

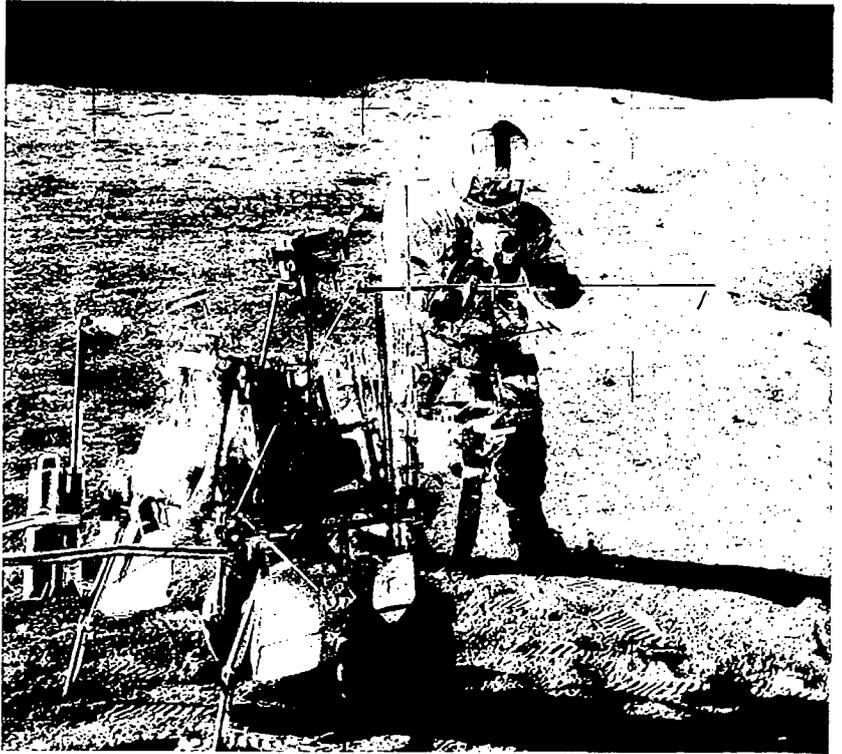
2

A Formação dos Solos

Este é um poema sobre a existência... não um lírico, mas um épico lento cujas rimas foram definidas pelas longas eras geológicas que o mundo já experimentou...

— JAMES MICHENER, *CENTENNIAL*

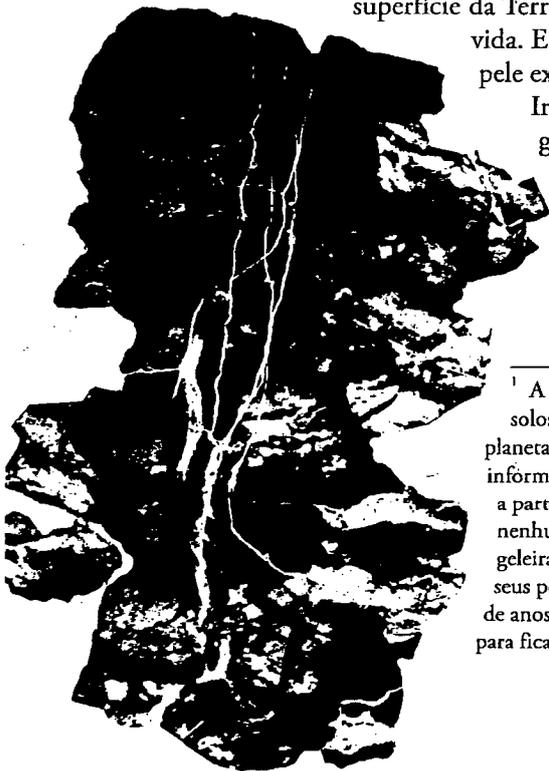
Retirando amostras do "solo" da Lua (NASA Apollo 14)



Os primeiros astronautas que exploraram a Lua trabalharam em suas roupas pressurizadas pouco confortáveis para coletar amostras de rochas e poeira da superfície lunar, as quais foram trazidas para a Terra a fim de serem analisadas. Descobriu-se, então, que as rochas da Lua têm composição similar àquelas encontradas nas profundezas da crosta da Terra – uma composição tão parecida que os cientistas concluíram que a Lua surgiu quando uma incrível colisão entre algum material (do tamanho de Marte) com a Terra – esta, então muito mais jovem – expeliu muitos fragmentos de material derretido em direção à sua órbita. Depois, a força da gravidade atraiu e juntou todo esse material para formar a Lua, onde essas rochas permaneceram inalteradas ou foram reduzidas a poeira, devido ao impacto dos meteoros. Essas mesmas rochas que existem na Lua, quando entraram em contato com o ar, a água e os organismos vivos da superfície da Terra, transformaram-se em algo novo: muitos tipos diferentes de solos com vida. Este capítulo conta a história de como as rochas e sua poeira se tornaram “a pele exuberante da Terra”.¹

Iremos estudar os processos de formação dos solos que transformam o regolito sem vida nas multicoloridas camadas do perfil do solo; os fatores ambientais que fazem com que esses processos produzam, na Bélgica, solos tão diferentes dos do Brasil; e iremos aprender também sobre os solos formados sobre rochas calcárias, muito diferentes daqueles desenvolvidos sobre arenitos, e solos do sopé das encostas, tão diferentes dos situados em suas partes mais elevadas.

¹ A expressão “a pele exuberante da Terra” (*the ecstatic skin of the Earth*) vem de um livro sobre solos, de leitura muito agradável, escrito por Logan (1995). Mas a Terra pode não ser o único planeta com uma pele formada de solo. Dados do planeta Marte (consultar Kerr, 2005, para mais informações) sugerem a ocorrência de erosão e formação de minerais secundários, como o gesso, a partir do movimento e da evaporação da água superficial, mas quase nenhum intemperismo e nenhuma formação de argila. A nave Mars Reconnaissance Orbiter descobriu solo coberto por geleiras em Marte e, em 2008, o robô Phoenix Mars Lander raspou um pouco de solo de um dos seus polos, revelando, assim, uma branca placa de gelo. Os cientistas concluíram que, há bilhões de anos, a superfície de Marte foi inundada por água por certo período, mas esteve gelada demais para ficar na forma de água corrente desde então.



Cada paisagem é composta por um conjunto de diferentes solos, cada um com sua própria maneira de influenciar os processos ecológicos. Se tivermos a intenção de modificar, explorar, preservar ou, simplesmente, entender uma paisagem, só poderemos ser bem-sucedidos se conhecermos como as características do solo se relacionam com o ambiente – tanto em um local em particular como na paisagem como um todo.

2.1 INTEMPERISMO DE ROCHAS E MINERAIS

A influência do intemperismo, ou seja, da alteração física e química causada pelas intempéries sobre as partículas, em geral, é flagrante em qualquer lugar de nosso planeta. Nada escapa a ele. A intemperização fragmenta rochas e minerais, altera ou destrói suas características físicas e químicas e transporta, de um local para outro, seus fragmentos menores e produtos solúveis. Além disso, o intemperismo sintetiza novos minerais de grande importância para os solos. A natureza das rochas e dos minerais que estão sendo intemperizados determina as taxas e a natureza dos produtos resultantes de processos de decomposição e de síntese (Figura 2.1).

Características das rochas e dos minerais

Os geólogos classificam as rochas da Terra como ígneas, sedimentares e metamórficas. As ígneas são aquelas formadas a partir de magma fundido e incluem rochas comuns, como o granito e o basalto (Figura 2.2).



Figura 2.1 Duas lápides de pedra, fotografadas no mesmo dia e no mesmo cemitério, ilustram como o tipo de rocha interfere nas taxas de intemperismo. A data e as iniciais esculpidas na lápide de ardósia, em 1798, ainda estão claramente delineadas, enquanto a data e a imagem de um cordeiro, esculpidos em mármore, em 1875, sofreram intemperismo, tornando-se quase irreconhecíveis. A ardósia é em grande parte constituída de argilominerais silicatados resistentes, enquanto o mármore é composto, basicamente, de calcita, que é mais facilmente atacada por ácidos existentes na água da chuva. (Fotos: cortesia de R. Weil)

Textura da rocha	Minerais de cor clara (p. ex., feldspatos, muscovita)		Minerais de cor escura (p. ex., hornblenda, augita, biotita)	
	Quartzos			
Grosseira	Granito	Diorito	Gabro	Peridotita / Hornblendita
Intermediária	Riolito	Andesito	Basalto	
Fina	Felsita / Obsidiana			

Figura 2.2 Classificação de algumas rochas ígneas em relação à composição mineralógica e ao tamanho dos grãos dos minerais (textura da rocha). Os minerais de cores claras e o quartzo são, em geral, mais comuns do que os minerais de cores escuras.

Uma **rocha ígnea** é composta por minerais primários² de cores claras, como o quartzo, a muscovita e os feldspatos, e por aqueles de coloração escura, como a biotita, a augita e a hornblenda. Os grãos de minerais intercalados nas rochas ígneas estão dispersos aleatoriamente, algumas vezes parecendo pequenos grãos brancos e escuros, como uma mistura de “sal e pimenta-do-reino”. Em geral, os minerais de cores escuras contêm ferro e magnésio e são intemperizáveis com mais facilidade que os de cor clara.

As **rochas sedimentares** se formam quando os produtos do intemperismo são liberados de outras rochas mais antigas ou quando elas são desgastadas e depositadas pela água como sedimentos que, então, podem se reconsolidar em uma nova rocha. Por exemplo, as areias de quartzo, oriundas do intemperismo do granito, e depositadas próximo à margem de um mar da pré-história, podem vir a ser cimentadas (tanto pelo cálcio como pelo ferro, antes dissolvidos na água), para se transformarem em uma massa sólida denominada arenito. Da mesma forma, as argilas podem se compactar transformando-se em um folhelho. A resistência de uma rocha sedimentar ao intemperismo é determinada tanto pelo tipo dos seus minerais dominantes como pelo agente cimentante. As rochas sedimentares são o tipo mais comum, abrangendo cerca de 75% da superfície Terra.

As **rochas metamórficas** são formadas a partir de outras rochas, por um processo de modificação denominado *metamorfismo*. Com o deslocamento das placas continentais da Terra, que às vezes colidem entre si, surge uma força capaz de elevar grandes cadeias de montanhas ou empurrar imensas camadas de rochas para as profundezas da crosta terrestre. Esse movimento submete as rochas ígneas e sedimentares a elevados níveis de calor e pressão. Essa força pode comprimir as rochas de forma lenta e parcial, além de causar a fusão e a distorção delas, e também alterar as ligações químicas dos seus materiais originais. As rochas ígneas, como o granito, podem ser modificadas para formar o gnaisse – uma rocha metamórfica cujos minerais claros e escuros foram reposicionados em bandas. As rochas sedimentares, como as do tipo calcário e folhelho, podem ser metamorfasadas em mármore e ardósias, respectivamente. A ardósia pode ser ainda mais metamorfasada, transformando-se em filito ou xisto, os quais normalmente apresentam mica que foi cristalizada durante o metamorfismo.

As rochas metamórficas são normalmente mais duras e mais bem cristalizadas do que as rochas sedimentares das quais se formaram. Certos tipos de minerais que predominam em uma determinada rocha metamórfica influenciam seu grau de resistência ao intemperismo químico (Tabela 2.1 e Figura 2.1).

² Os minerais primários não foram alterados quimicamente desde que se formaram de uma lava derretida e depois solidificada. Os *minerais secundários* são produtos recristalizados da decomposição química e/ou alteração de minerais primários.

Animações ilustrando a formação das rochas (clique em “Chapter 6”): www.classzone.com/books/earth_science/terc/navigation/visualization.cfm

Como se formam as rochas metamórficas, California State University, Estados Unidos: <http://seis.natsci.csulb.edu/bperry/ROCKS.htm>

Tabela 2.1 Seleção de minerais encontrados nos solos, listados em ordem de aumento da resistência ao intemperismo, sob condições prevalentes em regiões temperadas úmidas

Minerais primários		Minerais secundários		
		Gipsita	CaSO ₄ · 2H ₂ O	Menos resistente ↑ ↓ Mais resistente
		Calcita ^a	CaCO ₃	
		Dolomita ^a	CaCO ₃ · MgCO ₃	
Olivina	Mg,FeSiO ₄			
Anortita	CaAl ₂ Si ₂ O ₈			
Augita ^b	Ca ₂ (Al,Fe) ₄ (Mg,Fe) ₄ Si ₆ O ₂₄			
Hornblenda ^b	Ca ₂ Al ₂ Mg ₂ Fe ₃ Si ₆ O ₂₂ (OH) ₂			
Albita	NaAlSi ₃ O ₈			
Biotita	KAl(Mg,Fe) ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂			
Ortoclásio	KAlSi ₃ O ₈			
Microclina	KAlSi ₃ O ₈			
Muscovita	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂			
		Argilominerais	Aluminossilicatos	
Quartzo	SiO ₂	Gibbsita	Al ₂ O ₃ · 3H ₂ O	
		Hematita	Fe ₂ O ₃	
		Goetita	FeOOH	

^a Em pradarias semiáridas, a dolomita e a calcita são mais resistentes ao intemperismo do que o mostrado na tabela, por causa das baixas taxas de intemperismo ácido.

^b A fórmula apresentada é aproximada, porque o mineral é muito variável em sua composição.

Intemperismo: um caso geral

O intemperismo é um processo bioquímico que implica tanto na destruição como na síntese de minerais. No diagrama do intemperismo (Figura 2.3) – olhando da esquerda para a direita –, as rochas e os minerais de originais são alterados tanto por *desintegração física* como por *decomposição química*. A desintegração física pode fragmentar as rochas tanto em pedaços menores (sem afetar significativamente sua composição) como em partículas de areia e silte, cada uma delas normalmente formada por um só mineral. Ao mesmo tempo em que os minerais se decompõem quimicamente, eles liberam materiais solúveis que servem para sintetizar novos minerais, alguns dos quais são produtos finais muito resistentes. Esses novos minerais se formam por neossíntese, tanto a partir de alterações químicas menores, como por decomposição química completa do mineral original. Durante as mudanças químicas, o tamanho das partículas continua a diminuir, e os componentes continuam a se dissolver na solução aquosa que contém os produtos do intemperismo. As substâncias dissolvidas podem se recombinar em novos minerais (secundários), deixar o perfil junto com a água de drenagem ou, ainda, ser absorvidas pelas raízes das plantas.

Os minerais que mais permanecem nos solos bem-intemperizados estão incluídos em três dos grupos mostrados no lado direito da Figura 2.3: (1) argilas silicatadas, (2) produtos finais muito resistentes, óxidos de ferro e alumínio, incluindo as argilas oxídicas e (3) minerais primários muito resistentes, como o quartzo. Em solos muito intemperizados, de regiões úmidas tropicais e subtropicais, os óxidos de ferro e de alumínio e certos argilominerais com baixa relação Si/Al predominam, porque a maioria dos outros constituintes foram alterados e removidos.

Animação sobre os aspectos gerais do intemperismo:
www.uky.edu/AS/Geology/howell/goodies/elearning/module07swf.swf

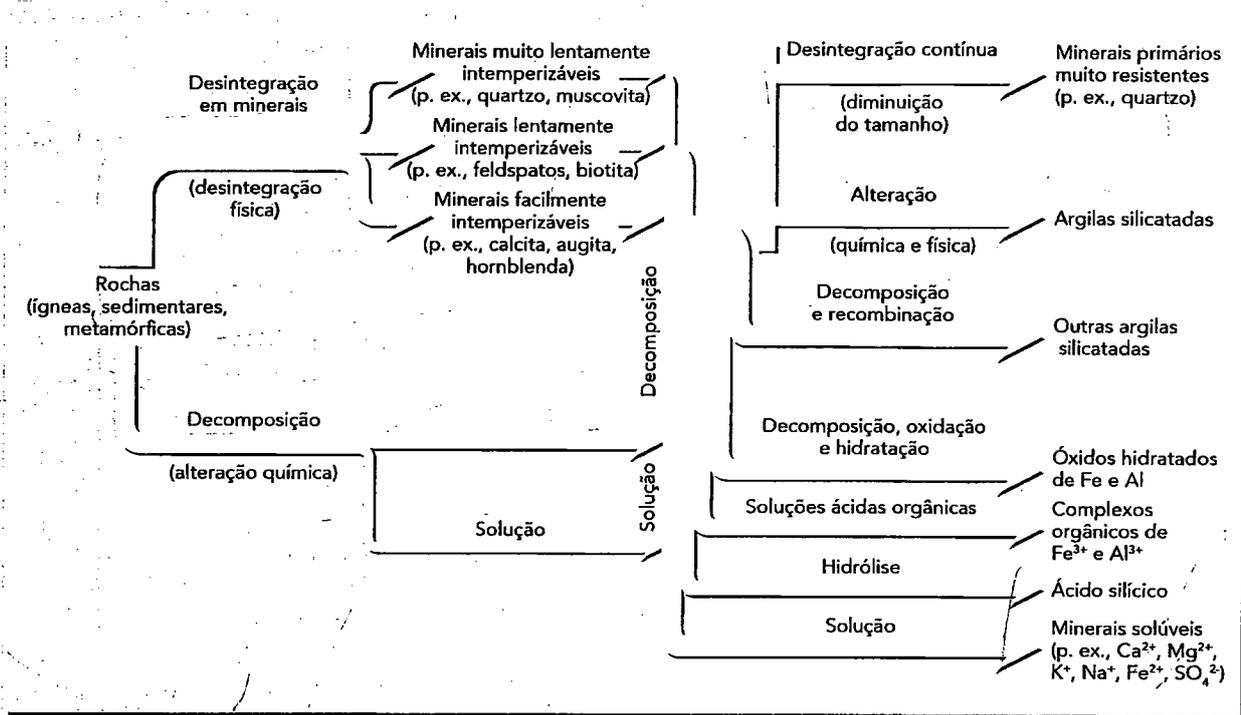


Figura 2.3 Sequências mostrando as vias de intemperismo que ocorrem sob condições moderadamente ácidas, comuns em regiões de clima temperado úmido. A desintegração de rochas em pequenos grãos minerais individuais é um processo físico, enquanto a decomposição, a recombinação e a dissolução são processos químicos. A alteração dos minerais inclui processos físicos e químicos. Note que os minerais primários resistentes, os minerais secundários recém-sintetizados e os materiais solúveis são produtos do intemperismo. Em regiões áridas predominam os processos físicos, mas em áreas tropicais úmidas a decomposição e a recombinação são os processos mais importantes. (Diagrama: cortesia de N. C. Brady)

Intemperismo físico (desintegração)

Temperatura O aquecimento das rochas, provocado pela luz solar ou por incêndios, leva à expansão dos minerais que as constituem. Como alguns minerais expandem mais do que outros, várias mudanças de temperatura criam diferentes tensões que, por fim, podem causar a fragmentação das rochas.

