

INTEMPERISMO E PEDOGÊNESE 7

Maria Cristina Motta de Toledo

7.1 Introdução

7.2 Perfil de alteração e de solo

7.3 Intemperismo

7.3.1 Intemperismo Físico

7.4 Controles do intemperismo

7.5 Pedogênese

7.5.1 Características do *solum*

7.5.2 Solos brasileiros

7.6 Minerais primários e supérgenos comuns e os elementos químicos envolvidos

7.7 O intemperismo e o ciclo geológico global

Referências

7.1 Introdução

A Terra é um planeta “rochoso”, analogamente a Mercúrio, Vênus e Marte, assim como a Lua e os asteroides do cinturão entre Marte e Júpiter; ou seja, é constituída primordialmente por “rochas”, no sentido de material consolidado, resistente e formado em grande parte por minerais silicáticos. Podemos dizer que a Terra é uma “grande pedra”! Mas, ao contemplar a superfície do planeta, não são apenas rochas que observamos; a maior parte da superfície está exposta ao ar, ao Sol, à água e aos seres vivos, e é composta por materiais friáveis, isto é, que se desagregam facilmente, de aspecto “terroso”.

Esses materiais, a que genericamente podemos chamar **solo**, são materiais que se originaram das rochas, por desagregação e decomposição (**intemperismo**), depois por reorganização (**pedogênese**) e, conforme o caso, também por erosão, transporte e sedimentação (processos vistos no Tópico **Sedimentos e Rochas Sedimentares**). Todos esses materiais inconsolidados, incoerentes, representam a ligação entre a vida e a litosfera, pois é a partir dos elementos químicos liberados na água e nos solos, por meio da decomposição das rochas, que a vida pode nutrir-se; daí a importância do intemperismo químico no estudo do ciclo biogeoquímico global.

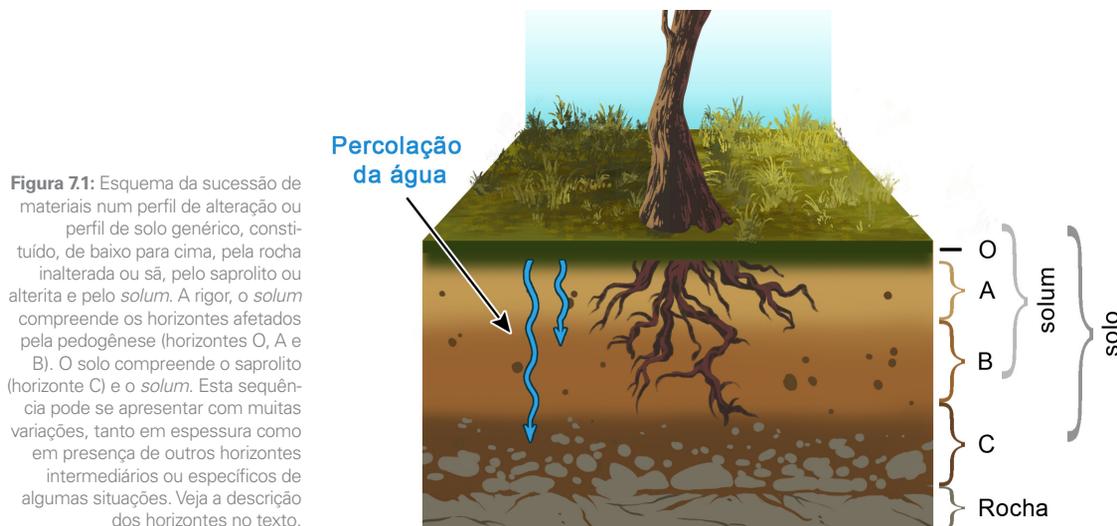
Os processos de desagregação e decomposição das rochas por intemperismo – que é o tema central deste tópico – ocorrem na superfície dos continentes, na interação entre litosfera–atmosfera–hidrosfera–biosfera, transformando as rochas duras em materiais móveis, inconsolidados, que podem ser erodidos, transportados e depositados em zonas mais baixas. Esses mesmos materiais inconsolidados, quando depositados em zonas topográficas mais baixas e soterrados por mais sedimentos sobrepostos, em depósitos sedimentares, consolidam-se pela pressão e por processos de recristalização, tornando-se novamente rochas duras (sedimentares). Estas, seguindo o ciclo natural das rochas, acabarão incorporadas aos processos geológicos da dinâmica interna, passando por metamorfismo ou por fusão parcial ou total, formando novas rochas metamórficas (tópico **Rochas metamórficas e estruturas**) e ígneas (tópico **Rochas ígneas**), complementando o ciclo das rochas.

Antes da erosão, os materiais intemperizados são geralmente submetidos a processos de reorganização, em profunda interação com a biosfera, formando os solos. Os materiais intemperizados, os solos e os sedimentos constituem as chamadas formações superficiais. Popularmente denominadas de terra, essas formações são friáveis, facilmente mobilizadas, e ocorrem na superfície de todos os continentes, recobrando as rochas duras, sejam elas ígneas, metamórficas ou sedimentares.

Os minerais componentes dessas formações são tanto minerais que já existiam nas rochas, antes de serem desagregadas e decompostas pelo intemperismo, quanto minerais novos, formados durante o processo de intemperismo, típicos desta situação. Os materiais formados por intemperismo podem constituir recursos minerais, o que é comum no clima tropical, com a formação de concentrações de ferro, de alumínio e de outros recursos. Por outro lado, também são recursos do ponto de vista de sua utilização como substrato e para a agricultura (os solos agrícolas) ou, ainda, como material de construção nas obras de engenharia civil. Finalmente, constituem o substrato sobre o qual o ser humano constrói, o que reforça a necessidade do estudo de sua origem, composição e comportamento.

7.2 Perfil de alteração e de solo

O **intemperismo** (conjunto de processos que desagregam e decompõem as rochas) e a **pedogênese** (formação do solo no sentido restrito da palavra: materiais intemperizados reorganizados e associados à matéria orgânica) levam à formação das coberturas de materiais inconsolidados sobre as rochas duras das quais derivam, com contínuo aprofundamento. Estes processos causam uma diferenciação vertical; forma-se, assim, o manto de alteração, de intemperismo ou regolito (**Figura 7.1**), onde ocorre, na base, a rocha fresca, sobreposta por materiais cada vez mais diferenciados.



Os materiais sobre a rocha fresca podem ser chamados também de saprolito ou alterita e, sobre eles, ocorre, normalmente, o solo, no sentido restrito da palavra (chamado, por vezes, de *solum*, para diferenciar). Da base ao topo, observa-se que os materiais do perfil são mais cada vez mais diferentes em relação à rocha original, em termos de composição, estruturas e texturas, por estarem há mais tempo sujeitos à ação do intemperismo. Ou seja, os materiais da parte inferior do perfil são semelhantes à rocha subjacente, permitindo inclusive reconhecer algumas características originais da rocha, como cores, estruturas e arranjo espacial dos grãos, enquanto os materiais da parte superior são bem diferentes, pois a continuidade do processo progressivamente mascara e destrói as estruturas e minerais da rocha inicial. Isso porque o intemperismo é um processo que progride essencialmente de cima para baixo, atingindo progressivamente porções cada vez mais profundas. Geralmente, os horizontes de intemperismo se organizam como mostrado na **Figura 7.1**; o **horizonte C** é a rocha alterada ou intemperizada (saprolito ou alterita), em que a rocha de origem pode ser reconhecida ou não, dependendo da intensidade do intemperismo. O **horizonte B** é a parte em que ocorre acumulação de argila, matéria orgânica e compostos oxidados de ferro, aqui genericamente referidos como oxi-hidróxidos de ferro (responsáveis pelas cores alaranjadas, avermelhadas e castanhas do material) e também de alumínio. O **horizonte A** é escuro, rico em matéria mineral e matéria orgânica; apresenta, geralmente, alta atividade biológica e recebe substâncias provenientes da decomposição orgânica dos restos acumulados no **horizonte O** sobrejacente. Este último horizonte, **O**, é rico em restos orgânicos em vias de decomposição; é o horizonte responsável pela fertilidade dos solos pobres em nutrientes; quando perdido por erosão, que normalmente sucede ao desmatamento, diminui a possibilidade de manutenção da vegetação.

