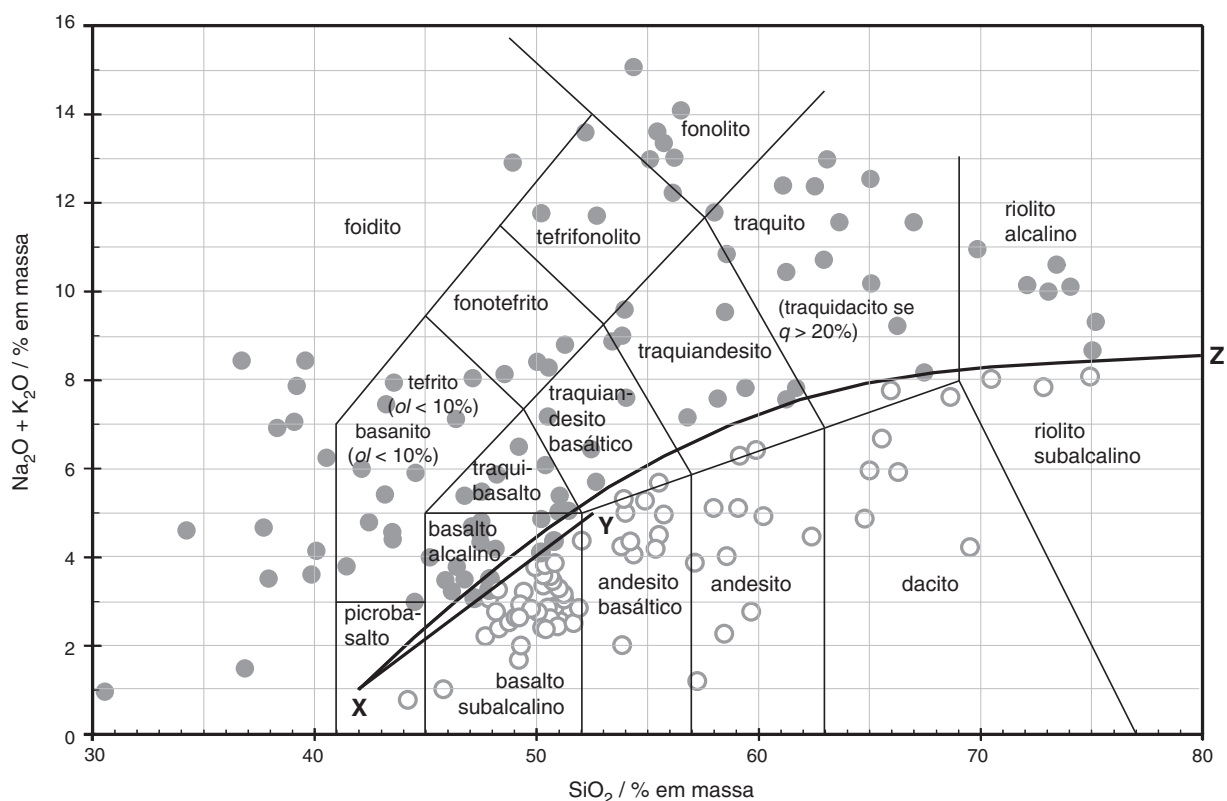


Figura 1.5 Diagrama TAS mostrando as divisões entre as séries **subalcalinas** e **alcalinas** de rochas vulcânicas: a linha X-Y representa a linha de divisão de Macdonald e Katsura (1964) para basaltos havaianos, e a linha X-Z mostra a linha de divisão de Miyashiro (1978) para uma gama mais ampla de rochas vulcânicas. Os basaltos próximos a essas linhas limite são muitas vezes denominados basaltos **transicionais**. A figura também apresenta o conjunto de rochas vulcânicas mostrado na Figura 1.2: os círculos vazios representam as análises de afinidade subalcalina, os preenchidos indicam as análises de afinidade alcalina. A correção em base livre de voláteis (Quadro 1.3) é necessária antes da elaboração deste diagrama.