Já que a superfície externa das rochas frequentemente permanece mais quente ou mais fria do que as porções mais protegidas dos seus interiores, algumas rochas podem se intemperizar por **esfoliação**, que é a desintegração em camadas das suas partes externas (Figura 2.4). Esse processo pode ser acelerado com a formação de gelo dentro das rachaduras externas. Quando a água se congela, expande-se com uma força de cerca de 1.465 Mg/m^2 , desintegrando enormes massas de rocha e desalojando alguns grãos de minerais dos fragmentos menores.

Abrasão por água, gelo e vento A água, quando transporta sedimentos, tem um enorme poder de erosão, como é amplamente comprovado pelos vales, desfiladeiros e ravinas existentes no mundo. O arredondamento das rochas do leito dos rios e os grãos de areia das praias são mais uma prova da abrasão provocada pela água em movimento.

As poeiras e areias transportadas pelo vento também podem desgastar as rochas por abrasão, como pode ser visto nas pitorescas formações rochosas arredondadas de certas regiões áridas. Enormes massas de gelo, que se moveram em áreas que foram objeto de glaciação, trituraram e incorporaram fragmentos de rocha e solo, transportando grandes quantidades desses materiais.



Figura 2.4 À esquerda: intemperismo esferoidal, formando camadas concêntricas em razão do processo denominado esfoliação. Uma combinação de fenômenos físicos e químicos promovem a fragmentação mecânica que, por sua vez, produz camadas de folhas sobrepostas que se assemelham às de um repolho. À direita: bandas concêntricas de cores claras e escuras indicam que o intemperismo químico (oxidação e hidratação) ocorre de fora para dentro, produzindo compostos de ferro com diferentes cores. (Fotos: cortesia de N. C Brady, à esquerda; e R. Weil, à direita)

Plantas e animais Em alguns casos, as raízes das plantas penetram nas fendas das rochas, forçando-as a se abrirem – o que resulta em sua parcial desintegração. As escavações feitas por animais também podem ajudar as rochas a se desintegrarem. No entanto, essas influências são de pouca importância na produção do material de origem, quando comparadas aos marcantes efeitos físicos da água, do gelo, do vento e das mudanças de temperatura.

Intemperismo biogeoquímico

Enquanto o intemperismo físico é mais acentuado em ambientes muito frios ou muito secos, as reações químicas são mais intensas onde o clima é úmido e quente. No entanto, ambos os tipos de intemperismo ocorrem juntos, e um tende a acelerar o outro. Por exemplo, a abrasão física (pelo atrito) diminui o tamanho das partículas e, portanto, aumenta a sua superfície, tornando-as mais suscetíveis às rápidas reações químicas.

O intemperismo químico é reforçado pela presença de *agentes geológicos*, como a água e o oxigênio, assim como por *agentes biológicos*, como os ácidos produzidos pelo metabolismo dos micro-organismos e das raízes das plantas. Por isso, o termo **intemperismo biogeoquímico** é frequentemente usado para descrever esses processos. Em conjunto, esses agentes transformam os minerais primários (p. ex., feldspatos e micas) em minerais secundários (p. ex., argilas e carbonatos), bem como liberam os nutrientes das plantas em formas solúveis (Figura 2.3). A água e o oxigênio desempenham papéis muito importantes nas reações químicas do intemperismo.

A atividade de micro-organismos também tem um papel fundamental. Se não houvesse organismos vivos na Terra, os processos de intemperismo químico, provavelmente, teriam acontecido 1.000 vezes mais lentamente, resultando no desenvolvimento de poucos (ou nenhum) solos em nosso planeta.

2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM A FORMAÇÃO DO SOLO³

No Capítulo 1, aprendemos que o solo pode ser entendido como uma coleção de *indivíduos solo*, cada qual tendo um perfil com suas próprias características. Esse conceito de solos, como corpos naturais organizados, foi inicialmente proposto a partir de estudos de campo durante

³ Muitos dos nossos modernos conceitos sobre os fatores de formação do solo advêm das obras de Hans Jenny (1941 e 1980) e de E.W. Hilgard (1921), estudiosos norte-americanos do solo cujos livros são considerados clássicos neste ramo de estudo.

o século XIX, por uma equipe de cientistas russos, brilhantemente liderada por V. V. Dukochaev. Eles observaram a existência de camadas semelhantes em perfis de solos separados por centenas de quilômetros, onde o clima e a vegetação eram também semelhantes. Tais observações e muitas pesquisas subsequentes, tanto no campo como no laboratório, levaram à identificação de cinco fatores principais que controlam a formação dos solos:

1. *Material de origem*: precursores geológicos ou orgânicos do solo
2. *Clima*: com destaque para a precipitação pluvial e a temperatura
3. *Biota* (incluindo os seres humanos): a vegetação nativa, os organismos vivos (especialmente os micróbios), os animais do solo e, cada vez mais, os seres humanos
4. *Relevo (ou topografia)*: inclinação, aspecto e posição do terreno
5. *Tempo*: o período desde que os materiais de origem começaram a se transformar em solo

De acordo com esses fatores, os solos vêm sendo definidos como uma coleção de corpos naturais condicionados, durante longos períodos de tempo, pela ação integrada do clima, do relevo e dos organismos que atuam sobre o material de origem; por isso, possuem propriedades pedogenéticas específicas que lhes permitem, principalmente, sustentar a vegetação.

Os cinco fatores de formação do solo:
www.soils.umn.edu/academics/classes/soil2125/doc/slab2sff.htm

Examinaremos agora como cada um desses cinco fatores interfere na formação do solo. No entanto, à medida que o fizermos, deveremos ter em mente que eles não exercem suas influências de forma independente; na verdade, a interdependência é a regra. Por exemplo, os regimes climáticos contrastantes condicionam, e estão associados, aos tipos também contrastantes de vegetação, como também às mudanças no relevo e possivelmente ao material de origem. No entanto, em certas situações, um dos fatores atua de forma predominante, condicionando as diferenças existentes em um conjunto de solos. Os estudiosos do solo referem-se a tais conjuntos como **litossequência**, **climossequência**, **biossequência**, **topossequência** ou **cronossequência**.

2.3 MATERIAIS DE ORIGEM

Os processos geológicos trouxeram para a superfície da Terra numerosos materiais de origem a partir dos quais os solos se formaram (Figura 2.5). A natureza desses materiais de origem influenciou profundamente as características do solo. Por exemplo, um solo pode herdar uma textura arenosa (Seção 4.2) a partir de um material constituído de partículas grosseiras e rico em quartzo, como o arenito ou o granito. A textura do solo, por sua vez, ajuda a controlar a percolação da água através do seu perfil, afetando assim a translocação de suas partículas finas e dos nutrientes das plantas.

Deposição de materiais de origem:
<http://sis.agr.gc.ca/cansis/taxa/genesis/pmdep/ontario.html>

A composição química e mineralógica do material de origem influencia o intemperismo químico e a vegetação natural. Por exemplo, a presença de calcário em um material de origem vai retardar o desenvolvimento da acidez que normalmente ocorre em climas úmidos.

A natureza do material de origem influencia os tipos de argilas que se formam quando o solo se desenvolve (Seção 8.5). O material de origem também pode conter argilominerais, provavelmente formados em um ciclo anterior de intemperismo. Por sua vez, a natureza dos minerais de argila presentes afeta muito o tipo de solo que se desenvolve.

Classificação dos materiais de origem

Os materiais de origem mineral podem ser formados no local (*in situ*), como se fossem um manto residual intemperizado da rocha, ou podem ser transportados do local onde se formaram para serem depositados em outro lugar (Figura 2.6). Em ambientes úmidos (como

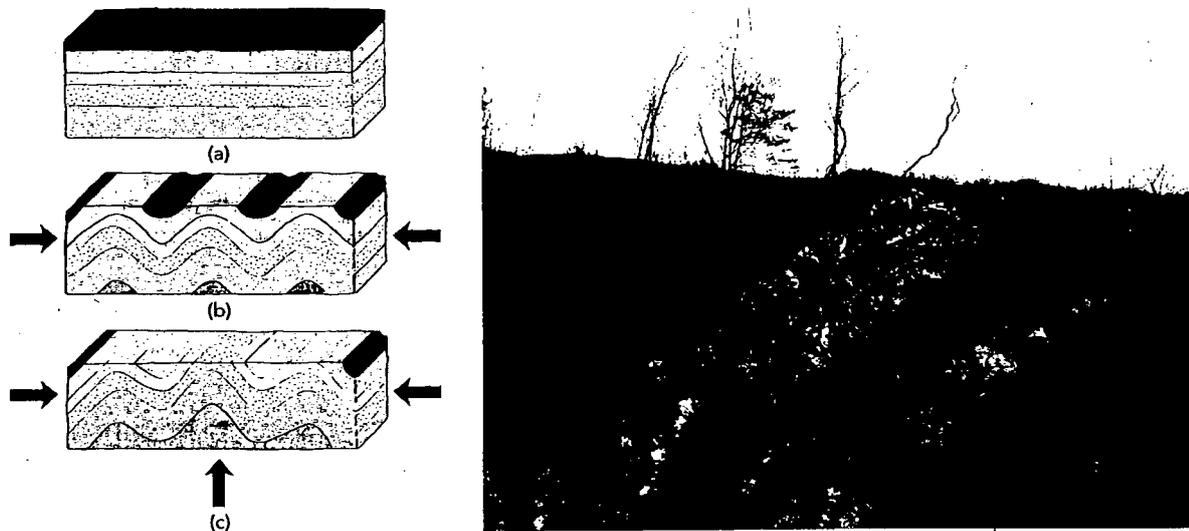


Figura 2.5 Diagramas mostrando como os processos geológicos trouxeram diferentes camadas de rocha para a superfície da Terra em uma determinada região. (a) Camadas inalteradas de rochas sedimentares, com apenas uma delas, a mais elevada, exposta. (b) Pressões geológicas laterais deformam as camadas de rocha por intermédio de um processo chamado de *deformação crustal*; ao mesmo tempo, a erosão remove grande parte da camada superior, expondo assim parte da primeira camada subjacente. (c) Pressões localizadas ascendentes causam modificações em todas as camadas, expondo mais duas camadas subjacentes. Depois que essas quatro camadas de rocha são intemperizadas, elas dão origem aos materiais de origem a partir dos quais diferentes tipos de solos podem se formar. À direita: deformação crustal, a qual soergueu as Montanhas Apalachianas do leste norte-americano, inclinando suas formações rochosas sedimentares – que tinham sido originalmente depositadas em camadas horizontais. Este corte de estrada no Estado da Virgínia (EUA) ilustra algumas mudanças abruptas nos materiais de origem do solo (litossequência), que podem ser percebidas quando se caminha na superfície situada na parte mais elevada do local onde esta foto foi tirada. (Foto: cortesia de R. Weil)

pântanos e charcos), a decomposição incompleta pode fazer com que certos materiais de origem orgânica se acumulem a partir de resíduos de muitas gerações de vegetação. Embora os materiais de origem sejam classificados por suas propriedades químicas e físicas, eles também podem ser classificados de acordo com o modo como foram depositados – o que pode ser observado no lado direito da Figura 2.6.

Apesar de esses termos se relacionarem apenas à forma de deposição do material de origem, as pessoas, em geral, se referem aos solos que se formam a partir desses depósitos como *solos orgânicos*, *solos glaciais*, *solos aluviais* e assim por diante. Esses termos são pouco específicos, não só porque as propriedades do material de origem variam amplamente dentro de cada grupo, como também por o efeito do material de origem ser modificado pela influência do clima, dos organismos, do relevo e do tempo.

Materiais de origem residuais

Os **materiais de origem residuais** desenvolvem-se pelo intemperismo da rocha subjacente. Em superfícies mais estáveis, eles podem ter sofrido longo e, possivelmente, intenso intemperismo. Onde o clima é quente e muito úmido, os materiais de origem residuais mais representativos estão completamente lixiviados e oxidados; por isso, apresentam vários compostos de ferro oxidado e têm cores vermelhas e amarelas (Pranchas 9, 11 e 15). Em climas mais frios, principalmente quando também mais secos, a composição química e a cor do material de origem residual tendem a ser mais semelhantes às da rocha da qual ele se formou.

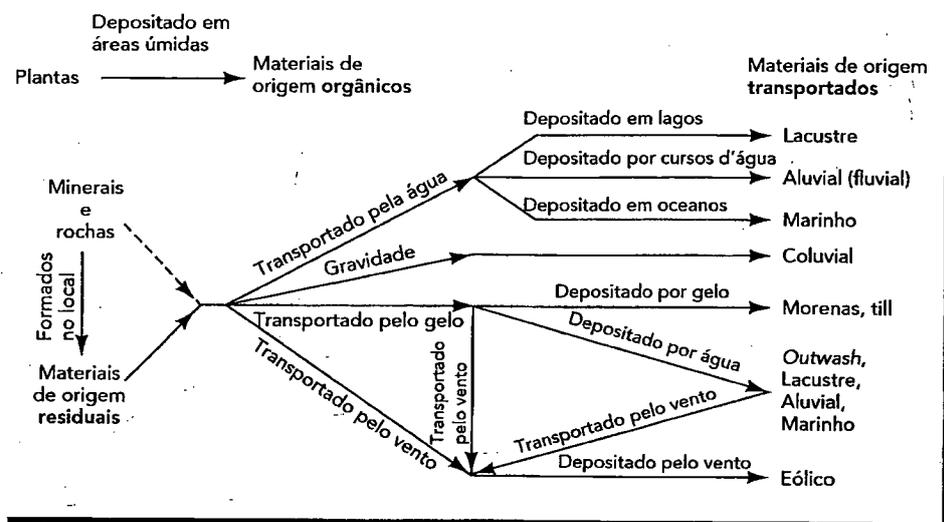


Figura 2.6 Como vários tipos de materiais de origem são formados, transportados e depositados.

Os materiais residuais são amplamente distribuídos em todos os continentes. O mapa fisiográfico dos Estados Unidos (Figura 2.7) mostra nove grandes províncias onde os materiais residuais são mais comuns (veja, no mapa, as áreas indicadas pelos números 3, 4, 5, 9, 10, 14, 18, 19 e 20).

Uma grande variedade de solos ocupa as regiões marcadas pelos materiais detríticos residuais por causa da acentuada diversidade na natureza das rochas, a partir das quais esses materiais evoluíram. A variação nos solos é também um reflexo de outras grandes diferenças em outros fatores de formação dos solos, como o clima e a vegetação (Seções 2.4 e 2.5).

Detritos colúviais

Os detritos colúviais, ou **colúvios**, são compostos de fragmentos de rocha heterogêneos (mal-selecionados) que foram destacados das partes mais elevadas do relevo e carregados por gravidade pelas encostas abaixo; em alguns casos, a ação do congelamento influencia esses depósitos. São bons exemplos os taludes de fragmentos de rocha depositados nos sopés das encostas (tálus), os detritos de penhascos e outros materiais heterogêneos. As avalanches são, em grande parte, compostas por sedimentos desse tipo.

Os materiais originários constituídos de detritos colúviais costumam ser grosseiros e pedregosos, porque neles predominou o intemperismo físico sobre o químico. Esses fragmentos mais grosseiros – pedras e cascalhos – são bastante arestados e estão intercalados com materiais mais finos (mas não em camadas). Quando os fragmentos de rochas caem e depositam-se uns sobre os outros (às vezes, com as faces maiores inclinadas), formam espaços vazios que ajudam a explicar a boa drenagem de muitos depósitos colúviais e também sua tendência à instabilidade e propensão a quedas e deslizamentos, especialmente se afetados por escavações.