O intemperismo e a pedogênese, sendo dependentes do clima e do relevo, ocorrem de maneira distinta nas diferentes regiões morfoclimáticas do globo, levando à formação de perfis de alteração compostos de horizontes de diferente espessura e composição.

Os horizontes do solo não são denominados “camadas” para não serem confundidos com materiais sedimentares, aqueles que se depositam em camadas após transporte, como será visto no tópico **Rochas Ígneas**. O nome “horizonte” é utilizado em referência à sua ocorrência em volumes tridimensionais aproximadamente paralelos ao horizonte da paisagem onde está situado.

O solo, por ser constituído de material terroso e/ou argiloso, indiferenciado, confunde-se muitas vezes com os sedimentos, que nada mais são do que materiais intemperizados, eventualmente até antigos solos, que foram erodidos, transportados e sedimentados. Mas a palavra

solo também é utilizada de forma ainda mais ampla, saindo do âmbito dos materiais naturais; assim, solo também é utilizado no sentido de substrato, base, território. Neste texto, no entanto, será utilizado apenas com seu significado geológico.

7.3 Intemperismo

O intemperismo desagrega os minerais das rochas e os fragmenta, além de modificar sua composição, decompondo os minerais mais frágeis e formando novos minerais. As transformações podem ser apenas físicas (intemperismo físico), apenas químicas (intemperismo químico), e também podem combinar as duas variedades, com ou sem a contribuição dos seres vivos (intemperismo físico-biológico ou químico-biológico).

7.3.1 Intemperismo Físico

As transformações simplesmente mecânicas (fragmentação das rochas e dos grãos minerais) são denominadas **intemperismo físico** e ocorrem basicamente por adaptações a variações de temperatura e de pressão. Entre os mecanismos mais comuns de intemperismo físico está a variação diuturna e sazonal da temperatura, que provoca contração e expansão diferencial dos grãos; essa variação provoca tensões entre os grãos, que acabam por se descolar e se fragmentar, transformando a rocha dura num conjunto de grãos desagregados e fraturados, ou seja, transformando um material coeso num material friável.

A cristalização de gelo e de sais em fissuras também tem efeito semelhante. Ao crescerem cristais (tanto de gelo como de sais) nos espaços intergranulares dentro da rocha, as paredes são pressionadas e o resultado também é o descolamento e fraturamento dos grãos. Este mecanismo com gelo é comum nos climas em que a água ocorre tanto no estado líquido quanto no estado sólido. No Brasil, há exemplos no alto das montanhas que comumente atingem temperaturas negativas durante a noite como, por exemplo, em Itatiaia (RJ). Já com relação à cristalização de sais, o mecanismo é comum nos climas do tipo quente e seco, em que a evaporação é maior que a precipitação em períodos significativos, de forma que os sais naturalmente dissolvidos nas águas se precipitam nas discontinuidades das rochas.

A presença de raízes também pode fragmentar as rochas (**Figura 7.2**); seu crescimento lento, porém contínuo, também pressiona a estrutura organizada da rocha, desagregando-a, do mesmo modo como fragmenta calçadas, muros e construções, numa outra escala de atuação, interagindo com as construções humanas, geralmente mais frágeis que as rochas. Este tipo pode ser chamado de intemperismo físico-biológico.

Finalmente, é generalizada a ocorrência das chamadas fraturas de alívio nos corpos de rocha que perdem sua cobertura intemperizada por erosão. As partes ainda duras da rocha perdem o peso sobrejacente e isso causa fraturas aproximadamente paralelas à topografia do local. Pode-se verificar essas fraturas facilmente em pedreiras, em que colinas e morros são cortados para extração de materiais, expondo perfis de intemperismo e também a rocha sã subjacente; no afloramento, podem ser vistas essas fraturas ou juntas de alívio, que condicionam a passagem da água de infiltração (**Figura 7.3**).

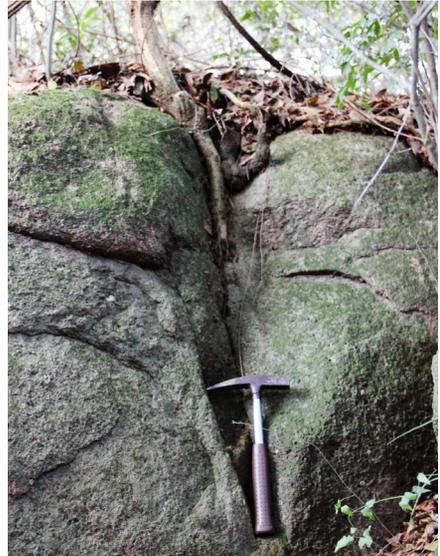


Figura 7.2: Raízes em rocha ígnea, adentrando em fraturas e forçando a rocha a quebrar-se, além de abrir caminhos para a passagem de água (Santana do Parnaíba, SP). Os blocos observados apresentam-se arredondados pela tendência do intemperismo em atacar os blocos mais intensamente nos vértices e arestas do que nas faces. Assim, promove uma suavização das formas angulosas originais quando fissuras e fraturas aproximadamente planares formam blocos no processo de desagregação da rocha original.



Figura 7.3: Fraturas de alívio de pressão, em descon-tinuidades aproximadamente paralelas à topografia, em perfil exposto em pedreira de granito, no Espírito Santo. No perfil, percebe-se pela mudança de coloração, o solo superficial, de cor castanha, o horizonte B, avermelhado, e o horizonte C, acizentado ou esbranquiçado. O núcleo do morro é constituído por granito inalterado, cujos blocos cortados pela lavra de rocha ornamental podem ser vistos na parte inferior. Os blocos arredondados na parte intermediária a superiores são restos de granito que foram preservados no perfil, por serem um pouco menos permeáveis do que as partes ao redor. No entanto, seriam também intemperizados com o tempo, não fosse a interrupção do processo natural pelos trabalhos da mineração.

A fragmentação de qualquer sólido aumenta a sua superfície específica, ou seja, a área exposta ao meio externo. Assim, ao passar pela fragmentação causada pelo intemperismo físico, as rochas aumentam

a superfície exposta à ação da água, que promove as reações do intemperismo químico. Nesse sentido, o intemperismo físico pode intensificar a ação da água nas rochas. A **Figura 7.4** mostra como a superfície específica pode aumentar pela fragmentação de um sólido inicial, contínuo.

Todos os mecanismos descritos de fragmentação e desagregação do intemperismo físico concorrem para a entrada da água da chuva na rocha; a presença da água no estado líquido, em contato com as rochas promove reações químicas, a cujo conjunto se dá o nome de **intemperismo químico**. Como as reações ocorrem a partir do contato da água com a superfície dos blocos fragmentados de rocha, ocorre comumente o que se chama alteração esférica (Figura 7.5).

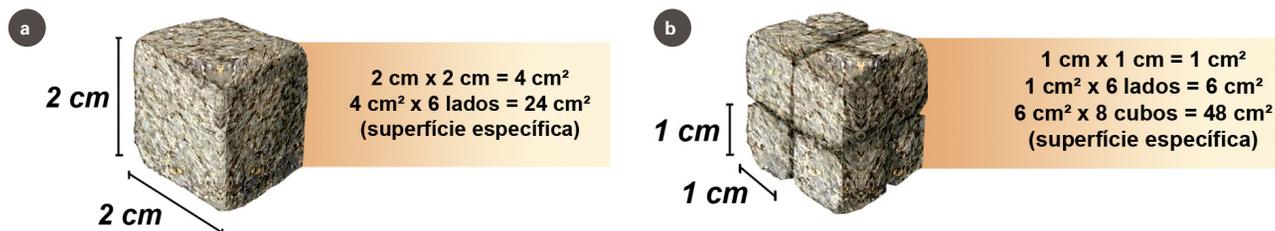


Figura 7.4: Aumento da superfície específica de um bloco de rocha, mostrando como a fragmentação pode aumentar intensamente a abertura de caminhos para a água promover as reações químicas de intemperismo. **a.** O bloco único, com 2 cm de lado, tem 24 cm² de área exposta em suas faces. **b.** Após ser fragmentado em três planos, o mesmo volume de rocha passa a expor 48 cm² de superfície, conforme os cálculos indicados na figura.