Essa abordagem química não é utilizada na nomenclatura de rochas de granulação grossa, porque os minerais essenciais e qualificadores geralmente estão presentes em cristais grandes o bastante para poderem ser identificados com facilidade ao microscópio, ou mesmo em uma amostra de mão (Tabela 8.1). É preciso lembrar que a

separação mecânica e a acumulação seletiva de diferentes tipos de cristais, passíveis de ocorrerem durante uma cristalização lenta (que leve à formação de rochas **cumuláticas**, conforme discutido no Quadro 1.4), indicam que a composição química de uma rocha plutônica depende das proporções dos minerais acumulados em seu interior. Essa

Quadro 1.3 Por que recalcular as análises de uma rocha vulcânica em base livre de voláteis?

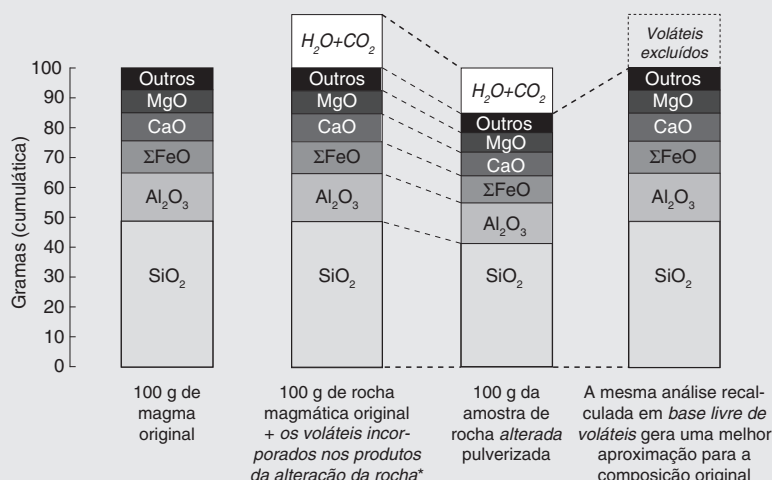
Embora os líquidos magmáticos ígneos nas profundezas conttenham teores significativos de H_2O , CO_2 , SO_2 e outros gases primários dissolvidos, tais constituintes voláteis são efetivamente perdidos para a atmosfera quando o material chega à superfície durante a erupção. Os teores de H_2O e de outros voláteis mensurados em rochas vulcânicas naturais representam, sobretudo, a presença de minerais hidratados resultantes da alteração hidrotermal inicial ou do intemperismo e refletem as mudanças pós-magmáticas na mineralogia da rocha, não a composição química original do magma.

Por conta das razões discutidas no Quadro 1.4, durante o trabalho em campo é essencial que o material coletado para as análises geoquímicas seja sempre o mais inalterado (ou o mais fresco) possível. Mesmo com esse esforço, em uma coleta representativa de rochas vulcânicas algumas amostras inevitavelmente parecem mais alteradas do que outras.

Em uma análise percentual, a presença de voláteis secundários reduz os teores de outros constituintes (Figura 1.3.1), o que faz surgir diferenças entre amostras individuais que se devem meramente às discrepâncias no grau de alteração dessas rochas. Portanto, embora a análise de elementos maiores sempre inclua uma estimativa do teor de voláteis totais (por exemplo, a determinação da **perda ao fogo**) como meio de observar a alteração, é comum recalcular as análises em base livre de voláteis antes da elaboração do diagrama de dados geoquímicos de rochas vulcânicas. Isso é feito com a multiplicação da concentração de cada elemento ou óxido pelo fator:

$$\frac{\text{Análise total (\%)}}{\text{Análise total (\%) - voláteis (\%)}}$$

O raciocínio que fundamenta esse cálculo é explicado na Figura 1.3.1.



*Nota: outros elementos podem ser introduzidos ou excluídos durante uma alteração na rocha.