Depósitos aluviais

Planícies de inundação Os cursos d'água podem depositar três classes gerais de materiais de origem: *planícies de inundação*, *leques aluviais* e *deltas*. A planície de inundação é a porção de um vale do rio que é inundada durante as cheias (também chamada de leito maior). Os sedimentos transportados pela corrente são depositados durante as inundações; seus materiais mais grosseiros depositam-se perto do canal (ou leito menor) do rio, onde a água é mais profunda e

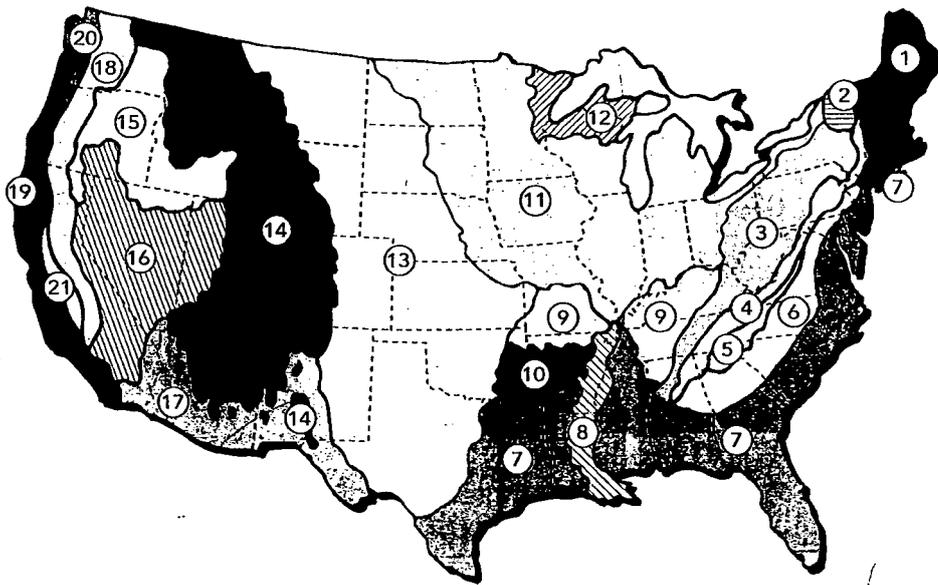


Figura 2.7 Mapa generalizado da fisiografia e dos rególitos dos Estados Unidos. As regiões são as seguintes:

- | | | |
|--|--|--|
| 1. Nova Inglaterra: predomínio de rochas glaciais e metamórficas. | 9. Terras altas de calcários: predomínio de folhelhos e calcários. | 16. Grande Depressão: cascalhos, areias, leques aluviais; rochas ígneas e sedimentares. |
| 2. Adirondacks: rochas sedimentares e glaciais metamorfizadas. | 10. Terras altas de arenitos: predomínio de arenitos e folhelhos. | 17. Região árida do sudoeste: cascalhos, areia e outros detritos do deserto e de montanha. |
| 3. Montanhas e Planaltos Apalachianos: folhelhos e arenitos. | 11. Planícies centrais: predomínio de rochas glaciais sedimentares com till e loess. | 18. Serra Nevada e Montanhas Casca-des: rochas ígneas e vulcânicas. |
| 4. Vales e cordilheiras de calcários: predomínio de rochas calcárias. | 12. Terras altas do Lago Superior: rochas metamórficas e glaciais sedimentares. | 19. Província da Costa do Pacífico: predomínio de rochas sedimentares. |
| 5. Montanhas Blue Ridge: arenitos e folhelhos. | 13. Região das Grandes Planícies: rochas sedimentares. | 20. Terras baixas do Puget Sound: rochas glaciais sedimentares. |
| 6. Planalto de Piedmont: rochas metamórficas. | 14. Região das Montanhas Rochosas: rochas sedimentares, metamórficas e ígneas. | 21. Vale central da Califórnia: alúvios e depósitos glaciais de planície (outwash). |
| 7. Planícies costeiras do Atlântico e do Golfo: sedimentos inconsolidados; areias, argilas e siltes. | 15. Região entremontana do noroeste: predomínio de rochas ígneas; loess na bacia dos rios. | |
| 8. Planície fluvial e delta do Mississippi: alúvios. | | |

flui com mais turbulência e energia. Os materiais mais finos se decantam nas águas mais calmas e mais distantes do canal. Cada episódio de grandes inundações estabelece uma camada característica de sedimentos, criando uma estratificação característica dos solos aluviais (Figura 2.8).

Se, depois de certo tempo, houver uma mudança gradiente (ou rebaixamento do nível de base) do canal, o seu leito poderá escavar os seus depósitos aluviais já bem formados. Essa ação forma **terraços** acima da planície de inundação, em um ou em ambos os lados. Com frequência, dois ou mais terraços de alturas diversas poderão ser vistos ao longo de certos vales, revelando as épocas em que o curso d'água se encontrava naqueles níveis.

Os solos desenvolvidos de sedimentos aluviais geralmente têm características consideradas como desejáveis para a agricultura e a urbanização. Essas características incluem relevo quase plano, proximidade com a água, alta fertilidade e elevada produtividade. Entretanto, o uso de solos de planícies de inundação para moradias e desenvolvimento urbano deve ser evitado. Nos últimos anos, muitas inundações catastróficas têm mostrado que as construções efetuadas em uma várzea, não importando quão vultoso seja o investimento em medidas de controle de

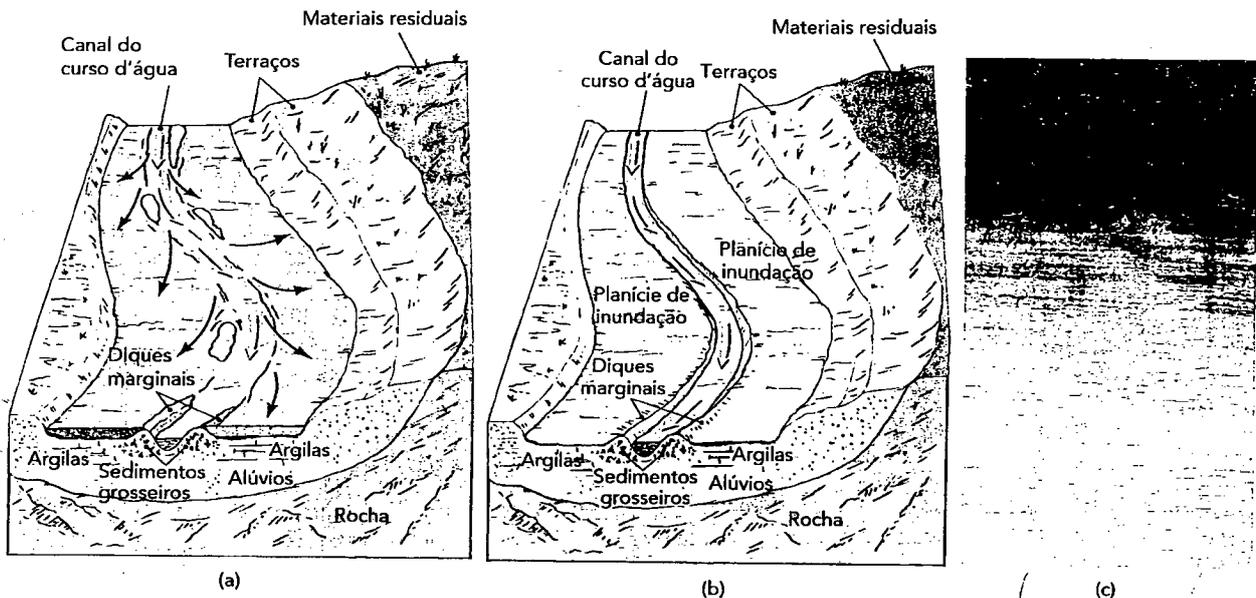


Figura 2.8 Diagrama mostrando a formação de uma planície de inundação. (a) Durante uma fase de inundação, o rio transborda, depositando sedimentos na várzea. As partículas grosseiras são depositadas bem próximo do fluxo do canal onde a água está fluindo com maior velocidade, enquanto as partículas finas se decantam onde a água está se movendo mais lentamente. (b) Depois da inundação, os sedimentos permanecem depositados no local, e a vegetação cresce sobre eles. (c) Perfil de um solo desenvolvendo-se em uma planície de inundação do rio Mississippi (EUA), mostrando camadas delgadas contrastantes de sedimentos de areia e silte no horizonte C – cada camada resultou de um único episódio de inundação. (Diagramas e foto: cortesia de R. Weil)

enchentes, muitas vezes levam à trágica perda de vidas e bens materiais durante essas inundações. Em muitas áreas, a instalação de sistemas de drenagem e de proteção contra inundações foi muito dispendiosa, mas ineficaz. Portanto, algumas providências devem ser tomadas para restabelecer as condições originais de muitas dessas planícies de inundação, originalmente terras úmidas que foram transformadas em áreas agrícolas. Esses e outros solos aluviais podem fornecer *habitats* naturais, como as florestas hidrófilas, que podem produzir muita madeira e suportar uma grande diversidade de pássaros e outros animais selvagens.

Leques aluviais São formados por cursos d'água temporários que descem de terras altas por meio de um estreito vale e, repentinamente, encontram uma brusca mudança de gradiente ao atingirem níveis mais baixos (Figura 2.9). Eles formam, assim, um depósito de sedimentos, denominado leque aluvial. A água corrente tende a selecionar as partículas dos sedimentos por tamanho, depositando, em forma de leque e em direção à borda, primeiramente cascalhos e areia grossa e, em seguida, materiais mais finos. Os solos derivados desses detritos aluviais muitas vezes são bastante produtivos, embora possam ser de textura bastante grosseira.

Depósitos de deltas Em alguns sistemas fluviais, grandes quantidades de material em suspensão se depositam perto da foz do rio, formando um delta. Comumente, o delta é uma continuação da planície de inundação (a parte frontal, por assim dizer) e, devido à sua natureza argilosa, costuma ser maldrenado.

Os marismas dos deltas estão entre os mais extensos e biologicamente importantes *habitats* de terras úmidas. Muitos desses *habitats* estão sendo, hoje, protegidos ou restaurados; mas as civilizações antigas, e também as modernas, neles desenvolveram importantes áreas agrícolas (muitas vezes, reservadas para a produção de arroz) por meio da implantação de drenos e do controle das enchentes – como aconteceu nos deltas de rios como o Eufrates, Ganges, Amarelo, Mississippi, Nilo, Pó e Tigre.

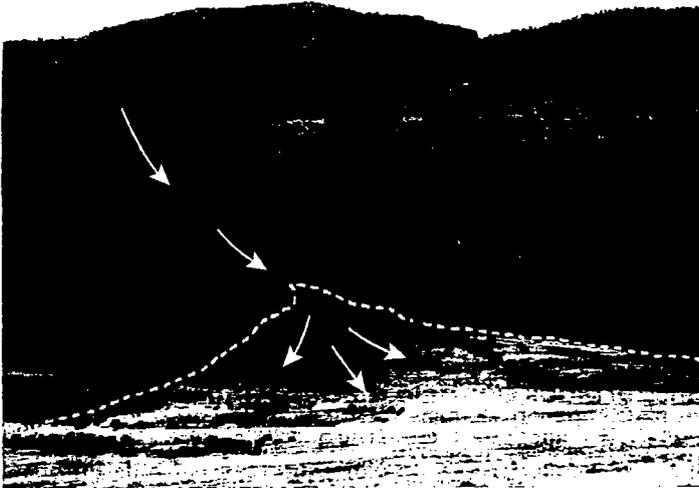


Figura 2.9 Um leque aluvial caracteristicamente moldado em um vale no centro do Estado de Nevada (EUA). Embora as áreas de leques aluviais sejam geralmente pequenas e inclinadas, ainda assim podem conter solos bem-drenados e produtivos – podendo ser aproveitados para a agricultura. As setas indicam as direções dos fluxos d’água. (Foto: cortesia de R. Weil)

Sedimentos marinhos

Grande parte dos sedimentos transportados pela ação dos cursos d’água acaba sendo depositada nos estuários e golfos: os fragmentos maiores, próximos das praias; as partículas mais finas, mais distantes (Figura 2.10). Durante longos períodos de tempo, esses sedimentos se acumularam debaixo d’água e, em alguns casos, têm centenas de metros de espessura. Mudanças relativas nas elevações dos níveis do mar e da terra podem depois soerguer esses depósitos marinhos acima do nível do mar, criando uma planície de sedimentos costeiros. Tais depósitos ficam, então, sujeitos a um novo ciclo de intemperismo e formação do solo.

Normalmente, uma planície costeira só tem declives moderados, sendo mais plana nas partes baixas perto da costa e mais declivosa no interior, onde rios e córregos, que fluem para as partes inferiores, formam uma paisagem mais dissecada. A superfície das terras, situadas na parte

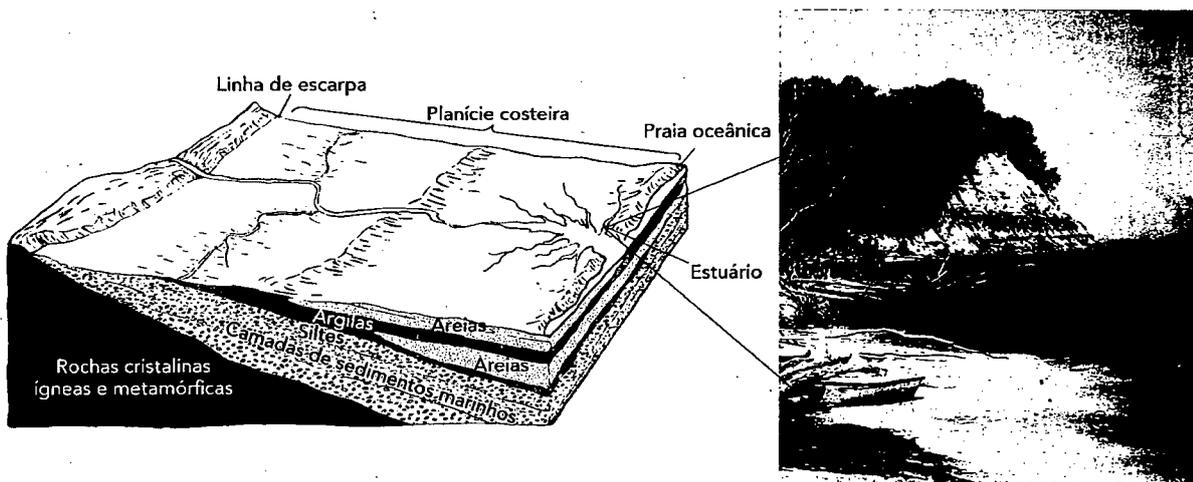


Figura 2.10 Diagrama mostrando sedimentos que foram trazidos das colinas do continente para as regiões costeiras e depositados em águas marinhas. O diagrama representa a planície costeira emersa, situada no sudeste dos Estados Unidos, onde tais sedimentos cobrem rochas ígneas e metamórficas mais antigas. Ao longo do tempo, mudanças na posição da linha de costa, bem como nas correntes, originaram camadas (estratos) de sedimentos alternadamente compostos de argila, silte, areia grossa e cascalho. A foto mostra essas camadas de sedimentos marinhos no litoral, ao longo da Baía de Chesapeake, em Maryland, EUA. (Diagrama e foto: cortesia de R. Weil)

inferior da planície costeira, pode estar apenas um pouco acima do lençol freático durante parte do ano, formando, assim, terras úmidas com vegetação arbustiva ou florestal características.

Depósitos marinhos e outros depósitos costeiros têm texturas bastante variáveis. Alguns são arenosos, como é o caso, em grande parte, da planície costeira próxima do litoral Atlântico dos Estados Unidos. Outros depósitos são ricos em argila, como os encontrados nas várzeas do Golfo do México e nas baixas florestas de pinheiros dos Estados do Alabama e Mississippi (EUA). Nos locais em que a água dos rios cortaram as camadas de sedimentos marinhos (como no bloco-diagrama ilustrado na Figura 2.10), argilas, siltes e areias podem ser encontrados lado a lado. Uma vez que a água do mar é rica em enxofre, muitos sedimentos marinhos são também ricos nesse elemento e passam por um período de formação de ácidos, decorrente da oxidação do enxofre, em algum estágio da formação do solo (Seção 9.6 e Prancha 109).

Materiais de origem transportados por gelo glacial e águas de degelos

Durante o Pleistoceno (cerca de 10^4 a 10^7 anos atrás), estima-se que 20% das terras do mundo – compreendendo a parte norte da América do Norte, norte e centro da Europa e partes do norte da Ásia – foram invadidas por uma sucessão de grandes coberturas de gelo, algumas com mais de 1 km de espessura. As atuais geleiras das regiões polares e das altas montanhas cobrem hoje cerca de um terço dessa área, mas não são tão espessas como eram as do grande período glacial do Pleistoceno. Mesmo assim, se a atual tendência paulatina de aquecimento global continuar, essas geleiras, em grande parte, irão derreter, causando um significativo aumento do nível do mar e a inundação das áreas costeiras do mundo inteiro.

À medida que o gelo glacial foi se movendo, grande parte do manto de solo do regolito existente à sua frente foi removido; morros foram arredondados, vales preenchidos e, em alguns casos, rochas subjacentes foram severamente arrancadas e/ou trituradas. Dessa forma, as geleiras encheram-se de fragmentos de rochas, muitos dos quais foram carregados dentro da massa de gelo, e outros, empurrados à sua frente (Figura 2.11). Finalmente, por ocasião do degelo e do conseqüente recuo das geleiras, um manto de material residual glacial (*drift*) permaneceu no local ou foi deslocado pelo vento. Isso fez com que surgissem novos materiais de origem e novos regolitos para a formação de novos solos.

Till e depósitos associados O nome *depósitos glaciais* (*drift*) é aplicado a todos os sedimentos de origem glacial que tenham sido depositados pelo gelo ou pelas águas de seu degelo. Os materiais depositados diretamente pelo gelo, chamados de **till**, são heterogêneos (não estrati-

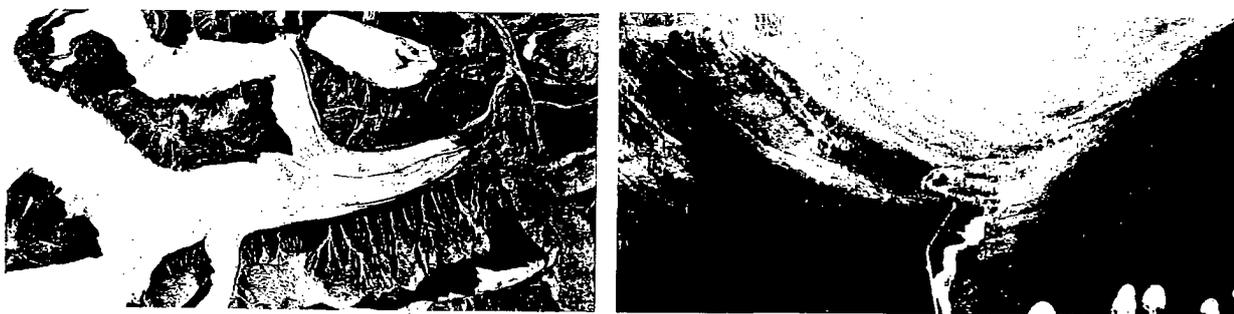


Figura 2.11 À esquerda: extremidades de uma geleira atual, no Canadá. Note a evidência de transporte de materiais pelo gelo e a aparência "reluzente" do principal lóbulo de gelo. À direita: este vale em forma de U, nas Montanhas Rochosas (EUA), demonstra o trabalho das geleiras ao esculpir as formas do terreno. A geleira deixou o vale coberto com sedimentos glaciais do tipo till. Alguns dos materiais arrancados pela geleira foram depositados muitas milhas a jusante do vale. (À esquerda, foto: A-16817-102, cortesia do National Air Photo Library, Surveys and Mapping Branch, Canadian Department of Energy, Mines, and Resources; à direita, foto: cortesia de R. Weil)

Transporte de detritos glaciais por uma geleira alpina:
www.uwsp.edu/geO/faculty/lemke/glacial_processes/MoraineMovie.html

ficados) e constam de uma mistura de resíduos que variam, em tamanho, de pedras a argila. Tais materiais, portanto, podem ter aparência semelhante a dos materiais coluviais, exceto pelo fato de que os fragmentos grossos são mais arredondados por causa de seu transporte e trituração pelo gelo, e os depósitos apresentam-se muito mais densamente compactados, devido ao grande peso das camadas de gelo que lhes estavam sobrepostas. A Figura 2.12 mostra como várias camadas de depósitos glaciais depositaram diversos tipos de materiais de origem do solo, incluindo faixas de amontoados de sedimentos não selecionados (tills), chamados de **morenas**.