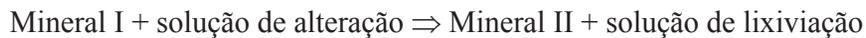
Figura 7.5: Alteração intempérica esférica, resultante da maior intensidade de ataque nos vértices e nas arestas dos blocos do que nas faces; assim a alteração afeta mais intensivamente as partes angulosas dos blocos, arredondando-os e formando camadas sucessivamente mais alteradas na periferia e menos alteradas no interior dos blocos. Este tipo de alteração é mais frequente em rochas ígneas, que não têm orientação interna preferencial dos minerais constituintes, como granitos e basaltos.

7.3.2 Intemperismo químico

Todos os mecanismos descritos de fragmentação e desagregação do intemperismo físico concorrem para a entrada da água da chuva na rocha, que promove reações químicas, a cujo conjunto se dá o nome de **intemperismo químico**.

Assim, em contato com a água da chuva, considerada neste contexto como uma “solução de alteração” ou “de intemperismo”, carregada de substâncias dissolvidas ao longo de sua trajetória pela atmosfera e pelo contato com a biosfera, os minerais das rochas duras (minerais primários) sofrem reações químicas diversas, que dependem dos reagentes (minerais originais da rocha e soluções de alteração) e das condições em que as reações se processam (clima, relevo, presença de organismos e tempo). O resultado das reações será o conjunto de minerais secundários (ou supérgenos, pois são gerados na superfície), que constituem as formações superficiais.

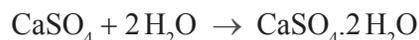
A seguinte reação geral pode ser considerada para ilustrar o intemperismo químico:



- **mineral I:** mineral primário, ou seja, mineral existente na rocha dura (p. ex., quartzo, feldspato, mica, piroxênio etc.),
- **solução de alteração:** água da chuva carregada de elementos/substâncias dissolvidas, que se infiltra e percola a rocha em vias de alteração,
- **mineral II:** mineral secundário (ou neoformado), ou seja, formado pela recombinação de íons durante a reação de intemperismo (p. ex., goethita, gibbsita, argilominerais etc.) e
- **solução de lixiviação:** água da chuva, cuja composição foi modificada pelas reações do intemperismo e que caminhará em meio aos materiais geológicos até atingir um aquífero, um rio ou até voltar à superfície.

As reações principais que ocorrem neste tipo de intemperismo são: **hidratação, hidrólise, oxidação, carbonatação e complexação**.

A **hidratação** refere-se à entrada de água na estrutura de um mineral, enfraquecendo-a e podendo formar um outro mineral com características distintas. Por exemplo, a anidrita (sulfato de cálcio) transforma-se em outro mineral, o gipso, pela entrada de H_2O em sua estrutura cristalina.



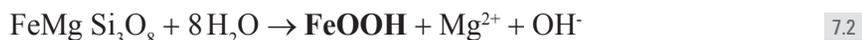
A **oxidação** ocorre com todos os minerais que contêm elementos químicos passíveis de serem oxidados, como o ferro. Nos minerais primários, quase sempre o ferro se encontra no estado reduzido, pois os ambientes de formação de rochas duras normalmente não são oxidantes. Em contato com as águas de superfície, no entanto, quase sempre carregadas de oxigênio, esses elementos são oxidados, desestabilizando a estrutura mineral em que estavam. Esta reação é facilmente observada em rochas ornamentais com minerais máficos (os minerais ferromagnesianos, quase sempre escuros), que apresentam, com o tempo, uma auréola cor de ferrugem quando expostas às intempéries. Esses minerais escuros, que geralmente contêm ferro, literalmente “enferrujam” nessas condições; qualquer objeto doméstico constituído por compostos de ferro pode apresentar a mesma reação, sendo fácil reproduzir o efeito num pedaço de palha de aço, por exemplo.

A **complexação** é uma reação que envolve compostos orgânicos dissolvidos na água, que são capazes de reter elementos químicos poucos solúveis em sua estrutura, mobilizando-os; a complexação, assim, pode remover do perfil de alteração elementos que não seriam removidos de outra forma. Alguns locais são particularmente suscetíveis a este processo; por exemplo, as águas do Rio Negro, no norte do Brasil, são escuras pela presença de matéria orgânica que, em boa parte, tem esta propriedade de complexação; assim, os íons de ferro liberados durante as reações de intemperismo dos minerais que contêm este elemento são levados para as águas, tornando-as ferruginosas e descolorindo os solos de certos locais.

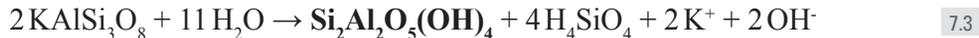
Por fim, a **hidrólise** é a mais importante reação de intemperismo nos climas tropicais. Esta reação destrói a estrutura do mineral, ou seja, quebra as ligações químicas entre os elementos químicos que constituem cada mineral atingido e os libera nas águas, em forma de cátions e ânions. Estes serão ou removidos pela drenagem (água em movimento dentro do manto de intemperismo) ou recombinados em novos minerais. Se houver bastante água e a topografia for tal que permita o livre movimento das águas em direção às partes mais baixas, todos os elementos solúveis serão eliminados, restando apenas os elementos menos solúveis naquelas condições de ambiente. Se, ao contrário, houver algum impedimento para a drenagem, o que ocorre geralmente em regiões baixas, onde as águas não têm para onde correr, ou seja, em locais estagnantes, nem os elementos químicos mais solúveis poderão ser eliminados.

No primeiro caso, com drenagem eficiente, os minerais secundários serão formados apenas pelos elementos químicos menos móveis (Fe, Al), formando oxi-hidróxido de Fe (**goethita**) e hidróxido de Al (**gibbsita**), como mostram as reações químicas 7.1, 7.2 e 7.3, tomando como minerais de partida um feldspato potássico e um piroxênio, muito comuns nas rochas da litosfera continental; nestas reações, os produtos indicados em negrito são as formas insolúveis, ou seja,

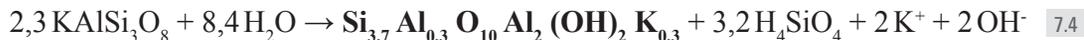
precipitados naturais que formam os novos minerais (minerais neoformados) e em letras normais estão os reagentes e produtos solúveis, que podem ser eliminados do ambiente por lixiviação (eliminação pela drenagem, ou seja, lavagem promovida pelo movimento das águas no interior dos perfis). A reação 7.1 mostra a hidrólise total de um feldspato potássico, como exemplo de reação química de intemperismo em ambiente quente, úmido e com boa drenagem. A reação 7.2 ilustra o mesmo caso para um silicato ferromagnésiano (piroxênio).



Uma pequena perda de eficiência na drenagem, dificultando a lixiviação dos produtos solúveis, pode causar a retenção também de parte do silício, que se combina com o alumínio, formando o argilomineral **caolinita**. A reação 7.3 ilustra este tipo de processo, que é a hidrólise parcial de um feldspato potássico, formando caolinita - argilomineral 1:1, ou seja, com um átomo de Si para cada átomo de Al na fórmula.



No caso de a drenagem ser ainda mais dificultada ou impedida pela falta de permeabilidade do meio ou pela topografia desfavorável à drenagem, os minerais secundários formados serão minerais constituídos por todos ou quase todos os elementos químicos presentes, pois, mesmo os mais móveis, como sódio, potássio, magnésio e cálcio, não terão uma boa lixiviação. O argilomineral secundário formado será da grande família dos argilominerais 2:1, com estrutura e composição mais complexas do que a caolinita. A reação 7.4 mostra o exemplo de uma hidrólise desse tipo para um feldspato potássico, formando uma variedade de argilomineral 2:1, ou seja, com aproximadamente dois átomos de Si para cada átomo de Al na fórmula.