Figura 1.3.1 A justificativa para refazer uma análise em base livre de voláteis antes da elaboração do diagrama TAS.

composição química da rocha pode estar apenas indiretamente relacionada à composição química do magma a partir do qual ela cristalizou.

Os qualificadores geoquímicos

A Figura 1.4 mostra como a composição geoquímica de uma rocha vulcânica pode ser útil na atribuição de um nome raiz (em que a determinação de um nome petrográfico seria complexa). A geoquímica de uma rocha também fornece alguns qualificadores que permitem subdividir aqueles tipos de rocha oriundos de magmas com diversas fontes. Por muitos anos, os basaltos foram divididos nos subgrupos **alcalinos** e **subalcalinos**. Diversos critérios foram concebidos para essa finalidade; os mais simples são mostrados na Figura 1.5. A linha XY é a linha limite desenhada

por Macdonald e Katsura (1964), dividindo os basaltos subalcalinos formadores da maior parte do Havái (incluindo os vulcões em escudo, como o Kilauea) daqueles basaltos alcalinos que extrudiram nos estágios mais recentes do desenvolvimento vulcânico. Para mostrar como esse critério é aplicado, as análises apresentadas na Figura 1.2 foram reproduzidas na Figura 1.5, em que os basaltos são representados como alcalinos ou subalcalinos, de acordo com a classificação proposta por Macdonald e Katsura.

Há muito que os petrólogos reconhecem que os basaltos subalcalinos tendem a se fracionar (evoluir) em líquidos magmáticos evoluídos e pobres em álcalis, como o dacito e o riolito, enquanto os basaltos alcalinos fracionam-se em líquidos magmáticos evoluídos mais ricos em álcalis, como o traquito ou

Quadro 1.4 A análise de uma rocha ígnea representa a composição do magma?

Na busca pelas origens dos magmas e pelas condições sob as quais se formaram, as análises de elementos maiores, de elementos-traço e de isótopos em rochas *vulcânicas* ocupam um lugar de destaque. A principal hipótese que norteia esse esforço é a de que essas análises são uma representação precisa das composições químicas dos magmas a partir dos quais essas rochas cristalizaram. Porém, até que ponto essa hipótese pode ser aceita? Quais são os fatores que limitam sua aplicação?

A DESGASEIFICAÇÃO E A LIBERAÇÃO DE VOLÁTEIS

O magma confinado em profundidade na Terra contém gases dissolvidos no líquido magmático. À medida que a pressão diminui com a ascensão desse magma à superfície, esses gases gradativamente se desprendem da solução, formando bolhas de gás (muitas vezes visíveis como **vesículas** em lavas eruptivas), que escapam para a atmosfera (Figura 2.7). Esse processo de desgaseificação (perda de gases) é comum a todos os magmas confinados em câmaras situadas a baixa profundidade ou que irromperam na superfície. Com isso, o teor de voláteis medido em uma amostra de rocha vulcânica recém-formada muitas vezes é menor do que o teor originalmente dissolvido no líquido magmático, em profundidade.

Assim, de que maneira determinamos os teores reais de voláteis “magmáticos” presentes antes da

erupção em rochas vulcânicas eruptivas? Uma das abordagens usadas com essa finalidade consiste em analisar o teor de voláteis de *inclusões vítreas* pequenas (muitas vezes chamadas informalmente de **inclusões de líquido magmático**, porque representam um líquido magmático aprisionado, ainda que o material já não esteja nesse estado físico) no interior de fenocristais individuais, como mostra a Prancha 6.11. A tensão no cristal circundante atua como uma espécie de armadura para a inclusão de líquido magmático contra a ruptura e a perda de gases durante a ascensão do magma à superfície. A microanálise do teor de voláteis aprisionados nessas inclusões vítreas representa a melhor medida do teor de voláteis presentes no líquido magmático não desgaseificado (ver Hammer, 2006).

A ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL E O METAMORFISMO DE BAIXO GRAU

Os minerais anidros formados nas temperaturas de liquefação do magma, como a olivina e o plagioclásio, estão propensos a reagir e recrystalizar na forma de minerais hidratados **secundários**, como a **esmectita**, a serpentina, a clorita e o epidoto. Isso ocorre quando esses minerais são expostos a fluidos hidratados a baixas temperaturas durante o resfriamento (por exemplo, quando os fluidos circulam por uma sequência vulcânica espessa). Portanto, a análise de uma rocha vulcânica que tenha passado por esse tipo de alteração ou reações metamórficas

o fonolito. Logo, é apropriado não apenas dividir os basaltos nas classes alcalina e subalcalina, mas também aplicar a mesma distinção a suas respectivas famílias de líquidos magmáticos residuais. Com essa finalidade, Miyashiro (1978) calculou uma linha divisória, a curva XZ apresentada na Figura 1.5. As composições de líquidos magmáticos mais evoluídos exibidas na Figura 1.5 também são simbolizadas de acordo com o lado da linha em que se encontram.

A divisão simples em campos alcalino e subalcalino da Figura 1.5, em parte segundo a linha definida por Miyashiro, não é um mero artifício de nomenclatura; ela reflete uma distinção profunda de natureza petrológica, conforme explicado no Capítulo 9. Portanto, não é por acaso que a curva XZ esteja próxima às linhas limite estipuladas pela IUGS entre o

traquiandesito basáltico e o andesito basáltico, entre o traquiandesito e o andesito e entre o traquito e o dacito. A mesma curva também divide o campo em que se encontram os riolitos em campos menores, definindo variedades subalcalinas e alcalinas típicas de diferentes ambientes tectônicos.

Um diagrama semelhante muito utilizado para subdividir rochas vulcânicas associadas à subducção é mostrado na Figura 1.6. Em muitos arcos de ilhas, o teor de potássio em rochas vulcânicas aumenta de modo sistemático com a distância do sítio eruptivo em relação à fossa ou, para sermos mais precisos, com a profundidade da zona de subducção abaixo do ponto de erupção. Nesse sentido, é necessária uma nomenclatura que reflita essas variações e, portanto, os basaltos, os andesitos e os

de baixo grau apresenta níveis elevados de H_2O e outras espécies voláteis, introduzidas por essas reações pós-magmáticas, mas sem relação com o teor original de voláteis no magma. Esse teor de voláteis secundários não pode ser desprezado (ver Quadro 1.3), embora seja muito mais difícil de corrigir para qualquer alteração nos teores de elementos relativamente não voláteis como o Na_2O , o K_2O e o CaO , os quais podem ter participado dessas reações. Por essa razão, a investigação geoquímica precisa ser fundamentada em amostras inalteradas cujos teores desses minerais pós-magmáticos ao microscópio sejam negligenciáveis.

A ACUMULAÇÃO DE CRISTAIS

Em câmaras magmáticas localizadas em grandes profundidades, onde o resfriamento é lento, os cristais podem afundar ou flutuar no líquido magmático, dependendo da densidade e do tamanho que apresentam. Podem também formar depósitos em que um mineral (ou mais de um) é concentrado de modo seletivo em horizontes específicos. Alternativamente, um determinado tipo de cristal pode formar núcleos de maneira mais eficiente no fundo e nas paredes da câmara, comparado a outros minerais, e portanto se concentrar também de maneira seletiva nesse local. A existência desses processos de acumulação seletiva, que transcorrem em diversas escalas, significa que a composição de uma amostra de mão de uma rocha plutônica não reflete com precisão a composição do líquido magmático de que ela cristalizou. Além disso, as acu-

mulações de cristais precoces têm razões Mg/Fe (no caso de minerais ferromagnesianos) ou Ca/Na (em plagioclásios) geralmente elevadas, comparadas às do líquido magmático de que se separaram (ver a Figura 3.4).