Sedimentos fluvioglaciais e lacustres As torrentes de água que brotam do derretimento de geleiras transportam cargas enormes de sedimentos. Nos vales e nas planícies, onde as águas glaciais são capazes de fluir livremente, os sedimentos formam **planícies de sedimentos fluvioglaciais (outwash plains)** (Figura 2.12).

Quando o lóbulo frontal da geleira estaciona e começa a se derreter, não havendo lugar para a água escoar, um represamento se inicia, podendo até formar lagos muito grandes (Figura 2.12). Os **depósitos lacustres** formados nesses lagos glaciais variam de depósitos grosseiros, do tipo deltas e praias perto das margens, até áreas maiores de siltes e argilas, depositados em águas mais profundas, mais para o centro do lago. Áreas de solos naturalmente muito férteis (embora nem sempre bem drenados) se desenvolveram a partir desses materiais quando os lagos secaram.

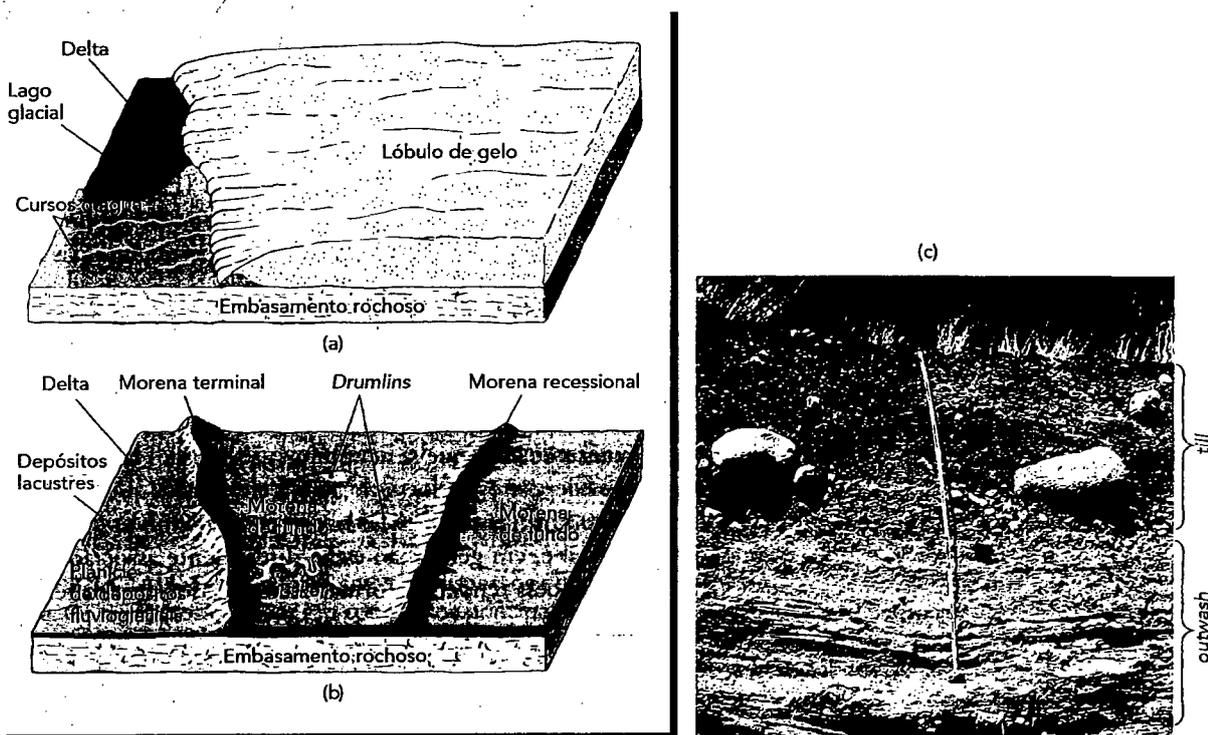


Figura 2.12 Ilustração de como vários materiais glaciais foram depositados. (a) O lóbulo de uma geleira glacial movendo-se para a esquerda e alimentando com água e sedimentos um lago glacial e alguns cursos d'água que estão se formando próximo à sua extremidade. (b) Depois que o gelo recua, as morenas laterais, basais e de fundo ficam descobertas junto com pequenas colinas de formato oval (*drumlins*), leitos dos cursos d'água que fluíam sob a geleira (*eskers*) e depósitos lacustres, deltas, e *outwash*. (c) Os depósitos glaciais estratificados (*outwash*), na parte inferior deste perfil do solo em Dakota do Norte (EUA), estão recobertos por uma camada de *till*, contendo um amontoado de partículas não selecionadas, que variam em tamanho – desde matacões até argilas. Note as bordas arredondadas das rochas: uma prova da ação desgastante dentro da geleira. A escala está marcada a cada 10 cm. (Foto: cortesia de R. Weil)

Materiais de origem transportados pelo vento

O vento é o agente erosivo que pode carregar, de forma mais eficaz, o material do solo ou de regolito que está solto, seco e desprotegido pela vegetação. As paisagens áridas e desnudas servirão, e continuam servindo, como fontes de material de origem para solos formados em locais muito distantes da fonte, mesmo em hemisférios opostos do globo terrestre. Quanto menores as partículas, mais longe o vento consegue carregá-las. Materiais transportados pelo vento (**eólicos**) são importantes como material de origem para a formação do solo e incluem, do maior para o menor tamanho de partículas: **dunas de areia**, **loess** e **aerossóis**. Dignas também de menção, como um caso especial, são as **cinzas vulcânicas** carregadas e depositadas pelo vento.

Dunas de areia Ao longo das praias dos oceanos, dos grandes lagos e dos mais vastos e áridos desertos do mundo, os fortes ventos recolhem grãos de areias médias e finas para depois reuni-los em grandes montes de areia chamados de *dunas*. As areias das praias consistem, principalmente, em quartzo, porque a maioria dos outros minerais foi intemperizada e levada pelas ondas; por isso, o quartzo, além de ser desprovido de nutrientes para as plantas, é altamente resistente às ações intempéricas. No entanto, como ao longo do tempo gramíneas e outras vegetações podem criar raízes nas dunas, elas podem fazer com que nessas areias um novo solo inicie sua formação. Nas areias do deserto também há o predomínio de quartzo, embora seja possível que existam quantidades substanciais de outros minerais que podem contribuir para o estabelecimento da vegetação e para a formação de novos solos, se houver chuva suficiente. As dunas brancas, constituídas de grãos de gesso do tamanho de areias – as chamadas White Sands, no Estado do Novo México (EUA) – são um bom exemplo da existência de minerais intemperizáveis nas areias do deserto.

Loess Os materiais transportados pelo vento, chamados de *loess* (ou *loesse*), são compostos principalmente de partículas do tamanho do silte. Eles cobrem vastas áreas do centro dos Estados Unidos, da Europa Oriental, da Argentina e da China Central (Figura 2.13a). As partículas do loess podem ter sido transportadas pelo vento por centenas de quilômetros, formando depósitos eólicos que foram se tornando mais espessos e com partículas mais finas, à medida que ia aumentando a sua distância da fonte.

Nos Estados Unidos (Figura 2.13b), as principais fontes de loess foram as grandes áreas sem vegetação de tills e *outwashes*, que foram deixadas nos vales dos rios Missouri e Mississippi logo após o recuo das geleiras, no fim da última Era Glacial. Durante os meses de inverno, os ventos deslocavam os materiais finos e os moviam para o sul, cobrindo os solos e os materiais de origem pré-existentes com um manto de loess que se acumulou até 8 m de espessura.

No centro e no oeste da China, os depósitos de loess chegam a ter de 30 a 100 m de profundidade e cobrem cerca de 800.000 km² (Figura 2.14). Esses materiais foram carregados pelo vento dos desertos da Ásia Central e, em geral, não estão diretamente associados com as geleiras. Esses e outros depósitos de loess tendem a formar solos siltosos, muito férteis e potencialmente produtivos.

Poeiras aerossólicas Partículas muito finas (cerca de 1 a 10 μm), transportadas pelo ar em elevadas altitudes, podem se deslocar por milhares de quilômetros antes de serem depositadas, geralmente pelas chuvas. Essas partículas finas são chamadas de *aerossóis*, porque podem permanecer suspensas no ar devido ao seu tamanho muito pequeno. Embora essas poeiras não formem camadas tão espessas cobrindo as superfícies das paisagens que as recebem, como é típico do loess, elas se acumulam em taxas consideradas como significativas para a formação do solo. Grande parte do carbonato de cálcio, em solos do oeste dos Estados Unidos, provavelmente, se originou de poeiras transportadas pelo vento. Estudos recentes têm mostrado que as poeiras originárias do deserto do Saara, no norte da África, e transportadas sobre o Oceano Atlântico na faixa da alta atmosfera

Poeiras cruzando os oceanos, NASA (clique em "China during April of 1998"): <http://toms.gsfc.nasa.gov/aerosols/dust01.html>

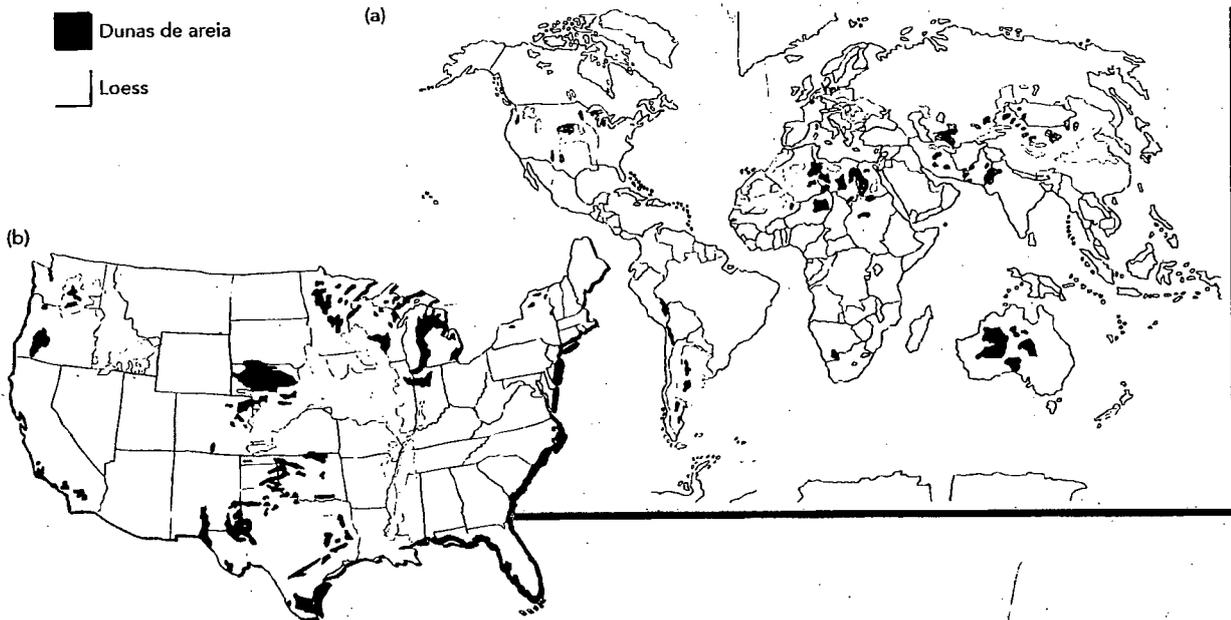


Figura 2.13 (a) Os principais depósitos eólicos do mundo incluem os depósitos de loess da Argentina, da Europa Oriental, do norte da China e das grandes áreas de dunas de areia no norte da África e Austrália. (b) Distribuição aproximada de areias e loess nos Estados Unidos; nessas áreas, os solos que se desenvolveram a partir de loess são geralmente de textura franco-siltosa e muitas vezes com quantidades elevadas de areias finas.

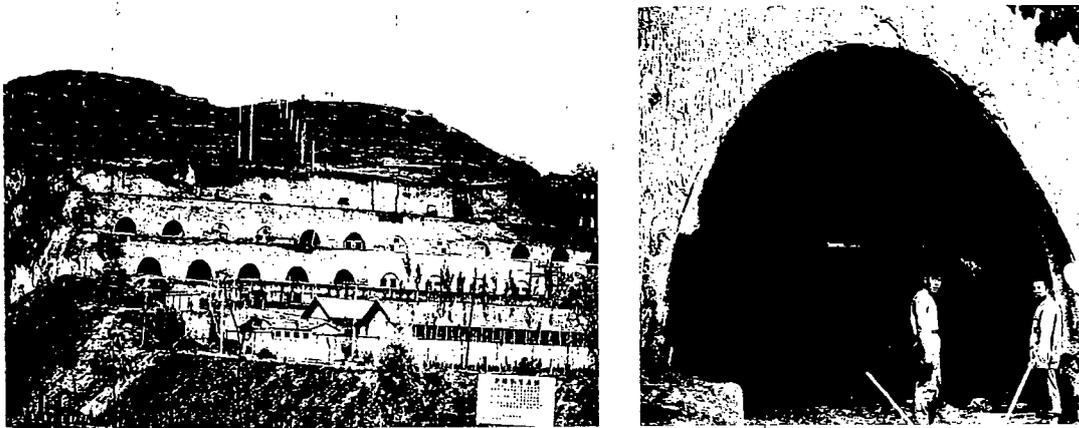


Figura 2.14 Aldeões esculpem casas em espessos depósitos de loess semiconsolidados (loessitos), em Xian, na China. Os depósitos de loess são compostos principalmente de partículas do tamanho de silte, unidas por pequenas quantidades de argila. As argilas, que funcionam como aglutinantes, ajudam a estabilizar o loess quando escavado, mas somente se o material estiver protegido da chuva (esculpido na forma de paredes verticais). As escavações inclinadas desse material podem rapidamente desmoronar e serem lavadas quando saturadas com a água da chuva. Taludes de estrada verticais são, portanto, uma característica comum de paisagens dos loesses em todo o mundo. (Fotos: cortesia de Raymond Miller, University of Maryland, EUA).

(troposfera), são a fonte de grande parte do cálcio e de outros nutrientes encontrados nos solos altamente lixiviados da Bacia Amazônica, na América do Sul. Da mesma forma, na primavera, as ventanias que ocorrem na região do loess da China transportam as poeiras por sobre o Oceano Pacífico e vão se incorporar aos materiais de origem do solo (contribuindo para a poluição do ar) na parte ocidental da América do Norte.

Cinzas vulcânicas Durante as erupções vulcânicas, os materiais piroclásticos são despejados nas imediações dos vulcões e, ao mesmo tempo, as partículas mais finas de cinzas vulcânicas (muitas vezes, vítreas) são carregadas pelo vento, depositando-se depois em extensas áreas. Solos desenvolvidos a partir de cinzas vulcânicas podem ser encontrados a algumas centenas de quilômetros da área dos vulcões existentes ao longo da costa do Oceano Pacífico. Importantes áreas de materiais de origem de cinzas vulcânicas ocorrem no Japão, na Indonésia, na Nova Zelândia, no oeste dos Estados Unidos (no Havaí, em Montana, Oregon, Washington e Idaho), no México, na América Central e no Chile. Os solos formados desses materiais são caracteristicamente leves e porosos e tendem a acumular matéria orgânica com mais rapidez do que outros solos circunvizinhos (Seção 3.7). As cinzas vulcânicas tendem a se intemperizar rapidamente para formar alofanos, um tipo de argila com propriedades pouco comuns (Seção 8.5).

Depósitos orgânicos

Os materiais orgânicos se acumulam em brejos, pântanos, marismas e outros locais muito úmidos, onde a taxa de crescimento das plantas excede a taxa de decomposição dos seus resíduos. Em tais áreas, esses resíduos vêm se acumulando ao longo dos séculos, a partir de plantas hidrófilas, como musgos, juncos, aguapés, assim como alguns arbustos e árvores. Esses resíduos afundam nos corpos d'água, onde a sua decomposição é dificultada devido à carência de oxigênio livre. Como resultado, os depósitos orgânicos muitas vezes se acumulam até vários metros de profundidade (Figura 2.15). Esses depósitos orgânicos, em conjunto, são chamados de **turfas**.

Tipos de materiais turfosos Podemos identificar quatro tipos de turfa, com base na natureza dos materiais de origem:

1. Turfa de musgos: proveniente de restos de musgos, como o *Sphagnum*.
2. Turfa de herbáceas: proveniente de resíduos de plantas herbáceas, como taboas, juncos e aguapés.
3. Turfa de lenhosas: formadas a partir de restos de plantas lenhosas, incluindo árvores e arbustos.
4. Turfa sedimentar: proveniente de restos de plantas aquáticas (p. ex., algas) e de material fecal de animais aquáticos.

Em alguns casos, depois de uma terra úmida ter sido drenada, as turfeiras de lenhosas se transformam em solos agrícolas bastante produtivos, muito apreciados para a produção de hortaliças. Já as turfeiras de musgos, se por um lado têm alta capacidade de retenção de água, por outro tendem a ser bastante ácidas. Geralmente, as turfás sedimentares não são apropriadas para serem usadas como solos agrícolas, pois são compostas de materiais altamente coloidais, compactos e plásticos quando molhados. As turfeiras herbáceas são típicas de pântanos costeiros.