Estas reações têm papel determinante em várias das propriedades dos solos que, mais tarde, serão formados pela reorganização dos minerais secundários. No caso das zonas de clima tropical, onde as soluções de lixiviação têm facilidade em drenar os produtos solúveis, os minerais secundários

são predominantemente constituídos por Fe, por Al, e também por parte do Si, constituinte maior das rochas da litosfera continental. Esses minerais são, respectivamente, goethita, gibbsita e caolinita (argilomineral sem cátions alcalinos e alcalinoterrosos). Já nas zonas menos úmidas e/ou menos quentes (climas temperados), os produtos minerais das reações de hidrólise são diferentes. Por falta de água, mesmo em relevos favoráveis, os elementos mais móveis não são lixiviados e, assim, os minerais neoformados são argilominerais com mais silício que a caolinita, e com uma estrutura que permite a retenção dos elementos alcalinos e alcalinoterrosos (sódio e potássio, e cálcio e magnésio, respectivamente); esses argilominerais também admitem o ferro em sua estrutura; por isso, não se formam, nessas condições, os materiais vermelhos, castanhos, amarelos e alaranjados, que têm essas cores por causa dos produtos oxidados de ferro (dos quais a goethita e a hematita são os mais abundantes). Também as temperaturas mais baixas do clima temperado, em comparação com o clima tropical, agem no mesmo sentido, pela diminuição da velocidade e intensidade das reações químicas e da lixiviação. Essas diferenças de lixiviação conforme o clima e conforme a topografia formam solos diferentes, como será visto no item sobre Pedogênese (formação do solo), mais adiante neste tópico.

Tanto a hidrólise quanto a carbonatação e a complexação têm na matéria orgânica em decomposição uma fonte importantíssima de CO_2 , essencial para a geração de íons carbonato e bicarbonato, para a acidificação das águas e para a produção de compostos orgânicos com propriedades complexantes.

7.4 Controles do intemperismo

O **clima** e o **relevo**, por determinarem os produtos formados nas reações químicas do intemperismo, como foi visto no item anterior, são chamados de controles do intemperismo, assim como o material original (ou seja, o tipo de rocha), a vegetação (cujo papel é fundamental na produção de ácidos orgânicos da decomposição de suas diversas partes) e o tempo.

O clima é o fator preponderante, já que, havendo tempo suficiente, diferentes tipos de rochas podem dar origem a um mesmo produto supérgeno, se submetidos a climas semelhantes. Isto ocorre pois os elementos químicos principais são basicamente os mesmos para as rochas mais comuns (Si, Fe, Al, Ca, Mg, Na e K, além do O). Como esses elementos têm comportamentos característicos, se houver tempo para que os processos ocorram, somente aqueles elementos químicos com características de menor mobilidade ficarão no local, formando minerais

característicos, e permitindo, então, que alteritas e solos formados a partir de rochas diferentes (mas silicáticas, como a imensa maioria), submetidas ao mesmo tipo de clima, sejam semelhantes em composição, não sendo possível determinar a rocha original com facilidade.

As zonas com água líquida (climas que não incluem congelamento da água) são aquelas onde o intemperismo químico é importante, gerando mantos de intemperismo que poderão ser erodidos ou pedogeneizados antes da erosão que virá, obrigatoriamente, mais cedo ou mais tarde, no tempo geológico. Na distribuição dos grandes processos geoquímicos de intemperismo ao redor do globo terrestre há evidente influência do zoneamento climático do globo terrestre. Como se pode verificar na **Figura 7.6**, os principais tipos de materiais formados pelo intemperismo distribuem-se em faixas aproximadamente paralelas às zonas climáticas equatoriais, tropicais, temperadas e frias do planeta.

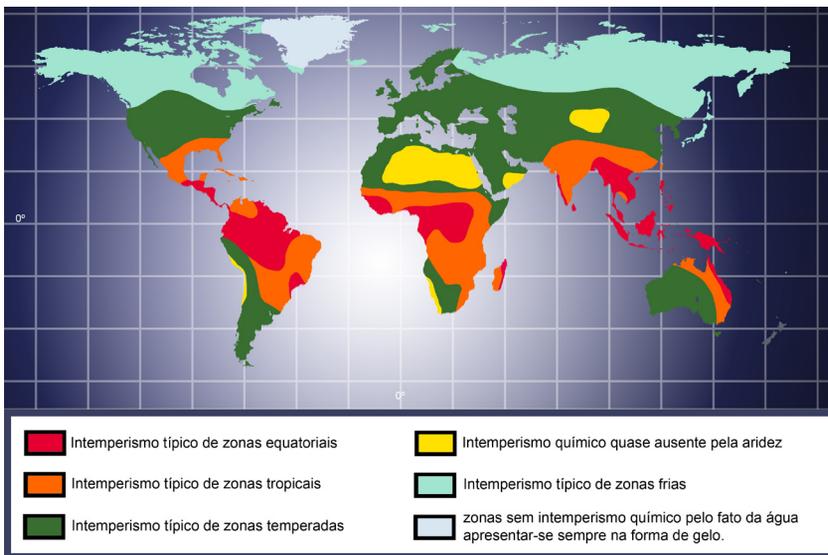


Figura 7.6: Distribuição global dos diferentes tipos geoquímicos de intemperismo, mostrando a influência das zonas climáticas, aproximadamente paralelas às faixas equatoriais, tropicais, temperadas e frias da Terra.

Esta zonalidade é marcada por produtos típicos das zonas climáticas correspondentes; os materiais formados nas zonas equatoriais e tropicais são chamados de materiais **lateríticos**, com abundância de oxi-hidróxidos de ferro e de alumínio e caolinita, sendo a caolinita menos importante nas regiões equatoriais, já que aí ocorre a eliminação praticamente completa do silício (vide reação química 7.1). Nas regiões montanhosas, por efeito da altitude, que promove temperaturas mais frias e havendo menos água no estado líquido, os materiais neoformados do intemperismo são mais semelhantes aos de climas temperados, tanto no hemisfério sul quanto no hemisfério norte (argilominerais do tipo 2:1, mais ricos em silício e em alcalinos e

alcalinoterrosos) (vide reação química 7.4). Duas principais zonas podem ser destacadas nessa distribuição dos produtos de intemperismo no globo:

- Regiões **sem alteração química** (zonas polares e desertos, correspondentes a mais ou menos 14% da superfície dos continentes) e
- Regiões **com alteração química** (86% da superfície dos continentes).

As regiões com alteração química são caracterizadas, ao mesmo tempo, por alguma umidade e pela existência de cobertura vegetal mais ou menos desenvolvida. Trata-se de um domínio heterogêneo, subdividido em quatro zonas de distribuição aproximadamente latitudinal, em função de suas características climáticas, do ponto de vista dos produtos do intemperismo químico:

- **Zonas frias** (16% da superfície continental), onde a vegetação é composta principalmente por líquens e coníferas, cujos resíduos se degradam lentamente. Os solos resultantes são podzóis (espodossolos, na classificação atual brasileira), ricos em quartzo e em matéria orgânica; estas zonas correspondem à zona circumpolar do hemisfério norte.
- **Zonas equatoriais** (13,5% da superfície continental), caracterizadas por precipitação abundante, superior a 1.500 mm por ano, e vegetação exuberante. A associação mineral característica é de oxi-hidróxidos de ferro e de alumínio (goethita e gibbsita, respectivamente).
- **Zonas tropicais** (18% da superfície continental), no domínio tropical subúmido, com precipitação superior a 500 mm e temperatura média anual superior a 15 °C. Os principais minerais formados são a caolinita e os oxi-hidróxidos de ferro. Aí, a gibbsita só se forma se houver excesso de Al em relação ao Si; caso contrário, todo o Al entra na constituição do argilomineral caolinita.
- **Zonas temperadas** (39% da superfície continental), onde a alteração e lixiviação são pouco intensas, resultando na formação de argilominerais ricos em silício e em parte dos cátions alcalinos e alcalino-terrosos presentes nas rochas originais; estes argilominerais podem encerrar o ferro em sua estrutura cristalina, não permitindo que este elemento forme seus óxidos ou oxi-hidróxidos e não ocorrendo, portanto, as cores avermelhadas, alaranjadas, amareladas e castanhas dos materiais intemperizados das zonas tropicais e equatoriais, conforme já foi mencionado.