Embora os efeitos mais importantes dos processos de acumulação de cristais sejam vistos em intrusões estratificadas de grande porte (Capítulo 4), esses processos também são observados em intrusões menores ou mesmo em derrames de lava espessos (Capítulo 2). Ao passo que a formação de minerais em rochas vulcânicas pode ser governada pela composição química do magma, em rochas plutônicas nas quais houve a separação de cristais vale o oposto: a composição química da rocha total é em parte o resultado dos minerais presentes e das proporções em que estão combinados.

OS XENOCRISTAIS E OS XENÓLITOS

Muitas rochas ígneas contêm materiais estranhos na forma de **xenólitos** (Figura 5.3), arrancados das paredes do conduto durante a ascensão do magma ou presentes em um estado desagregado como *xenocristais* individualizados. Uma análise integral da rocha encaixante não gerará uma representação confiável da composição do magma encaixante, a menos que essa matéria externa tenha sido selecionada com cuidado durante a preparação da amostra. Mesmo que corpos estranhos visíveis tenham sido removidos, a análise sofrerá um viés causado pela troca química entre magma e xenólitos, sobretudo em rochas encaixantes plutônicas esfriadas.

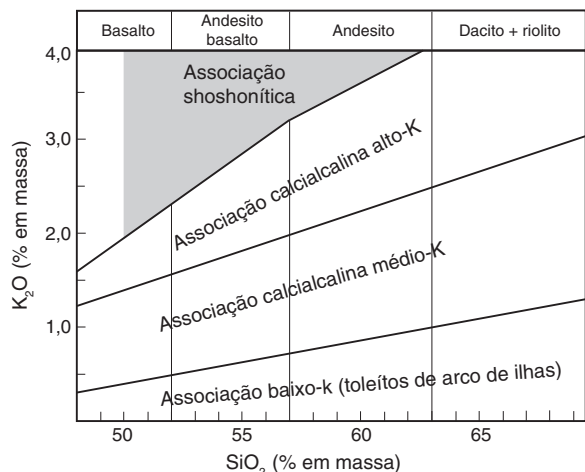


Figura 1.6 Diagrama K_2O vs. SiO_2 mostrando as linhas limite usadas para subdividir rochas vulcânicas associadas à subducção. As análises exigem uma correção para base livre de voláteis (Quadro 1.3) antes da elaboração do gráfico. As linhas limite mostradas são aquelas definidas por Le Maitre (2002), exceto a linha que separa a associação shoshonítica, elaborada por Peccerillo e Taylor (1976).

dacitos associados à subducção são muitas vezes atribuídos às séries magmáticas baixo-K, médio-K e alto-K. Essas divisões não são válidas para rochas vulcânicas do interior de placas tectônicas ou em margens divergentes.

Os demais exemplos de como os qualificadores geoquímicos são utilizados para refinar a nomenclatura de rochas são discutidos nos capítulos seguintes (ver, por exemplo, as Figuras 6.8b e c, 8.14, 8.19, 9.8.1 e 9.24).

REVISÃO

O estudo de rochas ígneas tem muito em comum com o aprendizado de um novo idioma. O sucesso depende de três aspectos essenciais:

- O vocabulário – aprender um conjunto de palavras novas, tanto *substantivos* (os nomes das rochas) quanto *adjetivos* (os qualificadores texturais, mineralógicos e geoquímicos).
- A gramática – aprender as regras, as convenções e a estrutura (tal como definidas em Le Maitre, 2002, por exemplo) em que essas descrições precisas se apoiam.
- Muita prática, que permite ao estudante conquistar a confiança e a fluência de que precisa, gradativamente (ver os exercícios abaixo).