O material orgânico será chamado de **fibrico**, se os resíduos estiverem suficientemente intactos para permitirem que as suas fibras sejam identificadas. Mas, se a maior parte do material se decompôs, restando pouca fibra, o termo **sáprico** será utilizado. Em materiais intermediários, entre os fibrícos e os sápricos (**hêmicos**), apenas algumas das fibras vegetais podem ser reconhecidas.

Depois de termos constatado que os efeitos dos **materiais de origem** nas propriedades do solo são modificados pelas influências combinadas do **clima**, das **atividades biológicas**, do **relevo** e do **tempo**, voltaremos agora a esses outros quatro fatores de formação do solo, começando pelo clima.

Pântanos em processo de extinção: Cornelia Dean, *New York Times* (clique também no vídeo: "A Marsh Mess"): www.nytimes.com/2005/11/15/science/earth/15marsh.html?ex=1289710800&en=debebd7482392dcc&ei=5088&partner=rssnyt&emc=rss

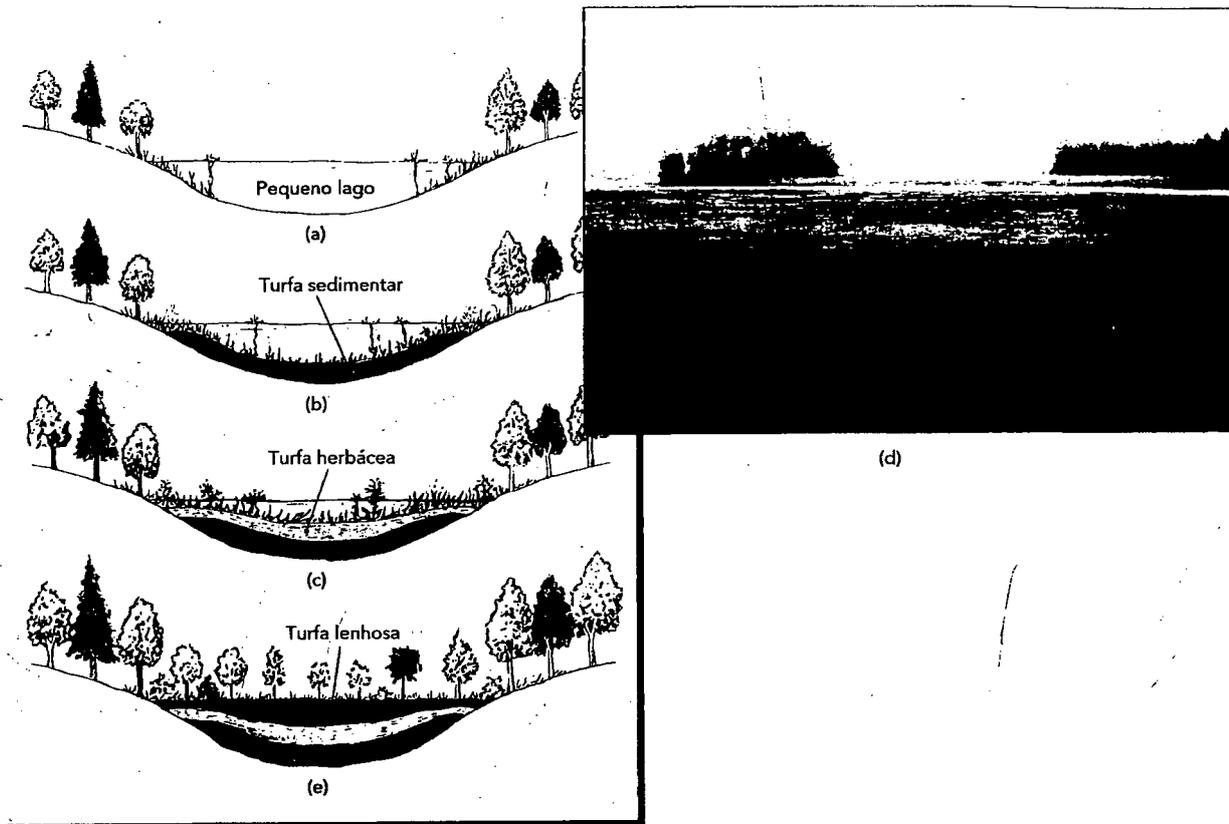


Figura 2.15 Quatro estágios no desenvolvimento de uma típica várzea de turfa lenhosa. (a) Um lago, formado durante a Era Glacial, recebe nutrientes arrastados das terras altas adjacentes; esses nutrientes propiciam o desenvolvimento de plantas aquáticas, principalmente em volta do lago. (b – d) Resíduos orgânicos se depositam no fundo do lago, conforme vegetação emergente e mais enraizada invade. (e) Finalmente, arbustos e árvores cobrem toda a área. Muitos desses brejos turfosos foram desmatados e drenados por meio de valas para remover parte da água e expor o solo orgânico, o qual muitas vezes é bastante produtivo para o plantio de hortaliças. A área de turfa lenhosa da foto situa-se na parte central do Estado de Michigan (EUA). (Foto: cortesia de R. Weil)

2.4 CLIMA

O clima é o mais influente dos quatro fatores que agem sobre o material de origem, pois determina a natureza e a intensidade do intemperismo que ocorre em grandes áreas geográficas. As principais variáveis climáticas que influenciam a formação do solo são a **precipitação efetiva** e a *temperatura*, as quais afetam as taxas dos processos físicos, químicos e biológicos.

Precipitação efetiva

A água é essencial a todas as principais reações químicas de intemperismo, mas deve penetrar no regolito para ser eficaz na formação do solo. A distribuição sazonal das chuvas, a demanda evaporativa, o relevo local e a permeabilidade do solo interagem entre si para determinar como a precipitação efetiva influencia na formação do solo. Quanto maior a profundidade de penetração da água, mais intemperizado e espesso será o solo. O excesso de água que percola através do seu perfil não somente transporta os materiais solúveis e suspensos das camadas superiores para as inferiores, como também pode carregar os materiais solúveis para as águas de drenagem. Assim, a água de percolação facilita as reações do intemperismo e ajuda a diferenciação dos horizontes do solo.

Da mesma forma, a carência de água é um fator importante na determinação das características dos solos das regiões secas. Por isso, os sais solúveis não são lixiviados desses solos e, em alguns casos, se acumulam até níveis que limitam o crescimento das plantas. Nas regiões áridas e semiáridas, os perfis de solo também tendem a acumular certos tipos de carbonatos e argilas expansivas.

Temperatura

A cada 10°C de aumento na temperatura, as taxas das reações bioquímicas mais do que dobram. Tanto a temperatura como a umidade influenciam no teor da matéria orgânica do solo, devido aos seus efeitos sobre o equilíbrio entre o crescimento das plantas e a decomposição microbiana. Se água em abundância e altas temperaturas estão, ao mesmo tempo, presentes no perfil, os processos de intemperismo, a lixiviação e o crescimento das plantas serão maximizados. O pouco desenvolvimento dos perfis de solos das regiões frias contrasta muito com os perfis profundamente intemperizados dos trópicos úmidos.

Em solos com material de origem, regime de temperatura, topografia e idade similares, o aumento da precipitação efetiva anual geralmente leva a um aumento dos teores de argila e de matéria orgânica, além de uma maior acidez, mas leva também à diminuição das relações Si/Al (uma indicação da existência de minerais mais intensamente intemperizados). No entanto, muitos lugares, em épocas do passado geológico, já estiveram sujeitos a climas muito diferentes dos hoje existentes. Esse fato é ilustrado em paisagens antigas de certas regiões áridas, onde os solos altamente lixiviados e intemperizados permanecem como relíquias do clima tropical úmido que prevaleceu há muitos milhares de anos.

O clima também influencia a vegetação natural. Climas úmidos favorecem o crescimento das árvores. Por outro lado, as gramíneas são a vegetação nativa dominante em regiões subúmidas e semiáridas, enquanto os vários tipos de arbustos dominam as zonas áridas. Dessa forma, o clima exerce a sua influência, em parte, por meio de um fator secundário da formação do solo: os organismos vivos.

2.5 BIOTA: ORGANISMOS VIVOS (INCLUINDO OS SERES HUMANOS)

Os organismos do solo influenciam muito o intemperismo bioquímico, a síntese do húmus, a homogeneização dos perfis, a ciclagem dos nutrientes e a formação de agregados estáveis. Todos eles – micróbios, plantas e animais, incluindo pessoas – desempenham importantes papéis, embora, muitas vezes, a maior influência seja a da vegetação natural.

Papel da vegetação natural

Acúmulo de matéria orgânica O efeito da vegetação na formação do solo pode ser percebido comparando-se as propriedades dos solos que estão próximos dos limites entre os ecossistemas de vegetação de pradarias e os de florestas (Figura 2.16). Nas pradarias, grande parte da matéria orgânica que é adicionada ao solo advém dos profundos e fibrosos sistemas radiculares das gramíneas. Nas florestas, ao contrário, a principal fonte de matéria orgânica dos solos são as folhas das árvores que caem no chão. Outra diferença é a frequente ocorrência, nas pradarias, de incêndios que destroem grandes quantidades de material da superfície, mas estimulam uma maior formação de raízes. Além disso, a acidez, presente de forma mais significativa em muitas florestas, inibe a ação de certos organismos do solo que deveriam misturar a maior parte da serrapilheira com a parte mineral do solo. Como resultado, os solos das pradarias, se comparados com os solos sob florestas, geralmente desenvolvem um espesso horizonte A, com uma distribuição de matéria orgânica até profundidades bem maiores do que os solos sob floresta;

mentos do solo influencia fortemente as características dos solos que sob ela se desenvolvem. Portanto, a reciclagem de cátions tem grande influência na acidez do solo. As diferenças ocorrem não só entre as pradarias e a vegetação de florestas, mas também entre as várias espécies de árvores das florestas. A serrapilheira proveniente das árvores coníferas (p.ex., pinheiros, abetos e ciprestes) irá reciclar apenas pequenas quantidades de cálcio, magnésio e potássio, em comparação com aquelas recicladas por algumas árvores decíduas (p.ex., carvalhos, choupos e bordos), que absorvem e armazenam quantidades muito maiores desses cátions (Figura 2.17).

Heterogeneidade em campos naturais Em campos naturais áridos e semiáridos, a competição pela água no solo (tão limitada) não permite o crescimento de uma vegetação densa o suficiente para cobrir completamente a superfície do solo. Por isso, arbustos e/ou gramíneas dispersos

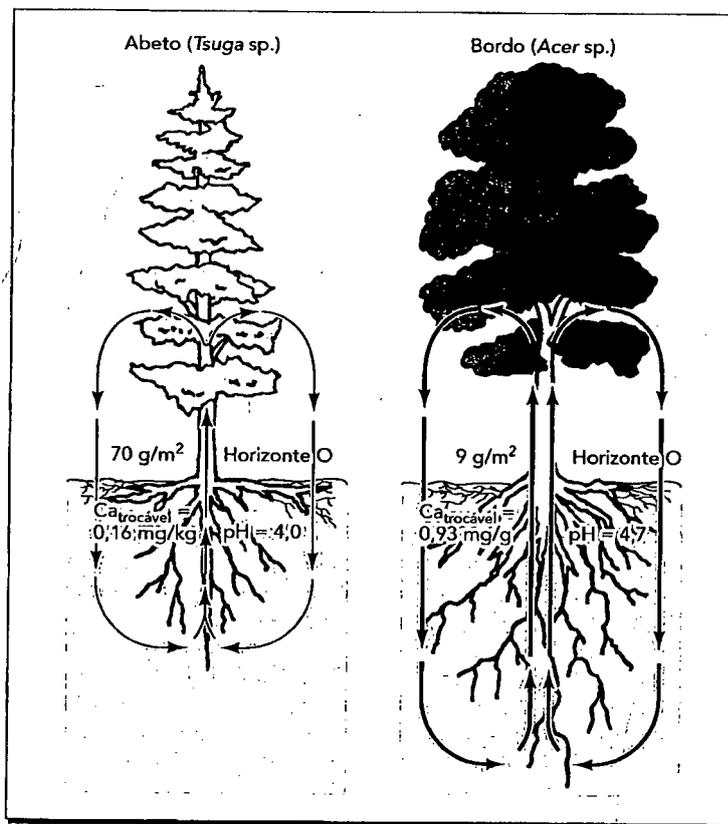


Figura 2.17 A reciclagem de nutrientes é um processo importante pelo qual as plantas modificam o solo em que crescem, bem como o curso do seu desenvolvimento, adequando-o a um ambiente próprio para as gerações futuras da mesma vegetação. Por exemplo, o abeto (uma conífera do gênero *Tsuga*) e o bordo (uma árvore decídua do gênero *Acer*) diferem muito em sua capacidade de acelerar o intemperismo mineral, mobilizar cátions nutrientes e reciclá-los para os horizontes superiores do solo. As raízes do bordo conseguem retirar, de forma eficaz, o cálcio dos minerais do solo; por isso, as folhas que a árvore produz contêm altas concentrações de Ca. Quando essas folhas caem no solo, rapidamente se decompõem, liberando grandes quantidades de íons Ca²⁺, que podem ser adsorvidos pelo húmus e pela argila como Ca²⁺ trocável dos horizontes O e A. Esse fluxo de íons Ca²⁺ pode retardar um pouco a acidificação das camadas mais superficiais. No entanto, essa eficiente extração dos minerais do material de origem pelas raízes do bordo pode acelerar a acidificação e o intemperismo dos horizontes mais profundos do solo. Em contrapartida, as acículas do abeto são pobres em Ca e se decompõem muito mais lentamente, resultando, portanto, em um horizonte O mais espesso e mais ácido, tanto na serrapilheira como no horizonte A; nesse caso, o intemperismo dos minerais no material de origem subjacente será, possivelmente, mais lento. (Fonte: dados de uma floresta de Connecticut [EUA] relatados por van Breemen e Finzi [1998])

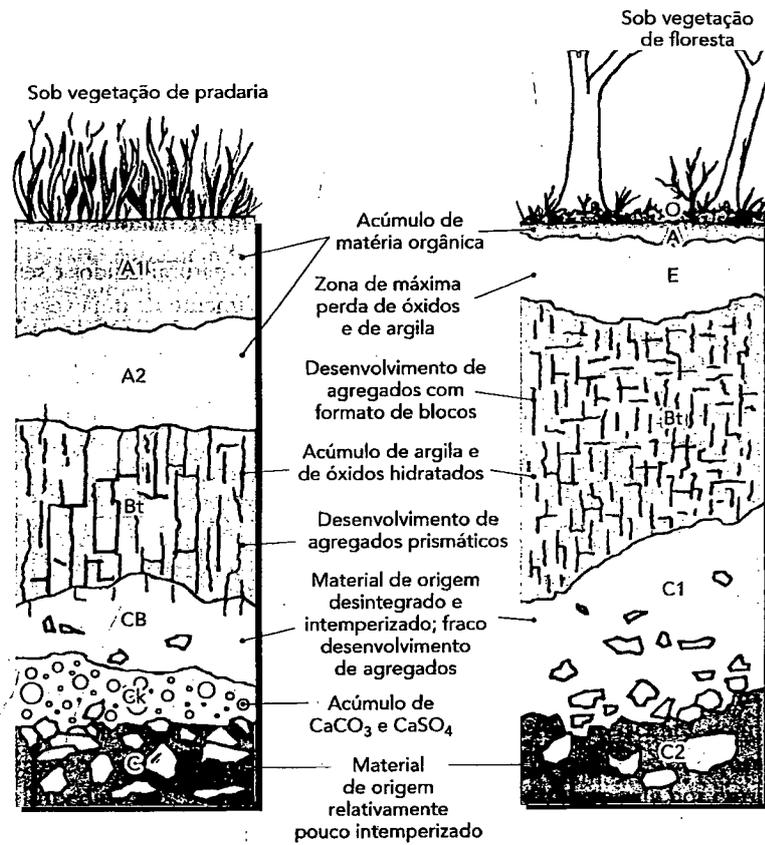


Figura 2.16 A vegetação natural influencia o tipo de solo, formado a partir de um dado material de origem (till carbonático, neste exemplo). O solo sob floresta exibe uma serrapilheira, ou camadas superficiais de folhas e galhos (horizonte O), em vários estágios de decomposição, sobre um delgado horizonte A mineral, no qual a serrapilheira foi parcialmente misturada. Por outro lado, no solo sob vegetação de pradaria, a maior parte da matéria orgânica é adicionada na forma de raízes finas distribuídas no primeiro metro superior, formando um espesso horizonte A mineral. Observe também que, neste solo, o carbonato de cálcio foi solubilizado e moveu-se para os horizontes inferiores (Ck); enquanto no solo sob floresta, que é mais ácido e lixiviado, os carbonatos foram completamente removidos. Em ambos os tipos de vegetação, as argilas e os óxidos de ferro se moveram para baixo do horizonte A e se acumularam no horizonte B, proporcionando a formação de agregados característicos. No solo florestal, a zona logo acima do horizonte B é, geralmente, um horizonte E nitidamente clareado, basicamente porque a maior parte da matéria orgânica se restringiu às camadas mais próximas da superfície e também porque a decomposição da serrapilheira da floresta gerou ácidos orgânicos que dissolveram e removeram os revestimentos marrons de óxidos de ferro. Compare esses perfis bem desenvolvidos com as mudanças ao longo do tempo, discutidas nas Seções 2.7 e 2.8. (Diagramas: cortesia de R. Weil)

estes têm a maior parte dos restos orgânicos na serrapilheira (horizonte O) e no horizonte A delgado. A comunidade microbiana existente no solo de uma pradaria típica é dominada por bactérias, enquanto no solo sob floresta predominam os fungos (consulte o Capítulo 10, para mais detalhes). As diferenças na ação microbiana afetam a taxa de ciclagem de nutrientes e o modo de agregação das partículas minerais, na forma de grânulos estáveis. O horizonte E, de cor clara e com alta taxa de lixiviação, caracteristicamente encontrado abaixo do horizonte O ou A de um solo sob floresta, resulta da ação de ácidos orgânicos gerados principalmente por fungos da serrapilheira ácida da floresta. No entanto, esse horizonte E geralmente não é encontrado em solos de pradarias.