Esse esquema, válido na escala do planeta, pode ser modificado por condições locais de relevo (no caso dos Andes, na parte de latitude equatorial e tropical) ou outras especificidades que escapam dos casos gerais.

Deve-se ainda lembrar que diferentes setores do relevo terão diferentes atuações do intemperismo químico e físico (**Figura 7.7**). Em regiões muito acidentadas, por exemplo, a erosão pode agir rapidamente em grãos que se soltam das rochas por desagregação, não havendo tempo para que aconteçam as reações químicas do intemperismo. Assim, nas baixadas, podemos ter acúmulo de materiais não alterados quimicamente; após a deposição, podem ser atingidos pelo intemperismo químico. No entanto, nessa posição topográfica, a drenagem será impedida e os produtos solúveis não serão bem lixiviados. Nos platôs, por outro lado, a alteração intempérica será mais eficiente, pois nesses locais, em princípio, poderá haver boa infiltração das águas para que se faça o contato necessário com os grãos minerais e aconteçam as reações químicas, e ainda para que os produtos solúveis sejam removidos.

A distribuição geográfica dos produtos neoformados do intemperismo tem consequências diretas na pedogênese. Os solos das regiões temperadas contêm os minerais que conservaram alguns dos elementos nutrientes para as plantas, enquanto a fertilidade dos solos dos climas tropicais se deve a outros fatores (reciclagem dos nutrientes das plantas que se decompõem nos solos e estrutura que permite circulação dos fluidos – ar e água), pois, neste caso, não há fertilidade do solo propriamente dita, já que seus minerais não possuem os elementos nutrientes, que foram perdidos, lixiviados pelas águas infiltradas no subsolo, após as reações químicas do intemperismo.

Dois outros controles determinantes do intemperismo são o tempo e o material original. O tempo age permitindo que o progresso do intemperismo aprofunde os perfis e que os materiais intemperizados evoluam, em sua organização, rumo à adaptação às condições de superfície.

A influência do material original estende-se não apenas à composição das rochas em vias de intemperismo, mas também à sua textura e estrutura. Quanto à composição das rochas, deve ser levado em conta que os minerais respondem de maneira diversa à alteração intempérica, sendo uns minerais mais frágeis que outros perante esse processo natural. Os minerais formados em temperaturas e pressões maiores serão os primeiros a serem desestabilizados, como, por exemplo, olivina, plagioclásio cálcico, piroxênio, que cristalizam no ambiente magmático a temperaturas próximas ou maiores que 1.000 °C. Já os minerais formados a temperaturas menores têm arranjo cristalquímico mais resistente às condições de superfície. O quartzo, por exemplo, que cristaliza a temperaturas próximas de 500 °C, é muito mais resistente que os outros minerais que cristalizam a temperaturas mais altas.

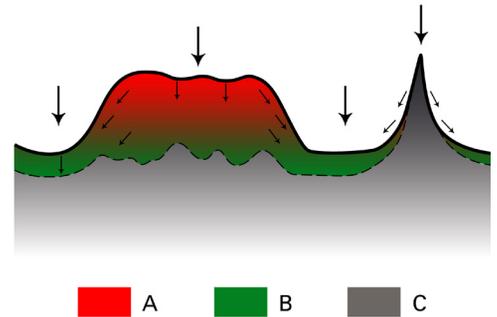


Figura 7.7: Influência do relevo no intemperismo. **A.** Boa infiltração e boa drenagem: intemperismo químico favorecido. **B.** Boa infiltração e má drenagem: intemperismo químico desfavorecido. **C.** Má infiltração e drenagem superficial favorecida: intemperismo físico maior.

Uma série de estabilidade diante do intemperismo foi estabelecida pelo pesquisador Goldich, e é a mesma série de cristalização magmática estabelecida por Bowen (tópico **Rochas ígneas**). Do mais frágil ao mais resistente, temos as seguintes sequências para os minerais comuns formadores de rochas:

- minerais **claros** (sem ferro): plagioclásio cálcico, plagioclásio sódico, feldspato potássico, muscovita (mica branca) e quartzo.
- minerais **escuros** (ferromagnesianos): olivina, piroxênio, anfibólio, biotita (mica escura).

A **Figura 7.8** mostra as duas sequências mencionadas e suas relações. A explicação para esta diferenciação no grau de alterabilidade é encontrada na estrutura dos minerais silicáticos: quanto maior o grau de polimerização do tetraedro de sílica na estrutura do mineral (Tópico **Minerais Formadores de Rochas**), mais resistente ele é, dificultando a quebra das ligações químicas necessárias ao intemperismo.

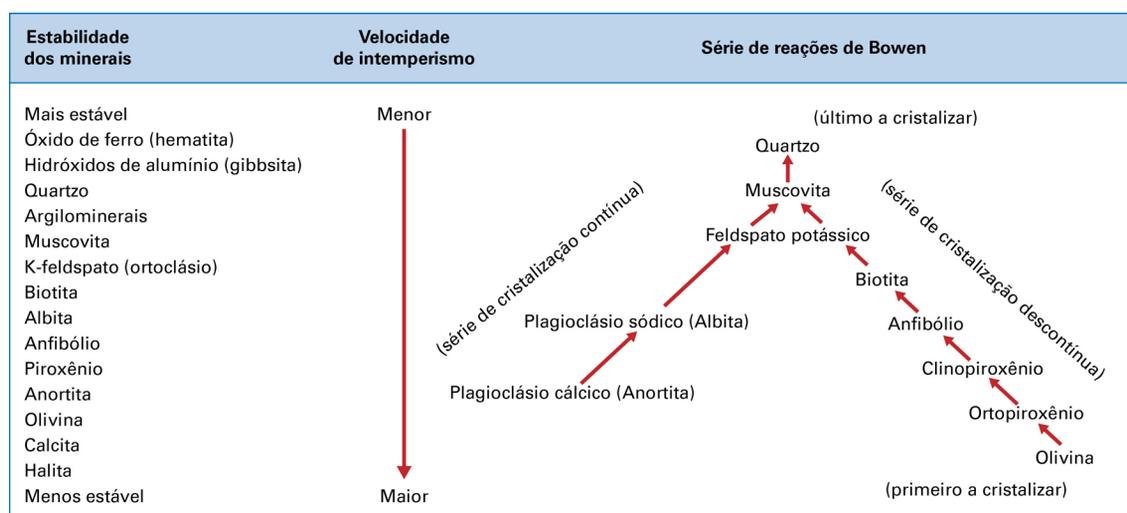


Figura 7.8: Série de Goldich, à direita, que representa a sequência dos minerais conforme sua susceptibilidade ao intemperismo químico. À esquerda, lista de minerais, do mais ao menos resistente ao intemperismo nas condições normais médias da superfície da Terra. / Fonte: modificado de TOLEDO; OLIVEIRA; MELFI, 2009.

Não é difícil perceber essa diferença em materiais utilizados em nosso cotidiano. Localize uma pia feita em rocha silicática (granito ou gnaiss, muito comuns para essa finalidade de utilização em construções). As partes mais escuras dessas rochas são mais ricas em biotita (mica preta, com Fe em sua composição); essas partes, após alguns anos de uso, perdem o brilho dado pelo polimento da fabricação da pia, o que pode ser observado visualmente, mas também se tornam ásperas; são modificações que demonstram a alteração mais rápida dessas partes mais ricas em minerais mais frágeis (a biotita), em comparação com as outras partes mais claras da rocha, constituídas predominantemente por minerais mais resistentes (quartzo e feldspato). Trata-se da reprodução, em ambiente doméstico e em curto intervalo de tempo, do que ocorre na natureza ao longo de milhões de anos.