Este capítulo apresentou a sintaxe básica sobre a qual se fundamenta a “linguagem” petrográfica da nomenclatura de rochas ígneas. Vimos que a variação composicional do magma natural retratada nas análises de rochas vulcânicas coletadas em diferentes locais é descrita essencialmente por um continuum. Quando linhas retas são traçadas em um diagrama, como o mostrado na Figura 1.4, para definir o domínio de cada nome de rocha, é preciso lembrar que, tal qual a cerca em um campo, a posição dessas retas é arbitrada de acordo com a conveniência e a convenção em vigor, não com base em variações bruscas na composição do magma. Assim como essas cercas são deslocadas e as acepções de uma palavra podem variar com o tempo, também os limites petrográficos mudam de posição à medida que se refinam os aspectos definidores de uma nomenclatura, resultado dos esforços da pesquisa sobre rochas ígneas. Por exemplo, as linhas limite mostradas na Figura 1.6 têm posições ligeiramente diferentes, dependendo do estudo publicado. Isso ressalta o caráter arbitrário das linhas limite mostradas na Figura 1.4 sem afetar sua validade.

Por outro lado, a ampla divisão de basaltos e dos produtos de seu fracionamento nos domínios alcalino e subalcalino mostrada na Figura 1.5 representa um limite petrológico fundamental que dirige o curso da evolução do líquido magmático, conforme discutido em detalhe no Capítulo 9.

Expressões como “de granulação fina”, “melanocrático” e “ultrabásico” são respaldadas por uma variedade de observações quantitativas e qualitativas de uma rocha.

Para esclarecer os princípios básicos de uma nomenclatura de rochas ígneas, os minerais presentes em uma rocha ígnea são separados (neste livro) em quatro categorias conceituais: os minerais essenciais (as quais determinam o nome raiz da rocha, como na Tabela 1.1), os minerais qualificadores, os acessórios e os pós-magmáticos. Essa classificação é um mero artifício que permite codificar, ou colocar em termos explícitos, uma abordagem que todo petrólogo utiliza tacitamente na concepção de nomes para rochas ígneas.

EXERCÍCIOS

- 1.1 Uma lâmina delgada de uma rocha ígnea contém fenocristais cujo tamanho varia entre 2 e 6 mm, e uma matriz composta por cristais menores do que 0,05 mm. Essa rocha deve ser classificada como apresentando granulação fina, média ou grossa?

- 1.2 Uma amostra de rocha de granulação grossa consiste em 40% de augita (SiO_2 51,3%), 55% de enstatita (SiO_2 50,9%) e 5% de plagioclásio (SiO_2 55,1%). Quais dos adjetivos abaixo podem ser utilizados para descrever essa rocha? (a) ultrabásica, (b) ultramáfica, (c) melanocrática ou (d) holomelanocrática? Justifique sua escolha.
- 1.3 Determine os nomes apropriados para rochas vulcânicas que apresentam as composições apresentadas na tabela abaixo (dadas em base livre de voláteis):

	A	B	C
SiO_2	48,30	56,29	55,59
TiO_2	1,94	0,95	0,54
Al_2O_3	14,32	16,97	18,44
$\Sigma\text{Fe}_2\text{O}_3$	10,45	8,09	8,09
MnO	0,15	0,13	0,27
MgO	10,00	3,83	0,57
CaO	9,50	8,02	2,64
Na_2O	3,20	2,52	7,96
K_2O	1,05	2,80	5,57
P_2O_5	0,39	0,40	0,33

- 1.4 Utilizando a Tabela 1.1, encontre os nomes adequados de rocha (nomes raiz e os qualificadores necessários) para rochas ígneas de granulação fina compostas pelos seguintes minerais:
- (i) feldspato alcalino + baixo teor de plagioclásio sódico + baixo teor de biotita;
 - (ii) plagioclásio cálcico + augita + nefelina (>10%);
 - (iii) plagioclásio cálcico + feldspato alcalino (em teores aproximadamente iguais) + baixo teor de quartzo;
 - (iv) nefelina + augita + baixo teor de olivina;
 - (v) plagioclásio sódico + hornblenda (sem quartzo).