Ciclagem de cátions por árvores A capacidade da vegetação natural em acelerar a liberação de nutrientes dos minerais por meio do intemperismo biogeoquímico e de extrair esses ele-

crecem na forma de reboleiras intercaladas com espaços onde o solo está desnudo ou coberto apenas com algumas folhas caídas. Essa esparsa vegetação altera as propriedades do solo de várias formas. Suas copas interceptam as poeiras trazidas pelo vento – as quais, muitas vezes, são relativamente ricas em silte e argila –, e suas raízes retiram nutrientes (como nitrogênio, fósforo, potássio e enxofre) das áreas não vegetadas. Esses nutrientes (e poeiras) são depois depositados na serrapilheira, sob a copa da planta, sendo que a sua decomposição libera ácidos orgânicos que reduzem o pH do solo e estimulam o intemperismo dos minerais. Com o tempo, as áreas de solo desnudo entre as reboleiras vão aumentando em tamanho à medida que se tornam mais empobrecidas em nutrientes e ainda menos convidativas para a fixação de plantas. Ao mesmo tempo, as reboleiras de vegetação criam “ilhas” de fertilidade maior com um solo de horizonte A mais espesso e com o carbonato de cálcio, muitas vezes lixiviado mais profundamente (Figura 2.18).

Papel dos animais, incluindo pessoas

O papel dos animais nos processos de formação do solo não deve ser ignorado. Os de grande porte, como os roedores, as toupeiras e os cães-de-pradaria, perfuram os horizontes subsuperficiais do solo, trazendo seus materiais para cima. Dessa forma, como seus túneis são geralmente abertos em direção à superfície, acabam facilitando o movimento da água e do ar em direção às camadas inferiores do solo. Em determinadas áreas, esses animais misturam os horizontes superiores com os inferiores, cavando túneis e depois preenchendo-os. Por exemplo, grandes bandos de toupeiras podem revirar completamente o metro superior do solo durante vários milhares de anos. Antigas galerias de animais, escavadas nos horizontes inferiores, muitas vezes podem ficar preenchidas com material de solo do horizonte A sobrejacente, criando feições especiais do perfil conhecidas como *crotovinas* (Figura 2.19). Em certas situações, a atividade animal pode impedir o desenvolvimento do solo, acentuando sua perda por erosão.

Minhocas, formigas e cupins As minhocas, as formigas e os cupins misturam o solo à medida que o cavam, afetando significativamente sua formação. As minhocas ingerem resíduos orgânicos e partículas de solo, aumentando assim a disponibilidade de nutrientes para as plantas no material que passa através de seus corpos. Esses anelídeos arejam e removem o solo, au-

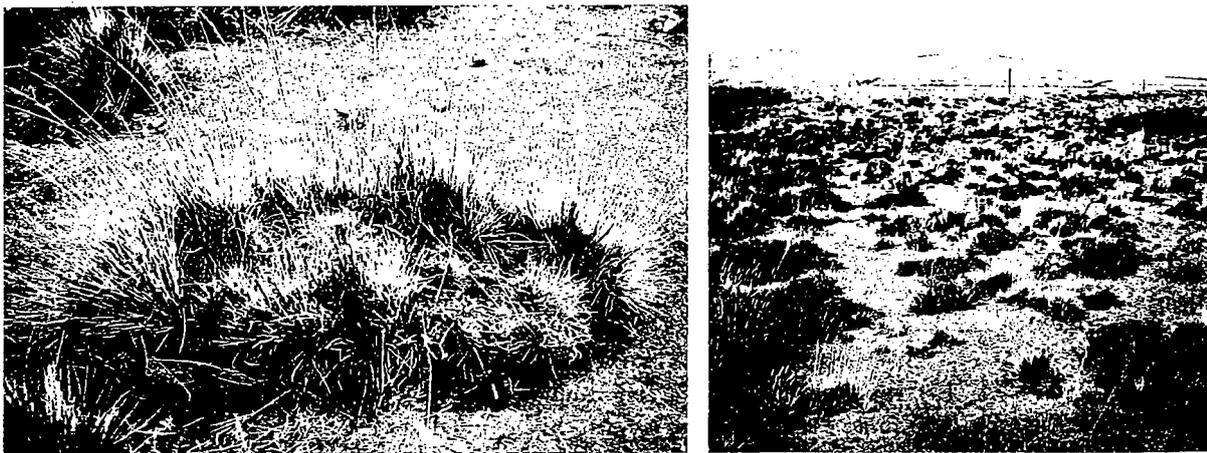


Figura 2.18 As reboleiras dispersas de gramíneas nos campos naturais desta região semiárida da Patagônia (Argentina) formaram “ilhas” de solos com maior fertilidade e horizontes A mais espessos. A tampa da lente da máquina fotográfica, colocada na extremidade de uma dessas ilhas, dá uma ideia da dimensão (e indica a maior espessura) do solo sob o dossel das plantas. A heterogeneidade do solo em pequena escala associada à vegetação é comum onde as limitações da água do solo impedem a completa cobertura da sua superfície pelas plantas. (Fotos: cortesia de Ingrid C. Burke, Short Grass-Steppe Long Term Ecological Research, Colorado State University, EUA)

Figura 2.19 As galerias que foram abandonadas por animais e são preenchidas com material de solo de outro horizonte diferente são chamadas de *crotovinas*. Nesse solo, sob pradaria, do Estado de Illinois (EUA), o material escuro, rico em matéria orgânica do horizonte A, preencheu antigas cavidades que se estendiam até o horizonte B. As manchas arredondadas e escuras do horizonte B indicam onde a parede da trincheira seccionou essas cavidades. Marcas na escala a cada 10 cm.

(Foto: cortesia de R. Weil)



mentando a estabilidade dos seus agregados estruturais, garantindo assim a pronta infiltração de água. Já as formigas e os cupins, quando constroem seus ninhos, também transportam materiais do solo de um horizonte para outro. Em geral, a atividade de revolvimento por animais, às vezes chamada de **pedoturbação**, tende a desfazer ou neutralizar a tendência de outros processos de formação do solo que acentuam as diferenças entre os seus horizontes. No entanto, cupins e formigas também podem retardar o desenvolvimento do perfil do solo, fazendo com que surjam grandes áreas desprovidas de vegetação em torno de seus ninhos – o que leva ao aumento da perda de solo por erosão.

Influências humanas e solos urbanos As atividades humanas também influenciam bastante a formação do solo. Por exemplo, acredita-se que os nativos americanos regularmente ateavam fogo para garantir grandes áreas das pastagens naturais das pradarias nos Estados de Indianã e Michigan (EUA). Atualmente, as ações humanas que destroem a vegetação (árvores e capins) e os cultivos subsequentes do solo para produção agrícola têm modificado, e muito, a formação dos solos. Da mesma forma, irrigar um solo árido afeta, de forma drástica, os atributos do solo, assim como a adição de adubos e calcário em solos de baixa fertilidade. Hoje, nas áreas com mineração de superfície e sob urbanização, as máquinas escavadoras têm um efeito sobre os solos quase semelhante ao das geleiras antigas, nivelando e misturando os horizontes do solo – e, com isso, levando a formação de um novo solo ao seu tempo zero.

Em outras situações, são as próprias pessoas as responsáveis pela “construção” de novos solos (Prancha 78), como aqueles da maioria dos *greens* dos campos de golfe e alguns gramados de campos de atletismo e os que servem como material de revestimento para vegetar e selar aterros (Prancha 64), bem como os jardins planejados na cobertura dos edifícios. Os seres humanos podem até mesmo reverter os processos de erosão e sedimentação (que normalmente destroem os solos) e, assim, ajudar o solo a se formar (Seção 2.6 e Capítulo 14). Por exemplo, em um projeto recente chamado de *Mud to Parks* (ver nota da margem lateral), sedimentos calcários, dragados do fundo do rio Illinois (EUA), foram colocados sobre um terreno altamente degradado e estéril, formando uma espessa camada de material barrento. Depois de um ano, esse novo material de origem secou e, além de sustentar uma vegetação exuberante, começou a desenvolver as características próprias de um solo, com agregados granulares e prismáticos.

A lama do rio Illinois se transforma em solo superficial no novo parque de Chicago (NPR, David Schaper): www.npr.org/templates/story/story.php?storyId=1919840.

2.6 RELEVO

O relevo, por vezes referido como *topografia*, diz respeito às feições da superfície terrestre e é descrito em termos de diferenças de altitude, inclinação e posição na paisagem, ou seja, quanto à configuração do terreno, a qual tanto pode apressar como retardar o trabalho das forças climáticas. Por exemplo, nas regiões semiáridas, as encostas íngremes geralmente fazem com que menos água das chuvas penetre no solo e mais enxurrada ocorra. Nas encostas mais íngremes dessas regiões, a pouca precipitação efetiva também resulta em uma rarefeita cobertura vegetal do solo, reduzindo, assim, a contribuição das plantas na sua formação. Por todas essas razões, essas encostas íngremes acabam inibindo a formação de solo, pois sua taxa de remoção é maior do que a de formação. Portanto, os solos em terrenos íngremes tendem a ser relativamente delgados, com perfis pouco desenvolvidos, em comparação aos solos a eles próximos, situados em locais menos inclinados ou planos (Figura 2.20).

Em canais e depressões onde a água das enxurradas tende a se concentrar, o regolito é, em geral, mais intemperizado, e o perfil do solo, mais desenvolvido. Contudo, nessas posições mais baixas da paisagem, a água pode saturar o regolito, a tal ponto que a drenagem e a aeração são restringidas. Nesses locais, o intemperismo de alguns minerais e a decomposição da matéria orgânica são retardados, enquanto a perda de ferro e manganês é acelerada. Dessa forma, é nas posições mais baixas do relevo que os perfis dos solos típicos das terras úmidas podem se desenvolver (consulte a Seção 7.7, sobre os solos das terras úmidas).

Na paisagem, solos comumente ocorrem em conjunto, formando uma sequência chamada de **catena** (palavra do latim que significa “cadeia” ou “corrente”, como se essa sequência estivesse pendurada entre duas colinas adjacentes, com cada um de seus elos representando um solo). Cada membro da catena ocupa uma posição topográfica característica. Os solos existentes em uma catena geralmente apresentam propriedades que refletem a interferência da topografia sobre o movimento da água e sua drenagem. A **toposequência** é um

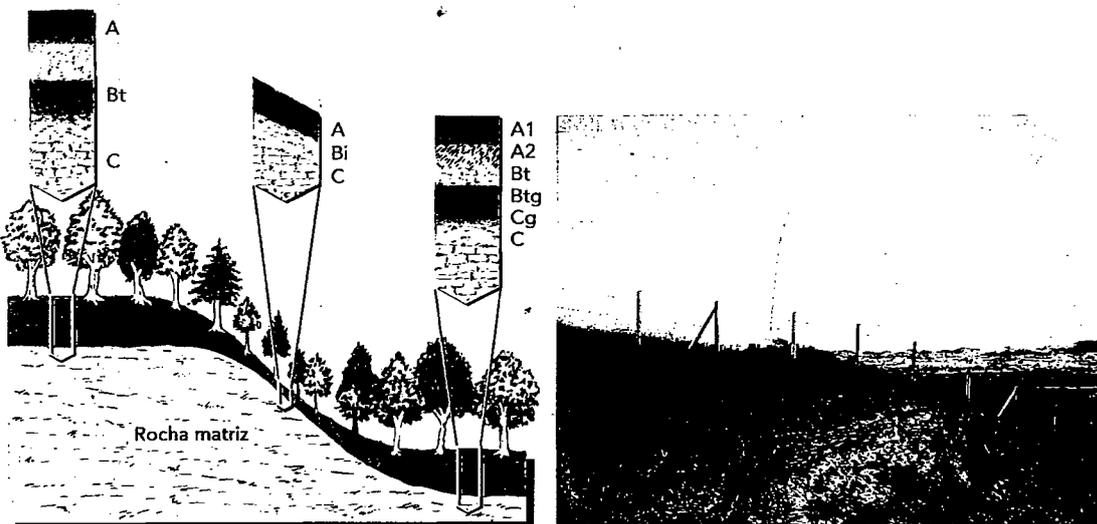


Figura 2.20 O relevo influencia as propriedades do solo, incluindo a sua espessura. O diagrama à esquerda mostra o efeito da inclinação de uma encosta sobre as características do perfil e a espessura dos solos nos quais a vegetação natural é de uma floresta. A foto da direita ilustra o mesmo princípio sob vegetação de pradaria. Muitas vezes, uma mudança relativamente pequena na inclinação do terreno pode ter um grande efeito sobre o desenvolvimento do solo. Consulte a Seção 2.9 para obter uma explicação sobre os símbolos dos horizontes.* (Foto: cortesia de R. Weil)

* N. de T.: O símbolo Bi (B incipiente), usado no Brasil para descrever os solos, equivale ao Bw.

tipo de catena em que as diferenças entre os solos resultam quase inteiramente da influência do relevo, pois os solos ao longo de toda a sequência compartilham do mesmo material de origem e têm condições semelhantes no que diz respeito ao clima, à vegetação e ao tempo (Figura 2.20 e Prancha 16).

Interação com a vegetação A topografia muitas vezes interage com a vegetação para influenciar a formação do solo. Nas zonas de transição de floresta-pradaria, as árvores aparecem com mais frequência somente nas depressões onde o solo é geralmente mais úmido do que nas áreas mais elevadas. Como é de se esperar, a natureza do solo nas depressões é bastante diferente do que nas áreas que se situam em terras altas. Por exemplo, se a água estiver parada durante alguns meses, ou o ano inteiro, as áreas baixas podem dar origem a turfeiras e, por sua vez, a solos orgânicos.

O aspecto (orientação) das encostas O relevo afeta a absorção da energia solar em uma determinada paisagem. No hemisfério norte, as encostas voltadas para o sul são mais perpendiculares aos raios do sol e, por isso, mais quentes e mais secas do que suas homólogas voltadas para o norte (Figura 7.20). Consequentemente, os solos nas encostas voltadas para o sul tendem a possuir quantidades menores de matéria orgânica e não são tão intensamente intemperizados.

Acúmulo de sais Em regiões áridas e semiáridas, o relevo influencia o acúmulo de sais solúveis. Os sais dissolvidos das partes mais elevadas do relevo deslocam-se tanto sobre a sua superfície como por meio do lençol freático para as áreas mais baixas (Seção 9.12). Nesses locais, à medida que a água evapora, os sais sobem para a superfície, muitas vezes se acumulando em níveis tóxicos para as plantas.

Interações com o material de origem O relevo também pode interagir com o material de origem. Por exemplo, em áreas com camadas de rochas sedimentares inclinadas, os divisores de água muitas vezes consistem arenitos resistentes, enquanto em os vales se encaixam nas rochas calcárias mais facilmente intemperizáveis. Em muitas paisagens, o relevo condiciona a distribuição dos materiais de origem residual, coluvial e aluvial: os residuais situam-se na parte mais elevada; os coluviais, nas mais baixas; e os aluviais preenchem o fundo dos vales (Figura 2.21).

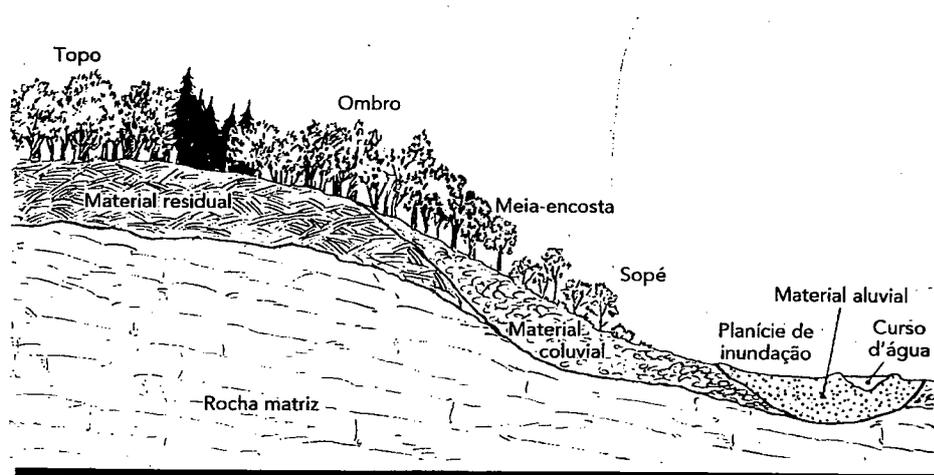


Figura 2.21 Exemplo de interações entre o relevo e o material de origem agindo como fatores de formação do solo. Neste esquema de uma paisagem, os solos no topo, no sopé e na planície de inundação vêm se formando a partir de materiais residuais, coluviais e aluviais, respectivamente.

2.7 TEMPO

Os processos de formação do solo demoram a mostrar seus efeitos. O tempo de formação do solo começa a contar quando um deslizamento de terra expõe uma nova rocha ao ambiente intempérico da superfície, a inundação de um rio deposita uma nova camada de sedimentos em sua várzea, uma geleira derrete e despeja sua carga de detritos minerais, ou quando uma escavadeira corta e aterra uma encosta para nivelar o terreno, preparando-o para uma edificação ou para a recuperação de uma área onde foram colocados resíduos de mineração.