Este quadro de alterabilidade (susceptibilidade ao intemperismo) explica por que encontramos, nas areias de praias e de rios, predominantemente quartzo e um pouco de mica branca (muscovita): são estes os minerais mais resistentes ao intemperismo. Assim, nos mantos de intemperismo ou nos sedimentos depositados após erosão de solos e de mantos de intemperismo pré-existentes, são os minerais primários ainda não alterados (os mais resistentes) os constituintes principais da fração mais grossa. Os oxi-hidróxidos de ferro, de alumínio e os argilominerais, em geral se formam em partículas de dimensões menores que a areia, e são transportados até mais longe, não ficando retidos nos depósitos arenosos das praias e rios; são encontrados em depósitos de partículas mais finas, como as planícies de inundação dos rios e os fundos lodosos de lagos e lagoas, além dos fundos marinhos das profundidades maiores das plataformas continentais e dos fundos abissais dos oceanos, onde chegam pela erosão contínua da superfície dos continentes.

Ainda outras características das rochas originais podem influir no intemperismo. O tamanho dos grãos determina a superfície específica: quanto menores os grãos, maior área de contato (superfície específica) com eles terá a água, num mesmo volume, promovendo as reações químicas do intemperismo de forma mais eficiente (**Figura 7.4**). Este efeito também pode ser adicionado ao motivo pelo qual as porções mais ricas em biotita dos granitos e dos gnaisses são alteradas mais rapidamente, no exemplo citado poucas linhas acima, da pia de cozinha; os grãos de biotita são menores, nessas rochas, do que os grãos de quartzo e feldspato, contribuindo para que, nessas porções da rocha, a superfície específica seja maior, aumentando a ação da água em promover reações químicas.

Além disso, o arranjo original dos grãos pode determinar características de porosidade e permeabilidade, que podem acelerar ou retardar as reações, lembrando que porosidade é o conjunto de vazios num sólido, numa rocha neste caso, e que permeabilidade é a comunicação entre os poros, permitindo a circulação de fluidos.

7.5 Pedogênese

A **pedogênese** (formação do *solum*, ou simplesmente solo, no sentido mais restrito da palavra) ocorre quando as modificações são, sobretudo, estruturais, com importante reorganização e transferência dos minerais formadores do solo – principalmente argilominerais e oxi-hidróxidos de ferro e de alumínio – entre os níveis superiores do manto de alteração, que compõem os horizontes do *solum*.

Nessa reorganização estrutural do material anteriormente intemperizado desempenham papel fundamental a fauna e a flora que, ao realizarem suas funções vitais, modificam e movimentam enormes quantidades de material, mantendo o solo aerado e renovado em sua parte mais superficial.

Os mecanismos de reorganização estrutural ocorrem de maneira diferencial, conforme a profundidade do solo, causando também uma zonalidade vertical, gerando os horizontes pedológicos, aproximadamente concordantes com a topografia do terreno. Estes mecanismos estão ligados basicamente à ação de dois fatores: a água e os organismos.

A água pode deslocar componentes minerais em seu caminho de infiltração vertical ou lateral, principalmente das partículas mais finas. Além disso, a alternância de estado de umidade dos materiais pedológicos (umedecidos e secos) provoca expansão e contração dos materiais, podendo gerar esforços que resultam em fissuras e outras estruturas de agregação.

Os organismos têm também importante papel na evolução, pois deslocam partículas para abrir canais e movimentar-se ou simplesmente buscar nutrientes.

A fauna do solo, em particular formigas, cupins e minhocas, em sua atividade alimentar e construtora, modificam a cobertura pedológica, com transporte de partículas, remonte vertical do material, recobrimento de horizontes superficiais, modificação da estrutura e da porosidade do *solum* (com a formação de agregados e formação de canais) e incorporação de matéria orgânica. Os mecanismos de agregação formam diferentes estruturas pedológicas, que são diferenciadas e visíveis a olho nu (estrutura colunar, prismática, em blocos, laminar e granular).

7.5.1 Características do *solum*

A cor é uma das características mais marcantes dos solos e está associada aos seus constituintes (que são as substâncias cromóforas – que dão cor) e também a alguns mecanismos de sua evolução durante a pedogênese:

- a **matéria orgânica** colore o solo em tons escuros de cinza, marrom e preto,
- o **carbonato de cálcio** e outros sais solúveis (existentes apenas em condições particulares em que os íons componentes destes minerais não são lixiviados pelas águas de infiltração) tornam os solos esbranquiçados,
- os **produtos ferruginosos** (minerais de ferro livre, ou seja, oxi-hidróxidos de ferro, que somente ocorrem onde os íons deste elemento não participam dos argilominerais 2:1) colorem os solos em várias cores e tonalidades, dependendo de seu estado, da estrutura formada e da hidratação do meio, principalmente: os compostos de ferro ferroso colorem os solos em cinza e cinza azulado; já os minerais de ferro férrico (ou seja, oxidado), sendo

goethita, as cores predominantes serão amarelo, laranja e marrom; no caso da hematita, serão vermelho e castanho,

- os **produtos de manganês**, elemento que pode substituir pequena parte do ferro em minerais primários e que, tendo comportamento geoquímico próximo ao do ferro, também fica liberado nos solos, formam compostos oxidados com cor preta.

Os compostos ferruginosos comumente encontrados nos solos, principalmente goethita e hematita, são formados em condições hídricas diferentes, podendo evoluir um para o outro, segundo a evolução das condições do solo. A goethita (um oxi-hidróxido) ocorre principalmente em solos úmidos, mas sem excesso de umidade, e também sem grande contraste de umidade ao longo das estações do ano. Já a hematita (um óxido) forma-se, preferencialmente, em solos com regime hídrico bem contrastado, com alternância sazonal entre uma estação com alta umidade, mas em condições oxidantes, e outra estação bem seca.

É importante ressaltar que a cor observada depende ainda de outros aspectos, como granulometria do material, compactação e associação com outros materiais, aspectos esses que podem resultar em variações de tonalidades. Além disso, também é importante chamar a atenção para o fato de que a observação das cores não pode ser relacionada à quantidade do componente que confere aquela cor ao solo, pois pouca quantidade tanto dos compostos ferruginosos quanto da matéria orgânica pode significar forte influência na cor do solo.

Assim, as cores vermelhas, amarelas, castanhas e seus tons intermediários refletem a presença de ferro em compostos oxidados específicos. Conforme o que já foi visto, pode-se concluir que materiais intemperizados e pedogeneizados em clima tropical terão estas cores, enquanto os materiais evoluídos em climas temperados não (os solos são mais escuros com colorações pretas, cinzas, marrons etc.), já que o ferro não forma seus compostos livres, sendo incorporado na estrutura dos argilominerais mais complexos tipo esmectita e vermiculita, principalmente (argilominerais 2:1 - **Figura 7.9**).



Figura 7.9: a. Solo típico de clima tropical, com cores avermelhadas pela presença de compostos oxidados de ferro (principalmente goethita), pobre em matéria orgânica e em nutrientes, que foram lixiviados durante o intemperismo; contém também argilomineral do tipo caolinita (filossilicato 1:1); b. Solo escuro, rico em matéria orgânica, sem óxidos nem hidróxidos de ferro, formado por argilominerais 2:1, cuja composição inclui parte dos nutrientes originalmente presentes na rocha parental.

A textura é outra importante característica ou propriedade do *solum* e das formações superficiais em geral. Diz respeito à quantidade relativa entre os grãos de diferentes dimensões: argila (mais fino), silte e areia (mais grosso), que são as três classes de granulação abaixo de 2 mm, utilizadas para grãos de solos e de sedimentos. A alta porcentagem de argila num *solum* indica um intenso intemperismo do material (já que os minerais formados pelas reações do intemperismo químico estão, principalmente, nesta fração granulométrica), enquanto a alta porcentagem de silte ou de areia pode indicar que ainda há quantidade significativa de minerais primários a serem quimicamente intemperizados, já que os minerais primários ainda não atacados pelo intemperismo químico podem até diminuir de tamanho pela ação da fragmentação do intemperismo físico, mas dificilmente chegam a grãos menores que a fração silte. As partículas argilosas podem conferir impermeabilidade ao solo, a menos que formem agregados que permitam a comunicação entre os poros e o desenvolvimento da permeabilidade; os agregados podem ser formados com a contribuição dos oxi-hidróxidos de ferro ou da matéria orgânica. Essa estrutura permeável, formada por agregados, pode ser frágil, sendo destruída pelo uso de máquinas agrícolas pesadas, por exemplo, o que pode tornar os solos compactos e impróprios para a agricultura.

O caráter argiloso ou siltoso/arenoso pode ser reconhecido facilmente pelo tato. Estando o material umedecido, ao apertá-lo e esfregá-lo entre os dedos, se a sensação for de maciez, a predominância é de argila (fração constituída por minerais argilosos que têm forma lamelar, responsável por esta sensação, além de oxi-hidróxidos muito finos); se for de aspereza, a predominância é de silte (menos grosso) ou de areia (mais grosso).

Uma das classificações de tamanho de partículas para os materiais geológicos é a indicada na **Tabela 7.1**, e ela será retomada no próximo tópico, sobre sedimentos e rochas sedimentares (Tópico **Sedimentos e Rochas Sedimentares**).

Tabela 7.1: Classificação granulométrica simplificada dos grãos minerais encontrados em alteritas e solos.

fração granulométrica	dimensão
matacão	> 256 mm
seixo	64 a 256 mm
cascalho	4 a 64 mm
grânulo	2 a 4 mm
areia	0,062 a 2 mm
silte	0,004 a 0,062 mm
argila	<0,004 mm

Sendo os solos produtos da reorganização dos materiais intemperizados, sua constituição depende fundamentalmente do tipo de intemperismo que atuou no material parental, origem da alterita e do solo correspondente. Assim, assumem papel primordial o clima e o relevo, com sua influência na lixiviação ou retenção dos elementos químicos inicialmente presentes nas rochas. As diferenças de lixiviação conforme esses dois fatores (clima e topografia), formando solos diferentes, como mostrado na **Figura 7.5**, são muito importantes na prática, basicamente por dois motivos.

O primeiro refere-se ao fato de os elementos alcalinos e alcalinoterrosos Na, K, Ca e Mg estarem entre os nutrientes principais das plantas, tendo sua presença ou ausência consequência direta na fertilidade dos solos. Os solos tropicais são muito pobres em nutrientes, por causa da grande quantidade de água e das temperaturas elevadas, situação que promove reações químicas de intemperismo mais rápidas e eliminação eficiente daqueles elementos citados; apenas em situações específicas e pouco frequentes é que pode haver retenção desses elementos nutrientes, ao contrário dos solos de climas temperados. A segunda razão é o fato de que os minerais neoformados pelo intemperismo em clima tropical, quais sejam, oxi-hidróxidos de ferro e de alumínio, além de argilominerais 1:1 (caolinita), têm grande poder de fixação de P; assim, quando se aplicam fertilizantes fosfatados nos solos, boa parte é perdida por lixiviação ou fixada nesses minerais, causando grandes prejuízos e contribuindo para o esgotamento dos recursos minerais de fosfato.

Outra diferença importante entre os solos de climas mais quentes (tropicais e equatoriais) em relação a solos formados em climas menos quentes (temperados) é a degradação da matéria orgânica. A evolução biogeoquímica normal dos compostos orgânicos é em direção à mineralização, ou seja, em direção à formação de compostos com apenas um átomo de C nas moléculas, que não é mais considerado composto orgânico; daí o nome desta transformação: mineralização. Nos ambientes mais comuns da superfície terrestre, o caráter oxidante e hidratado é a regra; aí se forma CO_2 (gás carbônico) como produto final da degradação da matéria orgânica. No entanto, nos climas temperados, a temperatura baixa retarda muito as reações químicas; assim, os solos ficam enriquecidos de compostos orgânicos intermediários como ácidos húmicos, fúlvicos e humina, genericamente denominados húmus. Ao contrário, nos solos equatoriais e tropicais, a mineralização da matéria orgânica é rápida e este é mais um fator que determina a falta de fertilidade dos solos destes climas: a pobreza em matéria orgânica.

7.5.2 Solos brasileiros

Os solos encontrados nos continentes apresentam grande diversidade em função das diferentes combinações de seus fatores de formação. No entanto, como pode ser compreendido por toda a explanação anterior sobre os aspectos químicos e mineralógicos das reações químicas do intemperismo, são poucas as famílias minerais que constituem os solos.

Nas regiões tropicais, como é o caso do Brasil, cada tipo de solo tem propriedades físicas, químicas e morfológicas específicas, mas seu conjunto apresenta um certo número de atributos comuns como, por exemplo, composição mineralógica simples (quartzo, caulinita, oxi-hidróxidos de ferro e de alumínio), grande espessura e horizontes com cores predominantemente amarela/laranja/vermelha/castanha. Os solos tropicais são geralmente empobrecidos quimicamente e de baixa fertilidade em relação aos solos de clima temperado, ricos em argilominerais capazes de reter os elementos nutrientes. Dentro dos solos tropicais, temos um grande conjunto denominado “latossolos”, que são, de longe, os solos mais importantes do ponto de vista de representação geográfica no Brasil. Eles ocorrem em praticamente todas as regiões bioclimáticas do país, sobre diferentes tipos de rochas, são pobres do ponto de vista da presença de nutrientes, e apenas a presença de importante camada de detritos vegetais e animais em decomposição é que permite a existência de vegetação exuberante como nas florestas tropicais. Outros tipos de solos também ocorrem no Brasil, além dos latossolos, em função de peculiaridades das condições de formação e evolução pedológica, como o clima semiárido do Nordeste brasileiro, que condiciona a formação de vertissolos e entissolos, entre outros.

As denominações mencionadas (latossolos, vertissolos e outros) são denominações utilizadas na classificação pedológica, feita com base em critérios genéticos, morfológicos ou morfogenéticos, que consideram, respectivamente, seu processo de gênese, suas características morfológicas e o relevo de formação. Há uma classificação brasileira publicada pela Embrapa em 2006, denominada “Sistema Brasileiro de Classificação de Solos”, utilizada em todos os ramos do conhecimento relacionados aos solos, como agronomia, geotecnia, geografia e geologia, principalmente.

7.6 Minerais primários e supérgenos comuns e os elementos químicos envolvidos

Os materiais presentes nos solos são constituídos basicamente por substâncias minerais e matéria orgânica. Tanto um grupo quanto outro podem ter distintas composições, dependendo de sua evolução, em função dos materiais iniciais e da paisagem, incluídos o clima e a topografia.

No caso dos materiais minerais, os solos contêm basicamente alguns minerais primários (ou seja, herdados da rocha fresca que deu origem ao solo) resistentes e, predominantemente, minerais secundários (supérgenos), formados durante os processos de intemperismo químico sobre as rochas originais. Estes minerais secundários são essencialmente argilominerais (filossilicatos) ou oxi-hidróxidos (de ferro ou de alumínio) e, somente em casos excepcionais, ocorrem outros tipos de minerais, de outros grupos químicos, como carbonatos, fosfatos ou ainda outros sais.

Apenas oito elementos químicos, de toda a tabela periódica, dão conta de mais de 95% das rochas da crosta continental, que são os materiais de origem dos solos. São eles: O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K e Mg. Entre os demais elementos químicos que ocorrem nos minerais, classificados como menores e traços, devido à sua menor abundância, o Mn possui comportamento geoquímico semelhante ao Fe, e pode também formar oxi-hidróxidos, de cor muito escura, mas que ocorrem em quantidade muito menor nos solos, geralmente recobrando fissuras, em depósitos muito finos e individualizados, formando algumas lineações ou planos escurecidos.