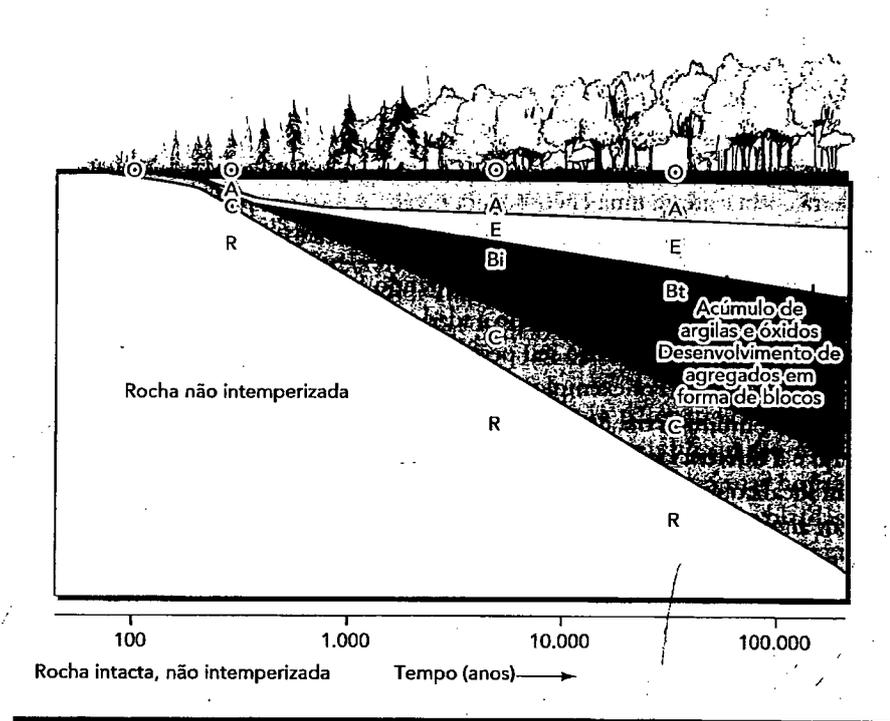
Taxas de intemperismo Muitas vezes, quando falamos de um solo “jovem” ou de um solo “maduro”, não estamos nos referindo à idade do solo em anos, mas sim ao seu grau de intemperismo e desenvolvimento do seu perfil. Isso porque o tempo interage com os outros fatores de formação do solo. Por exemplo, em um local quase plano, com clima quente e muita chuva caindo sobre um material de origem permeável e rico em minerais reativos, a ação do intemperismo e a diferenciação do perfil do solo podem se revelar muito mais rapidamente do que em um local com declive acentuado e material de origem resistente ao clima frio e seco.

Em alguns casos, os solos se formam tão rapidamente que o efeito do tempo sobre o processo de formação pode ser medido com base no tempo de vida do ser humano. Por exemplo, mudanças marcantes na mineralogia, na estrutura e na cor ocorrem dentro de poucos meses ou alguns anos, quando certos materiais, contendo sulfeto, são primeiramente expostos ao ar, devido à escavação, drenagem de terras úmidas ou à dragagem de sedimentos (Prancha 109 e Seção 9.6). Em condições favoráveis, a matéria orgânica pode se acumular e acabar formando um horizonte A escuro e fértil em aluviões recém-depositados ao longo de somente uma ou duas décadas. Em alguns casos, apenas 40 anos são o suficiente para o horizonte B incipiente se tornar perceptível em resíduos de mineração em regiões úmidas. A modificação da estrutura e da coloração por compostos de ferro acumulados pode formar um único horizonte B dentro de alguns séculos; contudo, se o material de origem for arenoso e o clima for úmido, o mesmo grau de horizonte B levará muito mais tempo para se formar nessas condições menos favoráveis de intemperismo e lixiviação. O acúmulo de argilas silicatadas e a formação de agregados em forma de blocos no horizonte B, geralmente, se tornam perceptíveis somente após milhares de anos. O desenvolvimento de um solo maduro e profundamente intemperizado a partir de rochas muito resistentes ao intemperismo pode levar muitos outros milhares de anos (Figura 2.22).

Exemplo da gênese do solo ao longo do tempo Vale a pena estudar a Figura 2.22 com atenção, pois ela ilustra as mudanças que normalmente ocorrem sobre uma rocha exposta em um clima quente e úmido durante o desenvolvimento do solo. Durante os primeiros 100 anos, líquens e musgos estabeleceram-se sobre a rocha nua exposta e começaram a acumular matéria orgânica cuja decomposição começou a acelerar o intemperismo. Depois de algumas centenas de anos, capins, arbustos e árvores menores já lançavam suas raízes em uma profunda camada de rocha desintegrada de solo, contribuindo muito para o acúmulo de materiais orgânicos e para a formação dos horizontes A e C. Durante os 10 mil anos seguintes, outras sucessões de árvores da floresta se estabeleceram, e as atividades de uma multidão de pequenos organismos do solo transformaram a serrapilheira em um característico horizonte O. Já o horizonte A foi, então, aos poucos, se espessando e escurecendo, desenvolvendo também uma estrutura com agregados granulares e estáveis. Pouco tempo depois, uma zona clareada surgiu logo abaixo do horizonte A, quando os produtos do intemperismo, como argilas e óxidos de ferro, foram translocados com a água e ácidos orgânicos percolantes para baixo da camada de serrapilheira. Esses materiais transportados começaram a se acumular em uma camada mais profunda, formando um horizonte B. O processo continuou com mais argilas silicatadas se acumulando e formando uma estrutura com agregados em blocos, à medida que o horizonte B se distinguiu

Figura 2.22 Estágios progressivos de desenvolvimento do perfil do solo originado, ao longo do tempo, dos resíduos de uma rocha ígnea em clima quente e úmido e propício à vegetação de floresta. A escala de tempo aumenta logarithmicamente da esquerda para a direita, perfazendo mais de 100.000 anos. Note que o perfil maduro (lado direito desta figura) expressa a influência completa da vegetação da floresta, como ilustrado na Figura 2.16.* (Diagrama: cortesia de R. Weil)

* N. de T.: Nesta figura, o horizonte com símbolo Bi (B incipiente), usado no Brasil, equivale ao Bw.



e se espessava. Finalmente, as argilas silicatadas também se alteraram e alguma sílica foi lixiviada. Dessa forma, novas argilas contendo menos sílica se formaram no horizonte B. Com o passar do tempo, à medida que o perfil, como um todo, continua a se aprofundar, a zona intemperizada da rocha não consolidada pode atingir muitos metros de espessura.

Como vimos, os cinco fatores de formação do solo atuam simultaneamente e de forma interdependente, influenciando a natureza dos solos que se desenvolvem em um determinado local. A Figura 2.23 ilustra algumas das complexas interações que podem nos ajudar a prever quais propriedades do solo podem ser encontradas em um determinado ambiente. Vamos agora voltar nossa atenção para os *processos* que fazem com que os materiais de origem se transformem em solos, quando sob a ação integrada desses fatores de formação dos solos.

2.8 OS QUATRO PROCESSOS BÁSICOS DE FORMAÇÃO DO SOLO⁴

Animação sobre os processos de formação do solo:
www.environment.ualberta.ca/soa/process2.cfm

O acúmulo do regolito a partir da fragmentação e decomposição da rocha ou da deposição (pelo vento, água, gelo, etc.) de materiais geológicos não consolidados pode preceder ou, mais comumente, ocorrer ao mesmo tempo que o desenvolvimento dos característicos horizontes de um perfil do solo. Durante a formação (*gênese*) de um solo, a partir de um material de origem, o regolito passa por muitas mudanças profundas causadas por quatro grandes processos de formação do solo (Figura 2.24), que serão tratados a seguir. Esses quatro processos básicos de formação, ou *processos*

⁴ Para ler sobre a clássica apresentação dos processos de formação do solo, consultar Simonson (1959). Além disso, a discussão detalhada desses processos básicos e suas manifestações específicas podem ser encontradas em Birkeland (1999), Fanning e Fanning (1989), Buol et al. (2005) e Schaetzl e Anderson (2005).

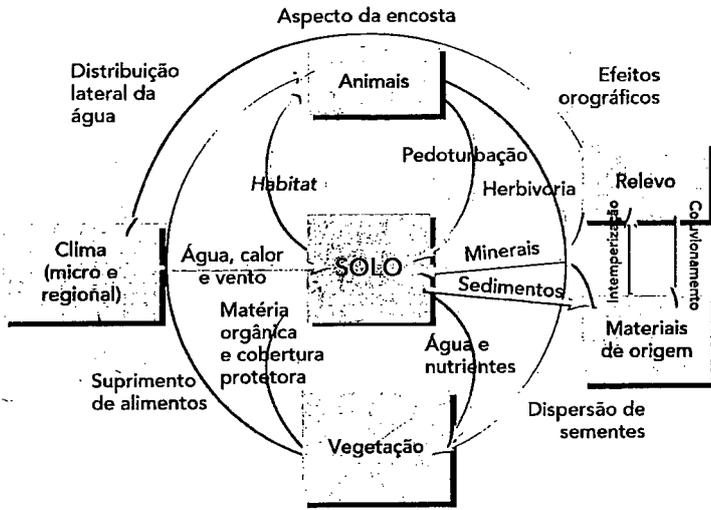


Figura 2.23 O material de origem, a topografia, o clima e os organismos (vegetação e animais) não agem de forma independente. Ao contrário, eles estão interrelacionados de muitas maneiras, de forma que influenciam a formação dos solos em conjunto. A influência de cada fator apresentado é modificada pelo seu tempo de atuação durante essa formação, embora o tempo – como um fator de formação do solo – não seja aqui mostrado. (Adaptado de Monger et al. [2005])

pedogenéticos, ajudam a distinguir os solos das camadas de sedimentos depositadas por processos geológicos.

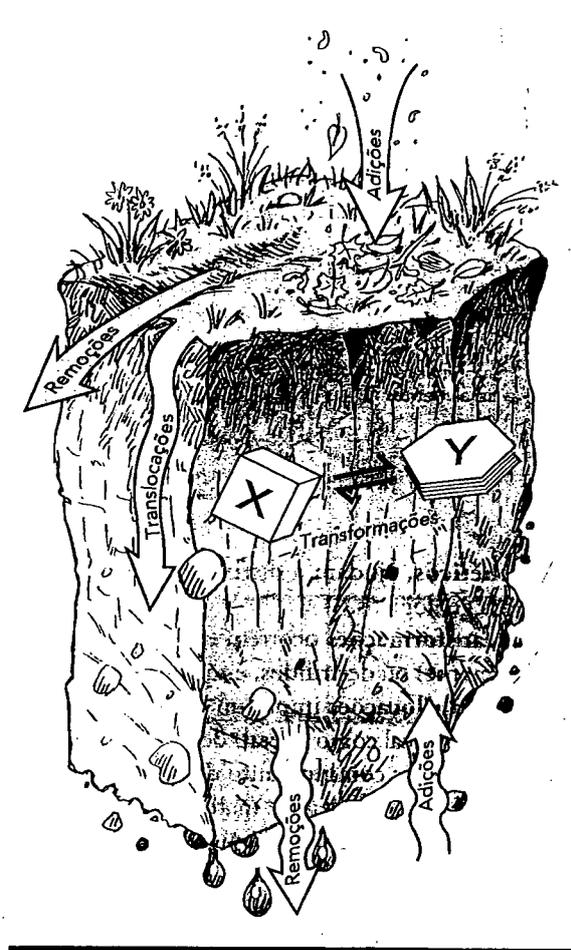
As **transformações** ocorrem quando os constituintes do solo são modificados (química ou fisicamente) ou destruídos, enquanto outros são sintetizados a partir dos materiais precursores. As **translocações** implicam no movimento de materiais orgânicos e inorgânicos (tanto no sentido vertical como lateral) de um horizonte superior para um inferior. A água é o agente translocante mais comum, tanto descendo (devido à força da gravidade), como subindo (por ação capilar). As entradas de materiais de fontes externas para os perfis de solos já desenvolvidos são consideradas como **adições**. Um exemplo muito comum é o da adição da matéria orgânica das folhas e raízes das plantas, que caem quando mortas (sendo que o carbono se origina na atmosfera). As **remoções** a partir do perfil do solo ocorrem por lixiviação (para as águas subterrâneas), por erosão de materiais superficiais ou outras formas de remoção. A erosão, agindo como fator principal das perdas, muitas vezes remove as partículas mais finas (húmus, argila e silte), deixando o horizonte superficial relativamente mais arenoso e menos rico em matéria orgânica.

Esses processos da gênese dos solos, operando sob a influência dos fatores ambientais discutidos anteriormente, dá-nos uma estrutura lógica para compreender a relação entre os solos, as paisagens e o ecossistema em que eles funcionam. Assim, quando for analisar essas relações em função de um determinado local, pergunte-se: Quais materiais que estão sendo adicionados a este solo? Que transformações e translocações estão ocorrendo neste perfil? Que materiais estão sendo removidos? E, como o clima, os organismos, a topografia e o material de origem neste local afetam esses processos ao longo do tempo?

2.9 O PERFIL DO SOLO

Em cada local de um terreno, a superfície do nosso planeta passou por uma determinada combinação de influências dos cinco fatores de formação dos solos, fazendo com que um conjunto diferente de camadas (horizontes) fosse formado em cada segmento da paisagem, dando origem, lentamente, aos corpos naturais aos quais chamamos de **solos**. Cada solo é caracterizado por uma determinada sequência desses horizontes. Quando essa sequência é exposta em um corte vertical, a chamamos de **perfil do solo**. Vamos agora considerar os horizontes principais que compõem os perfis de solo e a terminologia utilizada para descrevê-los.

Figura 2.24 Ilustração esquemática das adições, remoções, translocações e transformações atuando como os processos fundamentais que conduzem ao desenvolvimento do perfil do solo. (Diagrama: cortesia de R. Weil).



Os principais horizontes e camadas⁵

Os seis **horizontes principais** do solo mais comumente reconhecidos são designados usando-se as letras maiúsculas O, A, E, B, C e R (Figura 2.25). Dentro de um horizonte principal podem ocorrer horizontes subordinados (ou sub-horizontes), os quais são designados por letras minúsculas (sufixos) – logo após a letra maiúscula do horizonte principal (p.ex.: Bt, Ap ou Oi).

Horizontes O Geralmente são formados acima do solo mineral ou ocorrem em um perfil de solo orgânico. Eles derivam de plantas mortas e resíduos de origem animal; em geral, não são encontrados nas regiões de pradarias, mas ocorrem em áreas de florestas. São normalmente referidos como **serrapilheira** (Pranchas 7, 19 e 70). Muitas vezes, três sub-horizontes podem ser identificados no horizonte O: Oi, Oe e Oa (Figura 2.25).

Horizontes A Os horizontes minerais mais superficiais, designados com a letra A, geralmente contêm matéria orgânica suficiente, parcialmente decomposta (humificada), para imprimir uma cor mais escura do que a dos horizontes inferiores (Pranchas 4, 7 e 20). Esses horizontes

⁵ Além dos seis horizontes principais descritos nesta seção, existem dois outros que são representados pelas letras L (do grego *limne*, "pântano ou brejo") e W (do inglês *water*, "água"). O horizonte L ocorre em alguns solos orgânicos e inclui uma camada de partículas minerais e orgânicas depositadas na água por organismos aquáticos (p. ex.: terras diatomáceas, turfa sedimentar e margas). Camadas de água (congelada ou líquida) encontradas dentro dos perfis do solo (não sobre eles) são designadas como horizonte principal W.

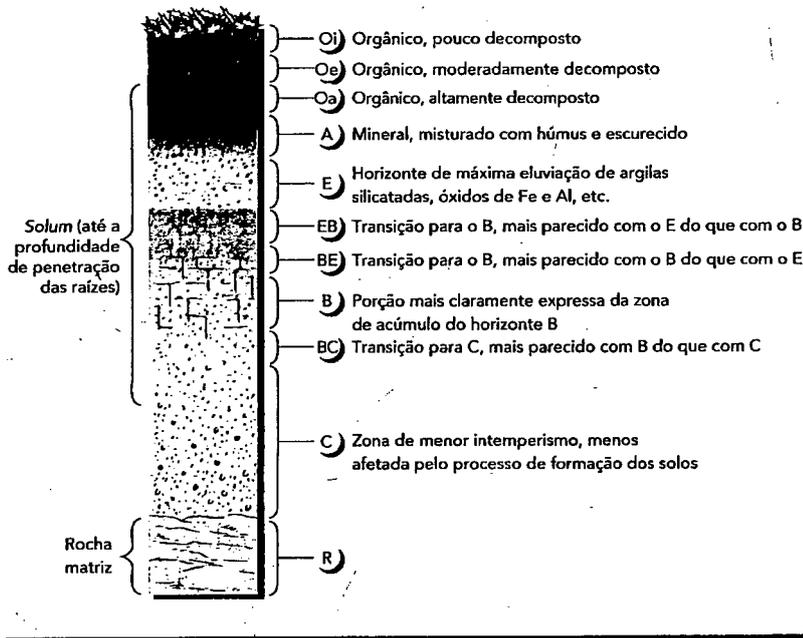


Figura 2.25 Perfil de solo hipotético, mostrando os principais horizontes que podem estar presentes em um solo bem-drenado de uma região de clima temperado e úmido. Qualquer perfil em particular pode apresentar apenas alguns desses horizontes cujas espessuras são variáveis. Um perfil de solo pode também apresentar sub-horizontes mais detalhados do que os aqui indicados. O *solum* normalmente inclui os horizontes A, E, B e mais algumas camadas do horizonte C, quando cimentadas.*

A muitas vezes têm uma textura mais grosseira, por terem perdido alguns dos seus materiais mais finos para os horizontes mais profundos por processos de translocação e/ou erosão.

Horizontes E São zonas de máxima lixiviação, ou de **eluviação** (do latim *e* ou *ex*, “fora”, e *lavere*, “lavar”), de argila ou óxidos de ferro e de alumínio, as quais fazem surgir uma concentração de minerais resistentes (como o quartzo) na forma de partículas do tamanho da areia e do silte. O horizonte E, geralmente encontrado logo abaixo do horizonte A, tem cor mais clara do que qualquer horizonte situado imediatamente acima ou abaixo. Tais horizontes são bastante comuns em solos desenvolvidos sob florestas, mas raramente ocorrem em solos sob pradarias. Alguns horizontes E bem-diferenciados podem ser vistos nas Pranchas 10, 19 e 31.