Aqueles elementos químicos mais comuns, excluindo o oxigênio, podem ser agrupados em três categorias, relacionadas ao seu comportamento no ambiente normal reinante na superfície terrestre:

- **muito móveis** (alcalinos e alcalinoterrosos: Ca, Na, K e Mg),
- **medianamente móvel** (Si),
- **muito pouco móveis** (Fe e Al).

Todo o raciocínio a respeito dos minerais secundários formados nas reações de intemperismo depende desse comportamento, em integração com as condições do ambiente (clima e condições de drenagem).

Entre os minerais comuns das rochas, temos os minerais da **Tabela 7.2**. Os minerais formados pelas reações de intemperismo químico, a partir dos elementos químicos liberados pelos minerais primários, são principalmente oxi-hidróxidos de ferro e alumínio e argilominerais (1:1 ou 2:1), conforme sintetizado na **Tabela 7.3**.

Tabela 7.2: Minerais comuns das rochas silicáticas encontradas na superfície dos continentes e sua composição química, expressa por suas fórmulas estruturais.

quartzo	SiO_2
feldspato alcalino	$\text{K Al Si}_3\text{O}_8$
plagioclásio	$(\text{Na, Ca}) \text{Al Si}_3\text{O}_8$
biotita	$\text{K (Fe, Mg)}_3 (\text{Al, Fe}) \text{Si}_3 \text{O}_{10} (\text{OH, F})_2$
muscovita	$\text{K Al}_2 \text{Si}_3 \text{O}_{10} (\text{OH, F})_2$
piroxênio	$(\text{Ca, Mg, Fe}) (\text{Al, Mg, Fe}) (\text{Si, Al})_2 \text{O}_6$
anfíbólio	$(\text{Ca, Na, K})_2 (\text{Al, Mg, Fe})_5 (\text{Si, Al})_8 \text{O}_{22} (\text{OH, F})_2$
olivina	$(\text{Fe, Mg, Mn})_2 \text{Si O}_4$
magnetita	Fe_2O_3
calcita	CaCO_3

Tabela 7.3: Minerais comumente formados pelas reações de intemperismo químico e sua composição química, expressa por suas fórmulas estruturais.

argilominerais	2:1	filossilicatos complexos tipo $(\text{Ca, K}) \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{Al, Fe})_2 (\text{OH})_2$
argilominerais	1:1	filossilicato mais simples $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
goethita		oxi-hidróxido de ferro férrico FeOOH
hematita		óxido de ferro férrico Fe_2O_3
gibbsita		hidróxido de alumínio $\text{Al}(\text{OH})_3$

A **Tabela 7.4** sintetiza os conjuntos dos principais minerais presentes nas rochas comuns (minerais primários), de minerais supérgenos (formados por intemperismo) comuns, e de minerais encontrados nas formações superficiais (mantos de intemperismo e solos, por um lado, e depósitos sedimentares, por outro lado), que correspondem aos minerais primários resistentes e aos minerais supérgenos formados pela alteração dos minerais primários suscetíveis de alteração.

Tabela 7.4: Minerais primários e supérgenos formados a partir deles, e indicação dos minerais comuns encontrados nas formações superficiais (mantos de intemperismo, solos e depósitos sedimentares). Não estão incluídos aqui os carbonatos e outros minerais encontrados subordinadamente no ambiente de intemperismo e pedogênese.

Minerais comuns nas rochas sãs	Minerais supérgenos comuns	Minerais comuns nas formações superficiais	
		mantos de intemperismo e solos	depósitos sedimentares
<ul style="list-style-type: none"> quartzo feldspato K plagioclásio biotita muscovita piroxênio anfíbólio olivina magnetita 	<ul style="list-style-type: none"> oxi-hidróxido ou óxido de Fe (goethita ou hematita) hidróxido de Al (gibbsita) argilomineral 1:1 (caolinita) argilomineral 2:1 	<ul style="list-style-type: none"> oxi-hidróxido ou óxido de Fe (goethita ou hematita) hidróxido de Al (gibbsita) argilomineral 1:1 (caolinita) argilomineral 2:1 quartzo feldspato K biotita muscovita magnetita 	<ul style="list-style-type: none"> oxi-hidróxido ou óxido de Fe (goethita ou hematita) hidróxido de Al (gibbsita) argilomineral 1:1 (caolinita) argilomineral 2:1 quartzo feldspato K biotita muscovita magnetita

7.7 O intemperismo e o ciclo geológico global

No ciclo geológico, os elementos menos móveis nas condições normais da superfície da Terra (Fe e Al), bem como o Si, tendem a se concentrar nos produtos residuais da alteração, ou seja, são a matéria-prima formadora dos solos. Já os elementos químicos mais solúveis encontrados nos minerais primários das rochas duras serão aqueles predominantemente eliminados pelas soluções de alteração, por lixiviação, e que acabarão por alcançar os oceanos, ficando principalmente em solução (caso do Na) ou participando de precipitações químicas ou bioquímicas nos fundos oceânicos (Ca e Mg). O K apresenta a particularidade de participar mais ativamente do ciclo da vida sobre os continentes, por meio de uma etapa de adsorção nos argilominerais supérgenos, até sua utilização pelas plantas.

Considerando os minerais secundários formados pelos elementos químicos fixados nas coberturas de intemperismo que cobrem os continentes, pode-se reconhecer dois grandes grupos: os argilominerais, que são flossilicatos, e os oxi-hidróxidos de Fe e de Al.

A presença de matéria orgânica nos solos tem grande importância porque ela contém nutrientes que podem não estar presentes na parte mineral dos solos, como é o caso dos solos de climas equatoriais e tropicais. Por isso, é tão importante manter a vegetação nos solos para que não haja erosão do seu horizonte *O* (que é a parte de matéria orgânica em degradação, que fornece os nutrientes para a continuidade do ciclo vegetal); daí vem a ideia (confirmada em exemplos reais) de que os solos das florestas tropicais podem tornar-se desertos ou regiões muito mais pobres do ponto de vista da produção vegetal se forem desmatados, pois a erosão ocorrerá imediatamente se não houver a proteção das plantas e suas raízes, ficando apenas a parte mineral do solo, lixiviada e, portanto, desprovida de nutrientes.

Por ser o processo que coloca os elementos químicos das rochas à disposição dos processos de superfície que envolvem a biosfera, o intemperismo é o elo que une a litosfera e a dinâmica interna do planeta com a vida; não fosse esta etapa do ciclo geológico global, não haveria condições para alimentação dos seres vivos, tanto animais quanto vegetais, tanto terrestres quanto marinhos.

Este tema - intemperismo e formação dos solos - tem sido tratado de forma fragmentada no ensino formal, sendo interessante observar alguns equívocos, como a confusão entre intemperismo e erosão (próximo tópico), ao utilizar a palavra desgaste para conceituar intemperismo (desgaste como o processo de tornar algo “gasto”, em Ciências da Terra, é associado à ideia de

perda ou retirada de material, ou seja, erosão – Tópico **Sedimentos e Rochas Sedimentares**). Outro equívoco ocorre ao atribuir ao vento a função de agente de intemperismo e formação de solo (quando o vento, a rigor, é agente de erosão, transporte e sedimentação) e, principalmente, ao ignorar o papel do intemperismo como o processo que conecta a dinâmica interna e a dinâmica externa da Terra, possibilitando a disponibilização dos nutrientes para a vida, liberando-os das rochas e colocando-os nas soluções (água) e nos minerais secundários formados durante o intemperismo.

Referências

- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Editores Humberto Gonçalves dos Santos et al. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.
- LEPSCH, I.F. **Formação e Conservação dos Solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 178p.
- TOLEDO, M. C. M. de; OLIVEIRA, S. M. B. de; MELFI, A. J. Da rocha ao Solo – Intemperismo e pedogênese. In: TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M. C. M. de; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. 2. ed. São Paulo: IBEP Editora Nacional-Conrad, 2009. p. 210-239.
- TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M. C. M. de; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. 2. ed. São Paulo: IBEP Editora Nacional-Conrad, 2009. 600p.