Horizontes B Os horizontes B, que se formam abaixo de um horizonte O, A ou E durante a gênese do solo, sofreram mudanças suficientes para que a estrutura do material de origem não mais permanecesse discernível. Em muitos horizontes B, vários materiais – geralmente removidos dos horizontes a ele sobrepostos – se acumularam em um processo chamado de **iluviação** (do latim *il*, “dentro”, e *lavere*, “lavar”). Em regiões úmidas, os horizontes B são as camadas de máximo acúmulo de materiais, como os óxidos de ferro e os de alumínio (horizontes Bo** ou Bs*** – ver Pranchas 9, 10 e 31), e também de argilas minerais silicatadas (horizontes Bt), sendo que algumas destas podem ter sido eluviadas de horizontes superiores, e outros, ainda, podem ter sido formados no local. Tais horizontes Bt podem ser vistos claramente no interior dos perfis mostrados nas Pranchas 1 e 11. Em regiões áridas e semiáridas, o carbonato ou o sulfato de cálcio podem se acumular no horizonte B (dando origem aos horizontes Bk e By, respectivamente; ver as fotos desses horizontes nas Pranchas 3, 8 e 13).

* N. de T.: Neste livro, os horizontes mencionados como O_i e O_e, são designados, no Brasil, unicamente como O_o; e os mencionados como O_a equivalem aos O_d.

** N. de T.: No Brasil, esses horizontes iluviais de acúmulo de óxidos de Fe e Al (anotados neste livro como Bo) são designados como Bs.

*** N. de T.: No Brasil, para designar os horizontes com acúmulo iluvial de óxidos de Fe, Al e também matéria orgânica (que neste livro é indicado como Bs), usa-se a designação Bsh.

Horizontes C O horizonte C é o material inconsolidado subjacente ao *solum* (horizontes A e B), podendo, ou não, ser idêntico ao material de origem a partir do qual esse *solum* foi formado. O horizonte C está abaixo das zonas de maior atividade biológica e não foi suficientemente alterado pela gênese do solo para se qualificar como um horizonte B. Em regiões secas, carbonatos e gesso podem se concentrar no horizonte C. Apesar de ser solto o suficiente para ser escavado com uma pá, o material do horizonte C muitas vezes mantém algumas das características estruturais da rocha-mãe ou dos depósitos geológicos de onde se formaram (ver, por exemplo, o terço inferior dos perfis mostrados nas Pranchas 7, 11 e 31). Suas camadas superiores podem, com o tempo, tornarem-se uma parte do *solum* – se o intemperismo e a erosão continuarem.

Camadas R São rochas inconsolidadas, com pouca evidência de intemperismo.

Subdivisões dentro dos horizontes principais

Muitas vezes, camadas características estão presentes *dentro* de um horizonte principal, as quais são indicadas por um algarismo arábico *após* a designação da letra maiúscula. Por exemplo, se três combinações diferentes de estrutura e cores puderem ser percebidas no horizonte B, o perfil poderá incluir a sequência: B1-B2-B3 (ver exemplos nas Pranchas 4, 7 e 9).

Se dois materiais de diferentes origens geológicas (p.ex., loess sobre till glacial) estão presentes dentro do perfil do solo, o algarismo 2 é colocado antes do símbolo do horizonte principal, a partir dos horizontes desenvolvidos na segunda camada de material de origem. Por exemplo, um solo teria uma sequência de horizontes designada como O-A-B-2C, se o horizonte C tivesse se desenvolvido de till glacial, e os horizontes superiores, de loess.

Onde existe uma camada de material de solo mineral transportada por seres humanos (em geral, utilizando-se máquinas) e originada fora do pedon, o símbolo de acento circunflexo (^) é colocado antes da designação do horizonte principal. Por exemplo, suponha que o empreiteiro de uma obra de paisagismo espalhe uma camada de material arenoso sobre um determinado solo, a fim de nivelar a área em que vai trabalhar. Portanto, o solo resultante (depois que matéria orgânica suficiente tiver sido incorporada para formar um horizonte A) poderia ter a seguinte sequência de horizontes: ^A-^C-2Ab-2Btb, em que os dois primeiros horizontes foram formados no aterro transportado (daí o prefixo ^) pelo empreiteiro, e os dois últimos horizontes fizeram parte do solo subjacente, que agora está enterrado (daí o sufixo com a letra b minúscula).

Horizontes de transição

Entre os horizontes principais (O, A, E, B, C e R) podem existir outros com feições intermediárias, isto é, com determinadas características de um horizonte, mas também com algumas características de outro. Nesse caso, duas letras maiúsculas são usadas para designar esses horizontes de transição (p.ex.: AE, EB, BE e BC), em que o símbolo do horizonte dominante é colocado antes do subordinado (p.ex., como está na Prancha 1). Combinações de letras com uma barra, como E/B, são usadas para designar horizontes mesclados; isto é, partes características do horizonte têm propriedades de E, enquanto outras têm propriedades de B.

Distinções específicas

Como as letras maiúsculas designam a natureza dos horizontes apenas de uma forma muito geral, letras minúsculas podem ser colocadas após a sua designação (como um sufixo) para

Tabela 2.2 Letras minúsculas usadas para distinguir as características específicas dos horizontes principais*

Letra (sufixo)	Definição	Letra (sufixo)	Definição
a	Material orgânico acentuadamente decomposto	n	Acúmulo de sódio
b	Horizonte enterrado	o	Acúmulo de óxidos de Fe e Al
c	Concreções ou nódulos	p	Aração ou outras pedopertubações
d	Materiais inconsolidados adensados	q	Acúmulo de sílica
e	Material orgânico em estado intermediário de decomposição	r	Rocha branda ou saprolito
f	Solo congelado	s	Matéria orgânica e óxidos de Fe e Al iluviais
ff	Camada de permafrost	ss	Superfícies de fricção (<i>slickensides</i>)
g	Forte gleização (mosqueados)	t	Acúmulo iluvial de argilominerais
h	Acúmulo iluvial de matéria orgânica	u	Modificações antropogênicas
i	Material orgânico pouco decomposto	v	Plintita (material vermelho rico em ferro)
j	Jarosita (ácidos sulfatos amarelados)	w	Cor e/ou estrutura bem-diferenciadas sem acúmulo de argila
jj	Crioturbação (mesclagem por congelamento)	x	Fragipã (elevada densidade do solo, quebradiço)
k	Acúmulo de carbonatos	y	Acúmulo de gesso
m	Cimentação (ou endurecimento)	z	Acúmulo de sais solúveis

qualificar peculiaridades específicas. Essas distinções mais específicas incluem as propriedades físicas especiais e o acúmulo de certos materiais, como argilas e sais (Tabela 2.2). A título de ilustração, um horizonte Bt é um horizonte B caracterizado por acúmulo de argila (t, do alemão *ton*, significa argila). O significado de várias outras designações dos horizontes subordinados será discutido no próximo capítulo.

Horizontes em um determinado perfil

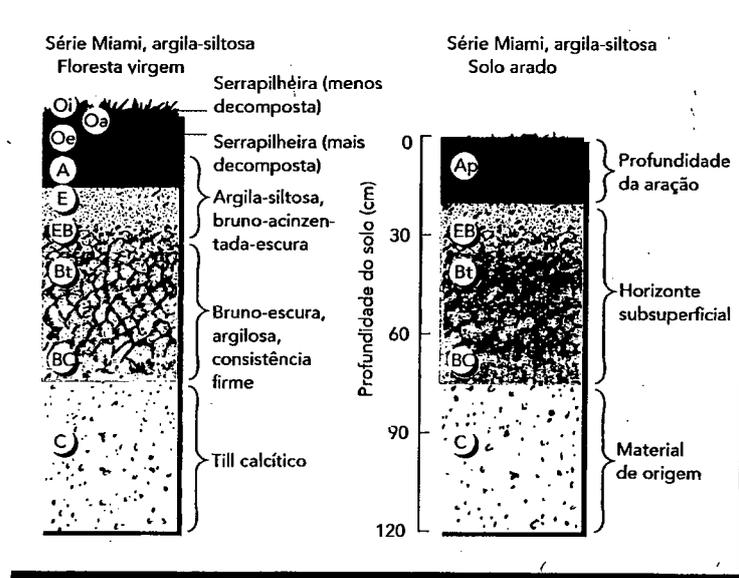
É pouco provável que o perfil de algum solo vá apresentar todos os horizontes que estão indicados no perfil hipotetizado da Figura 2.25. Os mais comumente encontrados em solos bem-drenados são Oi e Oe (ou Oa)**, se o solo estiver sob uma floresta; A ou E (ou ambos, dependendo das circunstâncias); Bt ou Bw ou Bi; e C. A condição da gênese dos solos irá determinar quais outros estarão presentes e sua clara definição.

Quando um solo virgem (nunca cultivado) é arado pela primeira vez, os primeiros 15 a 20 cm superiores se transformam em uma camada arável, ou horizonte Ap (Figura 2.26 e Prancha 4). O cultivo, é claro, modifica as condições originais das camadas da porção superior do perfil, tornando assim o horizonte Ap mais ou menos homogêneo. Em algumas terras cultivadas, a erosão severa faz com que um **perfil truncado** apareça (Prancha 65). Outra feição, por

* N. de T.: As definições dos prefixos a, d, e, f, i, o, v e w diferem das usadas no Brasil, tendo os seguintes significados: a (propriedades ándicas); d (acentuada decomposição da matéria orgânica); e (escurecimento da parte externa dos agregados); f (material laterítico, ou seja, plintita); i (desenvolvimento incipiente); o (material orgânico mal ou não decomposto); od, do (estágios intermediários de decomposição da matéria orgânica); v (características verticais); w (intensa alteração com inexpressivo acúmulo de argila).

** N. de T.: No Brasil, usam-se somente dois sufixos para designar o Horizonte O: Od (acentuada decomposição da matéria orgânica) e o (material orgânico mal ou não decomposto); Ood e Odo (equivalentes à conotação Oe deste livro) são os usados para designar os estágios intermediários de decomposição da matéria orgânica.

Figura 2.26 Esquema do perfil de solo da "Série Miami, argila-siltosa", um dos Alfisols do leste dos Estados Unidos, antes e depois da aração e do cultivo. As camadas mais superficiais (O, A e E) são misturadas pelo cultivo e denominadas como horizonte Ap (do inglês, *plow* = arado). Se a erosão ocorrer, eles poderão desaparecer, e uma parte do horizonte B será incluída na porção do solo sulcada pelo arado.



vezes desconcertante, do perfil é a presença de um solo enterrado que resultou de algum fenômeno natural ou da ação humana. Tal situação exige um exame cuidadoso para sua descrição.

A gênese do solo na natureza

Nem toda camada contrastante de materiais encontrados nos perfis do solo é um **horizonte genético** que se desenvolveu como resultado dos processos de gênese dos solos – como aqueles que acabamos de descrever. Os materiais de origem, a partir dos quais muitos solos se desenvolvem, contêm camadas de solo contrastantes desde *antes* de a pedogênese ter se iniciado. Por exemplo, materiais de origem, como os depósitos fluvioglaciais, sedimentos marinhos ou aluviões recentes, podem se constituir de várias camadas alternadas de partículas finas e grossas, depositadas em episódios específicos de sedimentação. Consequentemente, na caracterização dos solos, devemos identificar não apenas os horizontes genéticos e as feições que aparecem durante a gênese do solo, mas também essas feições e camadas que podem ter sido herdadas do material de origem.

2.10 CONCLUSÃO

Os materiais de origem, a partir dos quais os solos se desenvolvem, variam muito de um local para outro, tanto a grandes como a pequenas distâncias. Portanto, para uma boa compreensão da gênese do solo, é necessário conhecer esses materiais, as suas fontes (ou sua origem), as reações do seu intemperismo, bem como seus agentes de transporte e deposição.

A formação do solo é condicionada pelo *clima* e pelos *organismos vivos* que agem sobre os *materiais de origem* durante longos períodos de *tempo* e sob a ação modificadora do *relevo*. Por isso, os cinco principais fatores de formação do solo determinam o tipo de solo que irá se desenvolver em um determinado local. Com o rápido crescimento das populações e o aprimoramento das tecnologias, os seres humanos vêm desempenhando, cada vez mais, o seu papel como um dos organismos que mais influenciam a formação do solo. Quando todos esses fatores são os mesmos em dois lugares, supõe-se que o tipo de solo também deva ser o mesmo nesses locais.

A gênese do solo começa quando os horizontes, antes ausentes no material de origem, começam a aparecer no perfil do solo. O acúmulo de matéria orgânica nos horizontes superiores, o movimento descendente dos íons solúveis, a síntese e o movimento descendente das argilas, e o desenvolvimento dos agregados das partículas do solo (estrutura) – tanto nos horizontes superiores como nos inferiores – são sinais de que os processos de formação do solo estão em atuação. Como vimos, os corpos do solo são dinâmicos por natureza. Seus horizontes genéticos continuam a se desenvolverem e a se transformarem. Conseqüentemente, em alguns solos, o processo de diferenciação dos horizontes está só começando, enquanto em outros, está bem avançada.

O conhecimento dos quatro processos gerais de formação do solo (adições, remoções, transformações e translocações) e dos cinco principais fatores que influenciam esses processos nos fornece um quadro lógico de valor inestimável para predizer a natureza dos corpos do solo que provavelmente podem ser encontrados em um local específico, bem como para escolher uma área na qual será executada uma determinada tarefa. Por outro lado, nesse mesmo lugar, a análise das propriedades dos horizontes de um perfil do solo pode nos dizer muito sobre a natureza das suas condições climáticas, biológicas e geológicas (tanto do presente como do seu passado). A caracterização dos horizontes do perfil nos permite identificar um indivíduo solo, o qual pode então ser objeto de uma classificação – tópico do próximo capítulo.

QUESTÕES PARA ESTUDO

1. O que significa a afirmação *o intemperismo abrange os processos de destruição e de síntese*? Dê um exemplo desses dois processos no intemperismo de um mineral primário.
2. De que forma a água está envolvida nos principais tipos de reações do intemperismo químico?
3. Explique o significado do intemperismo, considerando o silício em relação ao alumínio (Si/Al) nos minerais do solo.
4. Dê um exemplo de como os materiais de origem podem variar, de um lado, entre as grandes regiões geográficas e, por outro lado, também dentro de uma pequena gleba de terra.
5. Dê o nome dos cinco fatores que afetam a formação do solo. Em relação a cada um deles, compare uma encosta das Montanhas Rochosas, sob floresta, com as planícies semiáridas das pradarias das grandes planícies do meio-oeste dos Estados Unidos.
6. Como os materiais coluviais, till e alúvios diferem na aparência e nos agentes de transporte?
7. O que é loess? Quais são as suas principais propriedades quando ele é um material do qual o solo se originou?
8. Mencione dois exemplos específicos para cada um dos quatro amplos processos de formação do solo.
9. Imaginando, em ambos os casos, uma área quase plana com um granito como material de origem, descreva em termos gerais o que se poderia esperar de dois perfis diferentes de solo, o primeiro em um ambiente de pradarias em clima quente e semiárido e o segundo em um local de clima temperado e úmido com floresta de pinheiros.
10. Considere os dois solos descritos na Questão 5 e faça um esboço dos seus perfis, usando os símbolos principais de cada horizonte e os sufixos específicos, para mostrar a espessura aproximada, a sequência e a natureza dos horizontes que você esperaria encontrar em cada solo úmido.
11. Visualize uma encosta na paisagem, perto de onde você mora. Relate como as propriedades específicas do solo, como cor, espessura e tipos dos horizontes presentes, etc., poderiam provavelmente mudar ao longo da toposequência dos solos dessa encosta.

REFERÊNCIAS

- Binkley, D., and O. Menyailo (eds.). 2005. *Tree species effects on soils: Implications for global change*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Birkeland, P. W. 1999. *Soils and geomorphology*, 3rd ed. Oxford University Press, New York.
- Buol, S. W., R. J. Southard, R. C. Graham, and P. A. McDaniel. 2005. *Soil genesis and classification*, 5th ed. Iowa State University Press, Ames, IA.
- Fanning, D. S., and C. B. Fanning. 1989. *Soil: Morphology, genesis, and classification*. John Wiley & Sons, New York.
- Hilgard, E. W. 1921. *Soils: Their formation, properties, composition, and plant growth in the humid and arid regions*. Macmillan, London.
- Jenny, H. 1941. *Factors of soil formation: A system of quantitative pedology*. Originally published by McGraw-Hill; Dover, Mineola, NY.
- Jenny, H. 1980. *The soil resource—Origins and behavior*. Ecological Studies, Vol. 37. Springer-Verlag, New York.
- Kerr, R. A. 2005. "And now, the younger, dry side of Mars is coming out." *Science* 307:1025–1026.
- Likens, G. E., and F. H. Bormann. 1995. *Biogeochemistry of a forested ecosystem*, 2nd ed. Springer-Verlag, New York.
- Logan, W. B. 1995. *Dirt: The ecstatic skin of the Earth*. Riverhead Books, New York.
- Marlin, J. C., and R. G. Darmody. 2005. "Returning the soil to the land: The mud to parks projects." *The Illinois Steward*, Spring. Disponível em: http://www.istc.illinois.edu/special_projects/il_river/IL-steward.pdf. (acesso em 22 novembro 2008).
- Monger, H. C., J. J. Martinez-Rios, and S. A. Khresat. 2005. "Arid and semiarid soils." In D. Hillel (ed.), *Encyclopedia of soils in the environment*, pp. 182–187. Elsevier, Oxford.
- Richter, D. D., and D. Markewitz. 2001. *Understanding soil change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Schaetzl, R., and S. Anderson. 2005. *Soils—Genesis and geomorphology*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Simonson, R. W. 1959. "Outline of a generalized theory of soil genesis," *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 23:152–156.
- Soil Survey Division Staff. 1993. *Soil survey manual*. U.S. Department of Agriculture Handbook 18. Soil Conservation Service. Disponível em <http://soils.usda.gov/technical/manual/> (acesso em 18 fevereiro 2007).
- van Breemen, N., and A. C. Finzi. 1998. "Plant-soil interactions: Ecological aspects and evolutionary implications," *Biogeochemistry* 42:1–19.